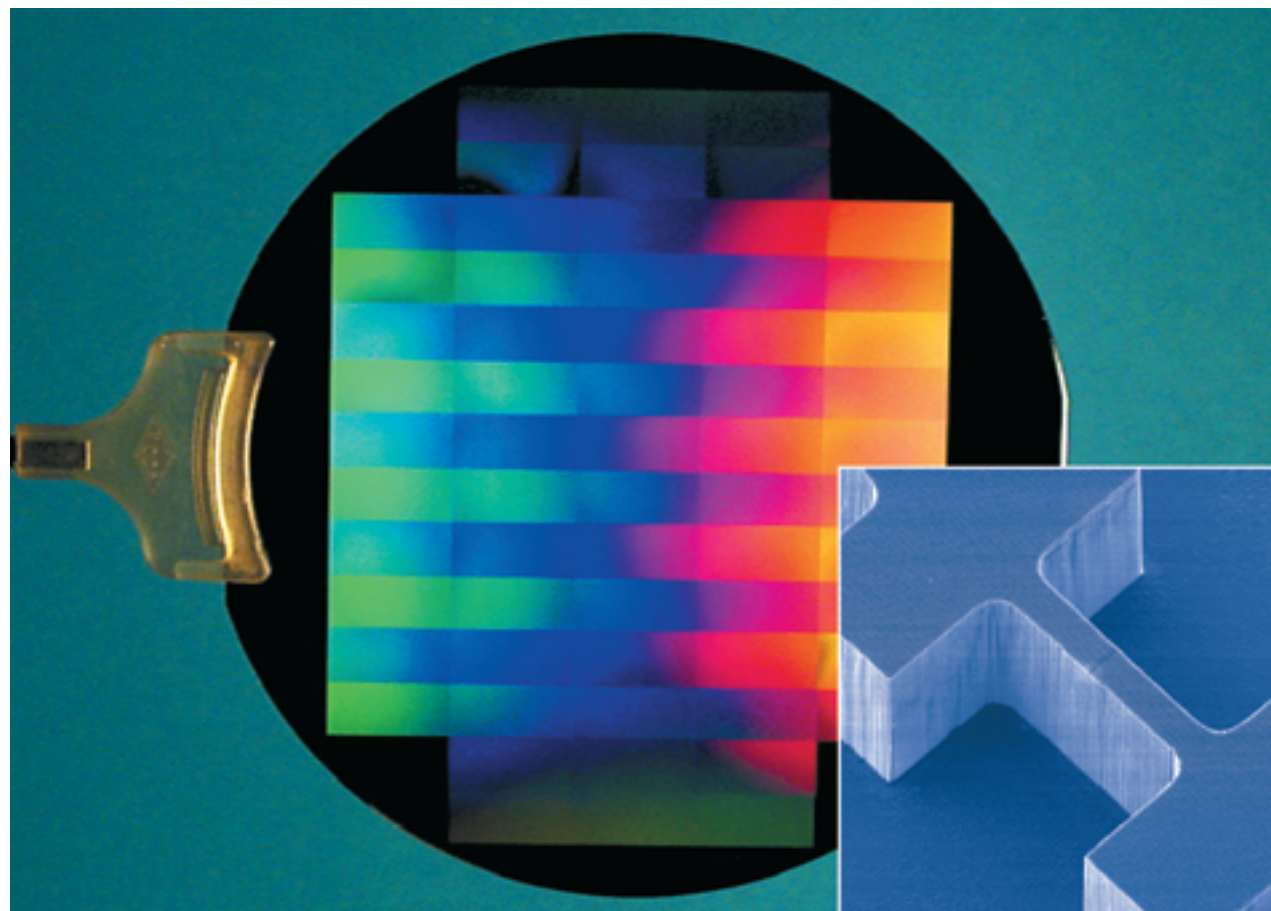


Bits und Bytes aus Licht

In der Informationstechnik führt eine Entdeckung von Grundlagenforschern oft schon nach wenigen Jahren zum Technologiesprung. Eine Schlüsselrolle spielen dabei neue Materialien.

An ihnen arbeiten Wissenschaftler am **MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR MIKROSTRUKTURPHYSIK in Halle** und am **MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR FESTKÖRPERFORSCHUNG in Stuttgart**.



Zweidimensionaler, photonischer Kristall auf einem Siliziumwafer. Er trägt ein periodisches Gitter mit drei Milliarden Poren von je einem Mikrometer Durchmesser. Das kleine Bild zeigt ein vergrößertes Detail der Struktur.

Als die Physiker John Bardeen, Walter Brattain und William Shockley 1947 an den Bell Labs den ersten Transistor bauten, sah niemand die Folgen dieser Erfindung voraus. Fünf Jahrzehnte später beherbergt ein alltägliches Haushaltsgerät – der PC – viele Millionen solcher Transistoren. Sie verleihen ihm eine Rechenleistung, die damals reine Utopie war. Neue Entdeckungen der Grundlagenforschung lösen in der Informations- und Kommunikationstechnik Entwicklungsschübe aus, die unsere Kultur enorm verändern können. Auch Max-Planck-Wissenschaftler machen Forschung mit solchem Potenzial, zum Beispiel die Physiker aus der Abteilung von Prof. Ulrich Gösele, Direktor am Max-Planck-Institut für Mikrostrukturphysik in Halle. Auch Prof. Klaus Kern, Direktor am Max-Planck-Institut für Festkörperforschung in Stuttgart, und seine Mitarbeiter tauchen mit ähnlichem Ziel tief in die Nanowelt ein.

