

NANOTECHNOLOGIE

Superkristall aus Magnet und Halbleiter

Eine neue Klasse magnetooptischer Materialien bietet faszinierende Perspektiven für die Datenspeicherung und -verarbeitung. Darin ordnen sich Nanoteilchen durch Selbstorganisation zu größeren Gebilden mit regelmäßigem Kristallgitter.

Von Joachim Eiding

Lange Zeit galten Materialien, die ferromagnetisch und halbleitend zugleich sind, als kaum zu realisieren. Aus theoretischen Gründen schienen die beiden Eigenschaften schwer miteinander vereinbar. Dafür versprach ihre Kombination in einem einzigen Werkstoff aber faszinierende neue Möglichkeiten – zum Beispiel in der so genannten Spintronik, bei der Magnetfelder für besonders schnelle elektronische Schaltungen benutzt werden sollen. Mittlerweile gibt es zwar schon einige wenige ferromagnetische Halbleiter wie Europiumoxid. Aber dieses Material ist sehr teuer und noch dazu technisch kaum verwertbar, weil es erst bei sehr tiefen Temperaturen magnetisch wird.

Nun ist es der Forschergruppe um Christopher B. Murray an den IBM-Forschungslabors in Yorktown Heights (New York) erstmals gelungen, winzige Teilchen aus magnetischem Eisenoxid und halbleitendem Bleiselenid in einem regelmäßigen dreidimensionalen Gitter anzuordnen (*Nature*, Bd. 423, S. 968). Voraussetzung für die Herstellung eines solchen »Metamaterials« war, dass die

Partikel jeweils einen einheitlichen Durchmesser von wenigen Nanometern hatten. Das ließ sich mit speziellen Herstellungsverfahren erreichen.

Bei ihren Experimenten kochten die Wissenschaftler jeweils ein Gemisch der beiden Teilchensorten in einem organischen Lösungsmittel acht Stunden lang auf. Beim anschließenden Eindampfen schied sich »Superkristalle« aus, in denen die Eisenoxid- und Bleiselenid-Partikel wie bei einer chemischen Verbindung in einem stöchiometrischen Verhältnis vorlagen und genau definierte Plätze einnahmen (Bild).

Um wirklich regelmäßige Kristallgitter zu erhalten, optimierte die Forschergruppe in mehreren Versuchen einige Randbedingungen. So variierte sie das

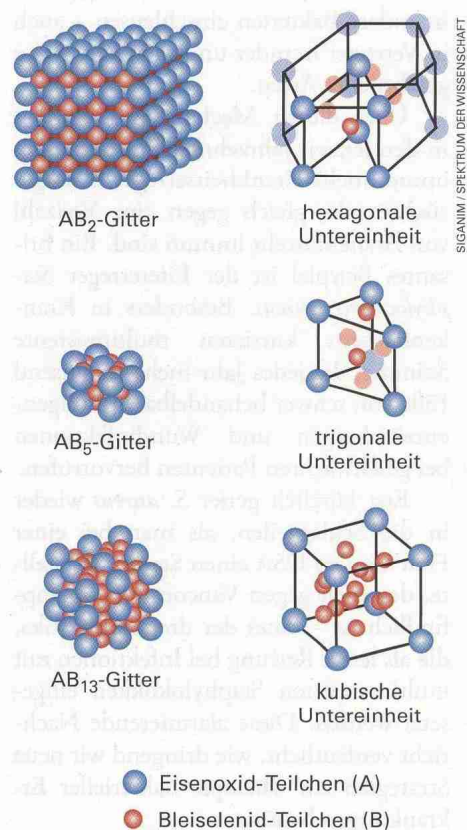
Obwohl zwischen den Nanoteilchen aus Bleiselenid und Eisenoxid keinerlei Bindungskräfte wirken, können sie sich durch Selbstorganisation in drei verschiedenen Gittern mit konstanten, stöchiometrischen Mengenverhältnissen anordnen. Die Geometrie dieser »Superkristalle« ist hier veranschaulicht.

Verhältnis des Durchmessers der Bleiselenid- und Eisenoxid-Teilchen zwischen 0,4 und 0,7. Das beste Ergebnis lieferte ein Wert von 0,55. Als günstigstes Lösungsmittel erwies sich Dibutylether – ein Verwandter des für Narkosezwecke verwendeten Diethylethers.

Entscheidend für die Qualität und Art der Superkristalle war auch das Mengenverhältnis der beiden Bestandteile im Ausgangsgemisch. Die IBM-Forscher variierten es in weiten Grenzen und erhielten so drei verschiedene Metamaterialien, in denen Eisenoxid und Bleiselenid im Verhältnis 1:13, 1:5 und 1:2 vorlagen. Optimal war jeweils ein deutlicher Überschuss der halbleitenden Partikel.

Unter diesen Bedingungen fügten sich die Bestandteile spontan – durch Selbstorganisation – zu den Superkristallen zusammen. Deren genauer Aufbau ließ sich im Elektronenmikroskop erkennen. So bildeten bei Kristallen vom Typ AB₁₃ die Eisenoxid-Teilchen Würfel, in deren Mittel Ikosaeder aus zwölf Bleiselenid-Partikeln saßen, die jeweils ein weiteres Bleiselenid-Teilchen im Zentrum enthielten.

Die beiden anderen Metamaterialien waren hexagonal. Beim AB₅-Typ bildeten die Bleiselenid-Partikel trigonale Prismen, auf deren fünf Seiten jeweils im Zentrum ein Eisenoxid-Teilchen saß.



▷ Beim AB_2 -Typ schließlich waren die Rollen der beiden Komponenten vertauscht. Hier erzeugten die Eisenoxid-Partikel das trigonale Prisma, und in seinem Inneren befand sich jeweils ein Bleiselenid-Teilchen.

Allein die Herstellung solcher Superkristalle ist bereits ein großer Erfolg. Auf dem Weg zu funktionierenden spintronischen Schaltkreisen bedeutet sie allerdings nur einen ersten, grundlegenden Schritt. Bis zum Ziel sind noch viele weitere Hürden zu überwinden.

Immerhin aber hat auch das jetzt fabrizierte Zwittermaterial aus Magnet und Halbleiter bereits interessante Eigenschaften. So bilden die isoliert vorliegenden Bleiselenid-Teilchen – vor allem beim AB_2 -Typ – so genannte Quantenpunkte. Das sind praktisch ausdehnungslose, »nulldimensionale« Fallen für Elektronen. Je nachdem ob sie leer oder voll sind, können sie eine binäre 0 oder 1 repräsentieren. Möglicherweise lässt sich über die umgebenden magnetischen Teilchen die Be- und Entladung, also der elektronische Schaltvorgang, steuern.

Modulare Montage von Werkstoffen

Nun