In Computern spielen Datenspeicher eine Schlüsselrolle: Sie sollen die Datenflut dauerhaft speichern und trotzdem möglichst schnell lesbar und neu beschreibbar sein. Seit Jahrzehnten übernehmen das vor allem magnetische Materialien. „Ferromagnetische“ Metallschichten machen Datenbänder, Disketten und Festplatten zu den flexibelsten Speichern. Kleine magnetische Domänen „merken“ sich dabei die Buchstaben der digitalen Schrift, die Bits. Sie erinnern an winzige Kompassnadeln, deren Nordpole fest in eine Richtung

zeigen. Diese Magnetisierungsrichtung wurde ihnen beim Schreiben der Information aufgeprägt. Digitale Speicher benutzen dabei für die beiden binären Buchstaben Null und Eins zwei einander entgegengerichtete Magnetisierungen.

SPEICHER MIT LANGZEITGEDÄCHTNIS

Solche Speicher haben nur dann ein langes Gedächtnis, wenn sie die magnetisch geschriebene Information stabil behalten können. Umwelteinflüsse wie Temperaturschwankungen oder das Auslesen der Information darf die Kompassnadeln also nicht verdrehen. Die fortschreitende Miniaturisierung verschärft diese Anforderungen, denn sie hat den Platzbedarf eines magnetischen Bits extrem verkleinert: Heute muss sich auf einer Festplatte ein Bit mit einem Tausendstel des Platzes begnügen, der ihm noch vor gut zehn Jahren zugewilligt wurde. Das treibt die verwendeten Materialien an ihre Grenzen und wirft Fragen auf, die nur Grundlagenforscher beantworten können – zum Beispiel: Wie klein können die magnetischen Domänen schrumpfen, ohne instabil zu werden? Oder: Wären alternative Konstruktionen besser, die andere Formen des Magnetismus oder ganz andere physikalische Effekte nutzen?

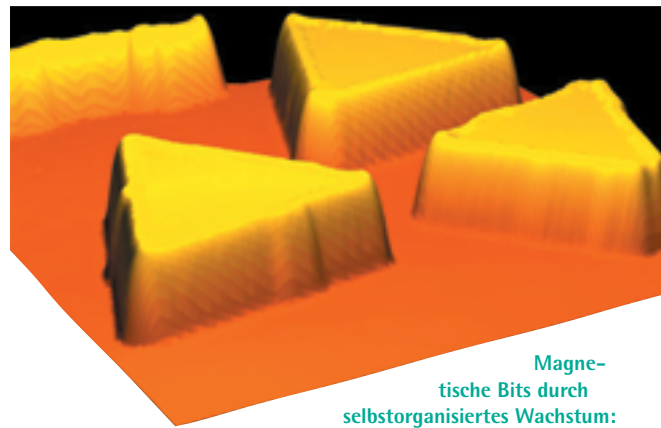
„Wir untersuchen das ultimative Limit“, charakterisiert Klaus Kern die Forschung seiner Gruppe: „Wie viele Atome braucht man mindestens, um einen stabilen Magneten aufzubauen?“ Die Antwort darauf ist nicht tri-

vial: Magnetismus in Materialien ist ein komplexes Phänomen, das viele Atome gemeinsam hervorbringen. Diese Atome verhalten sich wie mikroskopische Stabmagnete mit einem Nord- und einem Südpol, die sich gegenseitig beeinflussen. Sie richten sich aus und erzeugen in der Summe ein kollektives magnetisches Feld, dessen Stärke die Physiker „magnetisches Moment“ nennen.

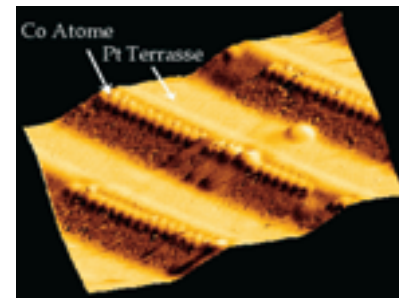
Die Verursacher solcher magnetischer Effekte sind vor allem die Elektronen der Atome. Nur bei bestimmten Konstellationen der Elektronen und ihrer Bahnen um den Atomkern tragen die Atome ein magnetisches Moment, das von außen messbar ist. Und nur solche Atome können überhaupt einen magnetischen Festkörper aufbauen. Dabei bilden die Elektronen auf den äußersten Bahnen durch Überlagerung den „Kitt“, der die benachbarten Atome zum Festkörperkristall „zusammenklebt“.

Auch nach dieser Überlagerung müssen die Atome noch als kleine Stabmagnete zu einer kollektiven Magnetisierung beitragen können. Das schaffen nur wenige Elemente des Periodensystems: Eisen, Nickel, Kobalt und einige seltene Erden können Materialien permanent magnetisch machen. Nach dem lateinischen Wort für Eisen (ferrum) bezeichnen Physiker dieses Phänomen als Ferromagnetismus.

Solche Elemente müssen also als mikroskopische Stabmagnete im Speichermaterial vorhanden sein. Das garantiert allerdings noch nicht, dass sie auch stabile, ferromagneti-



Magnetische Bits durch selbstorganisiertes Wachstum: Das Rastertunnelmikroskop zeigt Kobaltinseln mit einer Kantenlänge von zehn Nanometern (milliardstel Meter) auf einer Kupferoberfläche. Die Inseln enthalten einige hundert Atome.



Rastertunnelmikroskop-Aufnahme von Ketten aus einzelnen Kobaltatomen, die auf den Stufen einer Platinoberfläche sitzen. Der Abstand zwischen den Kobaltketten beträgt nur zwei Nanometer.

sche Domänen ausbilden. Solange die Stabmagnete im dreidimensionalen Kristallgitter nämlich zufällig in alle Richtungen zeigen, heben sich ihre magnetischen Momente gegenseitig auf. Erst wenn eine weit reichende Kraft sie in eine Richtung orientiert, produzieren sie gemeinsam ein gerichtetes, magnetisches Feld – wie Ruderer in einem Boot, die im Takt rudern. Diese Kraft heißt Austauschwechselwirkung. Sie ist ein kollektiver Effekt, den die Quantenmechanik sehr genau beschreibt.

Um die Frage nach der Mindestzahl von Atomen beantworten zu können, stellen die Stuttgarter Max-Planck-Forscher Systeme aus immer weniger magnetischen Atomen her und erforschen deren Eigenschaften. Weil die dazu nötige Experimentier-technik aufwändig ist, arbeiten sie mit Kollegen aus Deutschland, Frankreich, Italien und der Schweiz zusammen. Ihre Systeme sind winzige Strukturen – gebildet etwa von Kobaltatomen auf Oberflächen von unmagnetischem Platin oder Kupfer durch selbstorganisiertes Wachstum. Dieses Wachstum von Strukturen und dünnen Schichten an der Oberfläche eines Kristalls folgt ganz bestimmten Bauplänen. Selbst aus statistischen Zufallsbewegungen können sich im Endeffekt von selbst regelmäßige Muster ausbilden. So

gelang den Forschern zum Beispiel die Herstellung von Ketten aus einzelnen, aneinander gereihten Kobaltatomen. Zur Verblüffung der Fachwelt zeigen diese eindimensionalen Systeme noch Magnetismus, was den gängigen Modellvorstellungen widerspricht (MAXPLANCKFORSCHUNG 2/2002, S. 8).

EINE FESTPLATTE IN DER ATOMWELT

Die internationale Forschergruppe untersucht auch zwei- und dreidimensionale „Haufen“ aus Kobaltatomen auf Oberflächen – so genannte Cluster. Solche Cluster sind noch zu klein, um das räumliche Gitter von kristallinem Kobalt auszubilden, wie es im reinen Metall entsteht. Die Clusterstrukturen liegen zwischen der dreidimensionalen Welt des Kristalls und dem nahezu punktförmigen Einzelatom. Um sie genau zu untersuchen, reduzieren die Wissenschaftler die Clustergrößen bis hinunter zu wenigen Atomen. Dabei fanden sie kürzlich starke Hinweise darauf, dass schon wenige hundert Kobaltatome Strukturen mit stabiler Magnetisierung bilden könnten. Zum Vergleich: Die Festplatte eines PC benötigt noch einige Millionen Atome für ein Bit, was tausend Mal mehr ist. Die Physik zeigt also, dass die Speicherkapazität heutiger Magnetfestplatten im

Prinzip um den Faktor Tausend steigen kann.

Einen anderen Weg der Miniaturisierung verfolgen Ulrich Gösele und eine seiner Arbeitsgruppen, die von Ralf Wehrspohn geleitet wird. Diese Gruppe arbeitet mit ihrer Nachbarabteilung, geleitet von Jürgen Kirschner, und mit der Abteilung von Helmut Kronmüller vom Max-Planck-Institut für Metallforschung in Stuttgart zusammen. Gemeinsam setzen sie eine Stärke des Max-Planck-Instituts für Mikrostrukturphysik in Halle ein: die Fähigkeit, perfekte mikroskopische Strukturen zu erzeugen.

In heutigen Speichermaterialien liegen die kleinen „Stabmagnete“, welche die Information tragen, flach in der dünnen magnetischen Schicht. Die weitere Miniaturisierung dieser Schichtstruktur wird bald an physikalische Grenzen stoßen. Das brachte die Hallenser Forscher auf die Idee, die Stabmagnete nicht nur zu schrumpfen, sondern auch anders anzuordnen – und zwar senkrecht nebeneinander: Auf diese Weise passen viel mehr Bits auf dieselbe Fläche.

Um dieses Material herstellen zu können, entwickelten die Wissenschaftler ein mehrstufiges Verfahren. Zuerst sorgt ein elektrochemischer Prozess dafür, dass sich auf einer Aluminiumscheibe eine wabenförmige

ge Schicht aus Aluminiumoxid von selbst organisiert. Jede Wabe enthält eine Pore, deren Größe die Forscher nach ihren Wünschen einstellen können. Der kleinste Durchmesser liegt bei zehn Nanometern (milliardstel Meter), der größte im Mikrometerbereich (millionstel Meter). Dabei gelingt den Experten das technische Kunststück, diese Poren im Verhältnis zum Durchmesser sehr tief zu machen. Das funktioniert nur mit Ätzprozessen, die sehr selektiv in eine Richtung wirken – eine der größten Hürden in der Mikro- und Nanostrukturierung.

Mit ihrem Verfahren können die Hallenser Forscher Poren wachsen lassen, die einige hundert bis tausend Mal tiefer sind als ihr Durchmesser. Am Schluss füllen sie diese Poren mit einem ferromagnetischen Material – in diesem Fall ist es Nickel. Wie die Abbildung unten zeigt, stehen nun tatsächlich mikroskopische Stabmagnete wie Säulen nebeneinander, wobei einige den Südpol nach oben strecken, andere den Nordpol. Würde nun ein Lesekopf in ein solches Material Informationen schreiben, dann würde er für jedes Bit die Nord- und Südpole einer Säule umklappen. Der Abstand zwischen zwei Säulen beträgt nur hundert Nanometer, also ein zehntel Mikrometer. Ein solches Material ermöglicht also Speicherdichten, die für zukünftige technologische Anwendungen attraktiv sind.

Das Miniaturisierungsspiel kann aus Sicht der Grundlagenforscher noch viel weiter gehen. An eine prinzipielle, physikalisch bedingte Grenze geraten Speichertechnologien erst bei einem einzigen Atom, das ein Bit Information trägt. Ein solcher magnetischer Speicher würde nicht mehr den Magnetismus als kollektive Materialeigenschaft nutzen, sondern einzelne Atome als „Magnetnadeln“ in der Größe weniger zehntel Nanometer (also zehn milli-ardstel Meter). Der Schreib- und Lese-„Kopf“ einer solchen Nanofestplatte würde für jedes Bit Information also nur noch ein einziges Atom manipulieren.

MUSTER AUF DEM KUPFER

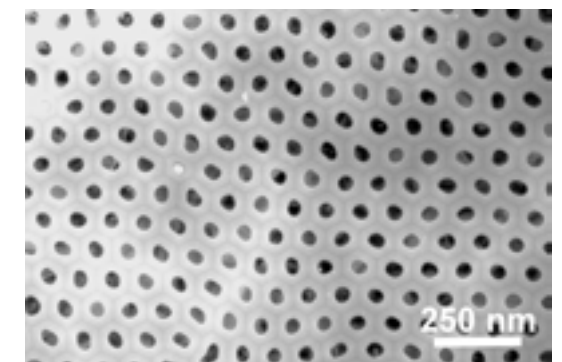
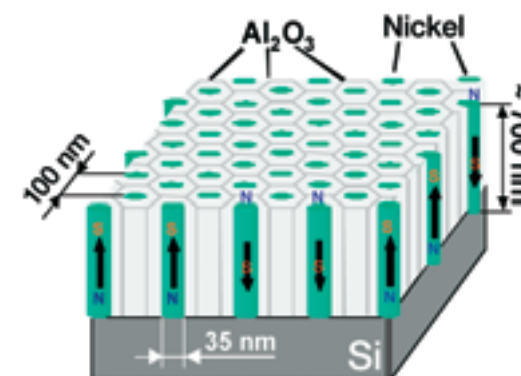
„Ob das technologisch jemals realisiert werden kann, ist sehr fraglich – aber Träumen ist ja erlaubt“, sagt Klaus Kern. Trotz dieser vorsichtigen Einschätzung tasten sich die Grundlagenforscher an diese Vision heran. Den Stuttgarter Wissenschaftlern gelang es, mithilfe von organischen Molekülen einzelne magnetische Atome auf einer hochreinen Kupferoberfläche zu regelmäßigen Mustern anzuordnen: Die Eisenatome sind in metallorganische Komplexe eingebunden – in chemische Verbindungen also, bei denen ein Metallatom mit mehreren organischen Molekülen einen stabilen Verbund bildet. Um ihre magnetischen „Speicher-

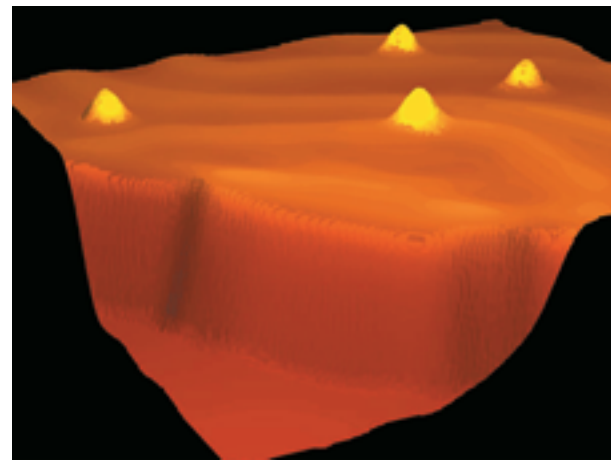
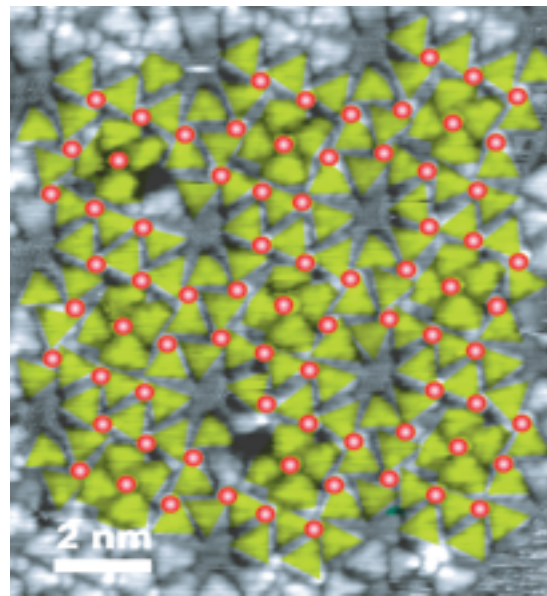
strukturen“ herzustellen, bringen die Stuttgarter Festkörperforscher im Ultrahochvakuum die Eisenatome und eine organische Säure – die Trimesinsäure (englisch abgekürzt TMA) – auf die Kupferoberfläche. Dort bilden die Eisenatome mit dem TMA Komplexe, die sich von selbst zu regelmäßigen, zweidimensionalen Strukturen organisieren. Die Form dieser Muster können die Forscher steuern, indem sie die experimentellen Bedingungen variieren.

Die Abbildung auf Seite 28 (links) zeigt ein solches Muster. Jedes Eisenatom enthält eine digitale „Information“: Sie ist in der Orientierung seiner Magnetisierung gespeichert. Noch schaffen es die Wissenschaftler nicht, die Magnetisierungen dieser Atome einzeln umzuschalten, um echte Bits zu speichern. Aber das ist ihr langfristiges Ziel, wie Kern schmunzelnd zugibt.

In heutigen PCs arbeiten zwei interne Datenspeicher zusammen: Der Halbleiter-Arbeitsspeicher und die magnetische Festplatte. Diese künstliche Trennung ist nötig, weil der viel schnellere Arbeitsspeicher leider ein flüchtiges Gedächtnis hat. Ohne Strom vergisst er alle Daten. Deshalb muss der PC bei jedem Start die wichtigsten Programme und Daten von der Festplatte neu in den Arbeitsspeicher laden. Ein weiteres Hemmnis ist das permanente Verschieben von Daten zwischen Arbeitsspeicher und Festplatte während

Das linke Bild zeigt schematisch, wie die magnetischen Nanostäbe auf dem Siliziumwafer sitzen (nm: Nanometer, Al₂O₃: Aluminiumoxid). Rechts: Die elektronenmikroskopische Aufnahme enthüllt die wabenartige Struktur (Aufsicht).





Die ultimative Grenze der Miniaturisierung. Links: „Speicher“ aus einzelnen magnetischen Eisenatomen (rot) in einem Gitter, zu dem sich organische Komplexe (grün) auf einer Kupferoberfläche selbst organisieren. Rechts: Rastertunnelmikroskop-Bild von vier einzelnen magnetischen Kobaltatomen, die mit einem anderen Verfahren auf eine Goldoberfläche „gesetzt“ wurden.

des Betriebs. Das ist ein entscheidender Faktor, der die Geschwindigkeit von Computern erheblich bremst.

Ideal wäre also ein „nichtflüchtiger“ Arbeitsspeicher, der nach Abschalten des Rechners die Daten nicht vergisst. Nichtflüchtige Speicher gibt es schon in kommerzieller Form. Sie erreichen aber noch nicht die Datendichte, die Computer benötigen. Um einen solchen Speicher zu konstruieren, müssen Forscher die bewährte Siliziumtechnologie mit einem Material zusammenbringen, das Informationen langfristig speichern kann. Geeignete Kandidaten sind natürlich wieder magnetische Materialien. Weltweit arbeiten viele Forschergruppen an solchen Arbeitsspeichern; englisch heißen sie „Magnetic Random Access Memory“ (MRAM), auf Deutsch „Magnetischer Festkörperspeicher“. Ein zweiter, ebenbürtiger Kandidat ist die Materialklasse der „Ferroelektrika“. Aus ihnen werden schon heute „FRAMs“ hergestellt, deren Speicherdichte jedoch noch zu gering für PC-Anwendungen ist. Für diese Materialklasse interessiert sich am Max-Planck-Institut für Mikrostrukturphysik eine von Dietrich Hesse geleitete Gruppe in der Abteilung von Ulrich Gösele.

Ferroelektrika sind quasi das elektrische Spiegelbild der Ferromagnete. In ihnen produzieren Kollektive aus Atomen kein gemeinsames Magnetfeld, sondern ein elektrisches Feld: die „remanente Polarisation“. Man kann sich diese Dipole als mikroskopische Antennen vorstellen, die am Kopf elektrisch positiv, am Fuß negativ geladen sind – oder umgekehrt. Solche Dipole können ihre Ladungstrennung über lange Zeit stabil aufrechterhalten. Ein ferroelektrisches Material enthält viele dieser Dipole, deren positive und negative Enden auch umschaltbar sind. Das besorgt hier ein elektrisches Feld. Ferroelektrika können also wie Ferromagnete digitale Informationen über einen langen Zeitraum speichern.

SILIZIUM ALS WIDERSPENSTIGER PARTNER

Um funktionierende Bausteine mit hoher Speicherdichte herstellen zu können, müssen die FRAM- und die MRAM-Forscher dasselbe, grundlegende Problem lösen: Die besten speicherfähigen Materialien lassen sich nicht gerne mit dem Silizium der Elektronikchips „verheiraten“. Das liegt an unterschiedlichen Kris-

tallaufbau beider Partner. Soll das Speichermaterial in einer dünnen Schicht auf dem Siliziumwafer wachsen, dann droht Ungemach. Das dominierende Siliziumkristallgitter zwingt den Atomen der dünnen Schicht eine „verzogene“ kristalline Ordnung auf. Damit verliert diese Schicht ihre ferroelektrischen oder ferromagnetischen Eigenschaften. Dieses Problem müssen die Chipentwickler lösen.

Die FRAM-Forscher interessiert natürlich auch brennend die Frage, wie klein sie ihre Strukturen überhaupt machen können, ohne dass die informationstragenden Dipole instabil werden. Reicht diese Grenze aus, um dem Miniaturisierungsdruck der Zukunft zu genügen? Die Hallenser Forscher suchen nach einer Antwort auf diese entscheidende Frage. Dazu entwickelten sie ein Verfahren, mit dem sie immer kleinere Teststrukturen auf Silizium herstellen und untersuchen können.

Am Anfang steht ein hoch präzises Kochrezept: Die Forscher mixen die Zutaten, also die Atome des zukünftigen Ferroelektrikums, im richtigen Mengenverhältnis in einer „Precursor-Lösung“. Diese Lösung bringen sie auf den Siliziumwafer in einer

sehr gleichmäßigen, dünnen Schicht auf. Sobald die Schicht trocken ist, schreibt ein Elektronenstrahl in sie die gewünschten Strukturen. Danach wird sie fast wie ein fotografischer Film entwickelt. Nur die belichteten Stellen bleiben als Inseln stehen. Zum Schluss müssen diese Inseln erhitzt werden, damit in ihrem Inneren aus der Mischung richtige ferroelektrische Kristalle wachsen.

Die Abbildung unten zeigt solche Teststrukturen – Inseln aus Bleizirkonat-Titanat (englisch abgekürzt PZT); die kleineren bedecken dabei nur noch eine Fläche von 100 mal 100 Nanometern. Sogar diese Mini-Inseln können noch zwischen einer digitalen Null oder Eins umschalten und das Bit stabil speichern. Die Abbildung auf Seite 30 verdeutlicht, dass dabei kein „Übersprechen“ auftritt, was für Speicheranwendungen wichtig ist: Die einzelne Zelle schaltet um, ohne ihre Nachbarzellen zu beeinflussen. Damit konnten die Max-Planck-Forscher beweisen, dass die Physik noch viel Spielraum für eine Miniaturisierung der FRAMs bietet. Ein Speicherbaustein heutiger Halbleiter-Arbeitsspeicher, der Transistor und Kondensator beherbergen muss, braucht hundert Mal mehr Platz, nämlich mindestens ein Quadratmikrometer.

Aus Sicht der Grundlagenforscher hat dieses Herstellungsverfahren allerdings noch einen Schönheitsfehler: Die Inseln sind „polykristalline“ Strukturen, sie bestehen also aus einem Konglomerat vieler kleiner Kristalle. Da diese Konglomerate ungeordnet sind, können sie im Vergleich zum denkbaren Optimum nur eine relativ schwache remanente Polarisierung aufbauen. Das Optimum erreicht nur ein „Einkristall“ – ein durchgängig gewachsenes Stück Kristall ohne Brüche und Fehler. Dietrich Hesse und seinen Mitarbeitern gelang nun eine Sensation: Sie konnten erstmals eine fast perfekt einkristalline, ferroelektrische Schicht auf einen Siliziumwafer aufbringen. Das ferroelektrische Material ist Lanthan-Wismut-Titanoxid, das eine besonders starke remanente Polarisierung verspricht.

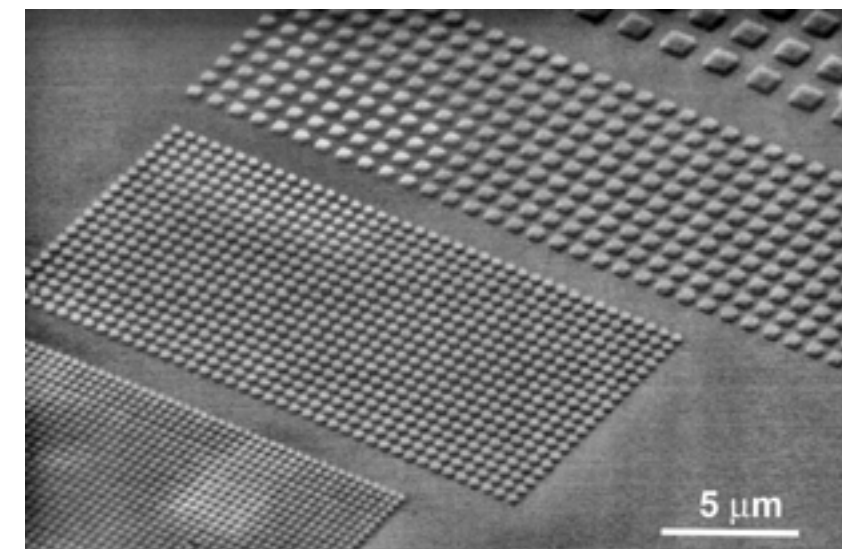
In der Vergangenheit waren Beschichtungsversuche mit diesem Material gescheitert, denn bei den perfekten Einkristallen verschärft sich der Konflikt mit dem unpassenden Siliziumkristallgitter. Mit einem Trick schafften die Max-Planck-Forscher den Durchbruch: Zwei dünne Schichten puffern die Spannungen zwischen den unterschiedlichen Kristallgittern der beiden unfreiwilligen

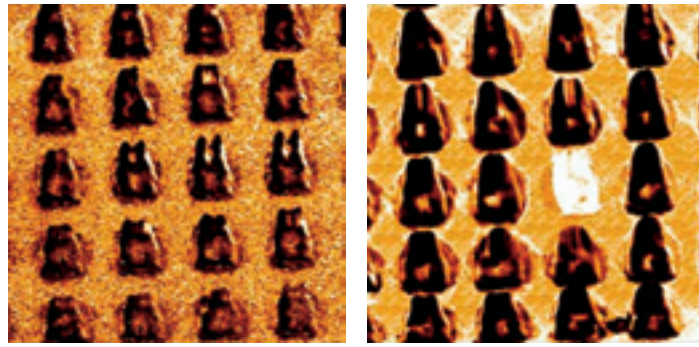
Partner ab (Abb. Seite 31 links). Eine der beiden Schichten dient dabei als Messelektrode für die Versuche. Das Ergebnis ist ein Material mit bisher weltweit unerreichten Eigenschaften. Die remanente Polarisation liegt wesentlich höher als bei allen bisher gebauten Teststrukturen. Das verspricht eine sehr stabile Langzeitspeicherung der Daten.

EINE SCHICHT – GEWOBEN AUS NANORÖHRCHEN

Speicherelemente von zukünftigen Computern müssen keinesfalls aus komplizierten Festkörperstrukturen erschaffen sein. Die Alternative heißt „Kohlenstoff-Nanoröhrchen“. Solche molekulare Materialien mit verblüffenden Eigenschaften erforschen Marko Burghard und seine Kollegen aus der Gruppe von Klaus Kern. Kohlenstoff-Nanoröhren bestehen aus einer ein Atom dicken Schicht, die zu einem Zylinder aufgerollt ist. Gewoben ist diese „Graphenschicht“ aus einem absolut regelmäßigen Netzwerk sechseckiger Ringe, die sechs Kohlenstoffatome bilden. Der Durchmesser dieser Röhren beträgt nur ein bis zwei Nanometer, was den Abmessungen eines kleineren Moleküls entspricht; im Verhältnis dazu sind sie mit einigen Mikrometern

Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme von ferroelektrischen Teststrukturen aus Strontium-Wismut-Tantalat (μm : Mikrometer, millionstel Meter).





Ferroelektrische Zellen aus Bleizirkonat-Titanat mit 250 Nanometer Kantenlänge. Das linke Bild zeigt sie vor und das rechte nach dem Umschalten einer ausgewählten Zelle mit einem Spannungspuls von 20 Volt.

extrem lang. Es gibt auch mehrschalige Röhren aus konzentrisch angeordneten Graphenschichten.

Besondere Bedeutung hat die Richtung, in der die Graphenschicht aufgerollt ist: Je nach „Rollrichtung“ verhält sich das Röhrrchen wie ein Metall oder wie ein Halbleiter. Genau deshalb sind Kohlenstoff-Nanoröhren für Komponenten elektronischer Bauelemente interessant, die möglichst klein sein sollen. Im Jahr 1998 gelang es erstmals, einen Feldeffekt-Transistor (FET) zu bauen, der aus einer einzigen, halbleitenden Nanoröhre besteht. Mittlerweile sind diese FET so optimiert, dass sie manche Eigenschaften herkömmlicher Silizium-Transistoren sogar übertreffen.

Leider verhindern die bisher bekannten Verfahren eine kontrollierte Produktion solcher Transistoren: Keine der eingesetzten Synthesemethoden liefert ausschließlich metallische oder halbleitende Röhren. Sie erzeugen immer nur eine Mischung beider Sorten im Verhältnis von etwa ein Drittel zu zwei Drittel. Bei einschaligen Röhren verschlimmert sich die Situation noch. Sie entstehen meist als Bündel, das beide Röhrensorten enthält. Gegenwärtig gibt es kein physikalisches oder chemisches Verfahren zur Sortentrennung. Um einen einzigen Transistor herzustellen, mussten die Forscher bislang einen „Haufen“ von Nanoröhren mit Kon-

takten versehen – danach suchten sie mühsam nach der entscheidenden „Stecknadel“. Das ist eine zufällig isolierte Röhre mit Halbleitercharakteristik (Abb. Seite 31 rechts). Die metallisch leitenden Röhren in den Bündeln überbrücken nämlich die potenziellen Nanotransistoren und schließen sie elektrisch kurz.

Die Stuttgarter Max-Planck-Wissenschaftler haben diesen gordischen Knoten mit einer einfachen Methode durchschlagen. Durch „kontrollierte Oxidation“ können sie die elektrische Leitfähigkeit der metallischen Röhren bevorzugt zerstören. Damit schalten sie die Kurzschlüsse einfach aus und machen die Röhrenbündel zu funktionierenden Transistoren.

DAS PHOTON ERSETZT DAS ELEKTRON

Ein hoher Prozentsatz dieser Nano-FET hat eine besondere Eigenschaft: Nach Abschalten der elektrischen Energieversorgung „erinnern“ sie sich noch daran, welchen elektrischen Spannungen und Strömen sie zuvor ausgesetzt waren. Dieses „Gedächtnis“ ist also fähig, auch ohne Stromversorgung eine binäre Null oder Eins zu speichern. Bei Raumtemperatur funktioniert das immerhin schon ein bis zwei Wochen. Die Stuttgarter Forscher sind zuversichtlich, dass sie das Gedächtnis ihrer Nanotransistoren durch Materialver-

besserungen noch deutlich verlängern können.

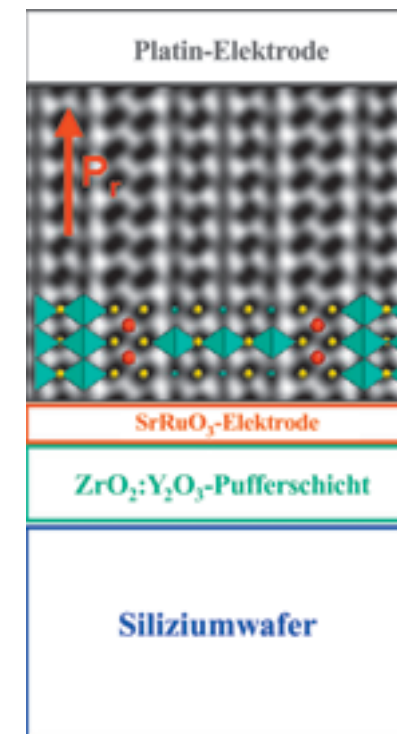
Ulrich Gösele schaut derzeit in die Zukunft: „Was das Elektron für die Kommunikationstechnik des 20. Jahrhunderts war, wird das Photon für das 21. Jahrhundert sein.“ Schon lange haben Grundlagenforscher und Ingenieure einen Traum. Sie möchten den elektrischen Strom als Informationsträger durch Licht ersetzen. Licht hat zwei attraktive Eigenschaften: Zum einen ist es fast immer viel schneller als Elektronen, zum anderen können sich zwei Lichtstrahlen gegenseitig durchdringen, ohne sich zu stören. Elektrischer Strom erlaubt das nicht, weil die Ladungsträger einander beeinflussen und Kurzschlüsse produzieren können.

Die Störunempfindlichkeit von Licht ermöglicht eine extrem dichte Packung der transportierten Informationen. Heutige Glasfaserkabel haben eine Übertragungskapazität („Bandbreite“), die jede herkömmliche Telefonleitung bei weitem übertrifft. Auch ihre Reichweite ist inzwischen konkurrenzfähig: Sie können infrarotes Laserlicht ohne Zwischenverstärker über 100 Kilometer weit transportieren.

Der Ersatz elektrischer Leitungen ist aber nur ein Teil des Traums. Der andere Teil sind optische Systeme, die elektronische Schaltungen ersetzen, also zum Beispiel der optische

Computer. Allerdings fehlen bis heute optische „Transistoren“ und andere Lichtbauelemente, die in Mikrochips integrierbar sind. Nur so aber werden sie mit der herkömmlichen Elektronik konkurrieren können. Die „Photonik“, wie die Lichttechnologie nach dem Photon getauft wurde, steht heute ungefähr auf einer Entwicklungsstufe, auf der sich die Elektronik vor fünfzig Jahren befand. Noch mangelt es an geeigneten Materialien für den technologischen Durchbruch.

In den achtziger Jahren hatten amerikanische Physiker eine Idee, die den Weg zu solchen Bauelementen ebnet könnte. Sie dachten sich „dielektrische“ Materialien mit regelmäßigen, mikroskopischen Strukturen aus, die Licht stark beeinflussen können. Diese Materialien heißen heute photonische Kristalle. An ihrer Entwicklung arbeitet eine Gruppe um Ralf Wehrspohn in der Abteilung von Ulrich Gösele sehr erfolgreich.

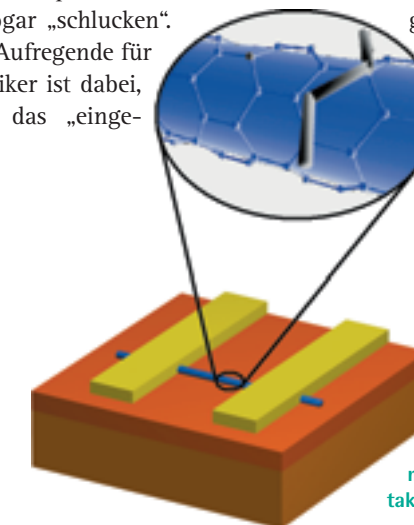


Querschnitt durch den Siliziumwafer, der mit einer nahezu perfekten ferroelektrischen Lanthan-Wismut-Titanoxid-Schicht bedeckt ist. Das hell-dunkle Muster ist eine elektronenmikroskopische Abbildung der regelmäßig angeordneten Schichtatome. Die beiden Zwischenschichten (Puffer und Elektrode) sind zusammen nur 70 Nanometer dick.

Wie viele künstlich erdachte Materialien haben auch photonische Kristalle Geschwister in der Natur. Beispiele sind einige bunt schillernde Schmetterlingsflügel. Ihre Schuppen besitzen Mikrostrukturen, die das Licht je nach seiner Wellenlänge verschieden stark brechen. Diese Fähigkeit treiben die photonischen Kristalle auf die Spitze und produzieren dabei ganz neue physikalische Phänomene. Ihren Namen haben sie übrigens von einer Gemeinsamkeit mit „echten“ Kristallen aus Atomen. Beide bestehen aus Elementarzellen, die ein regelmäßiges, räumliches Kristallgitter aufbauen. Damit photonische Kristalle das Infrarot-Laserlicht der Informationstechnologie manipulieren können, müssen ihre Elementarzellen allerdings etwa einen Mikrometer (millionstel Meter) groß sein – tausend Mal größer als die Zellen echter Kristalle.

AUF DEM WEG IN DIE DRITTE DIMENSION

Photonische Kristalle zeigen viele Besonderheiten: Ihre Elementarzellen bestehen beispielsweise aus kugelförmigen Luftblasen, die eine Art mathematisch perfekten Hartschaum bilden. Den Raum zwischen den Bläschen füllt ein Material, das für Infrarotlicht transparent ist und es zugleich sehr stark bricht wie Silizium. Passen die Durchmesser und die Abstände der Luftbläschen zur Wellenlänge des Laserlichts, dann wirken sie auf das Licht wie viele kleine Resonanzkörper: Sie können es sogar „schlucken“. Das Aufregende für Physiker ist dabei, dass das „einge-



Kohlenstoff-Nanoröhren (blau) können molekulare Feldeffekt-Transistoren bilden, wenn sie mit metallischen Kontakten versehen sind.

fangene“ Licht nicht einfach verloren geht. Die Atome des Füllmaterials speichern es, bis die Resonanzbedingungen verändert werden. Diese Eigenschaften könnten in optischen Schaltelementen genutzt werden. Der „Bau“ von Nano- und Mikrostrukturen in drei Dimensionen ist technologisch extrem schwierig. Deshalb haben die Max-Planck-Forscher gemeinsam mit Physikern der Universität Kiel und der Firma Infineon zunächst zweidimensionale photonische Kristalle entwickelt (Abb. Seite 24). Sie bestehen aus Silizium, in dem sich eine sehr große Zahl von regelmäßig angeordneten Poren befindet, also Säulen aus Luft. Diese Kristalle können das Licht in einer Ausbreitungsebene beeinflussen, die senkrecht zu den Luftsäulen liegt. Der Forschungsgruppe gelangen perfekte photonische Kristalle, die international Aufsehen erregten. Nach dieser erfolgreichen Demonstration wollen Ulrich Gösele, Ralf Wehrspohn und ihre Kollegen nun auch dreidimensionale Kristalle herstellen.

In den vergangenen fünfzig Jahren hat die Kommunikations- und Informationstechnik unsere Welt völlig verändert. Diese Entwicklung haben Forscher ausgelöst, die entdeckten, welches Potenzial in Halbleitermaterialien steckt. Wohin wird die Reise gehen? Niemand kann präzise voraussagen, wie unsere technische Kultur im Jahr 2050 aussehen wird. Eines scheint jedoch sicher zu sein: Neue Materialien, also die Früchte der wissenschaftlichen Neugier von heute, werden diese Zukunft mindestens so stark prägen wie unsere gegenwärtige Welt. ROLAND WENGENMAYR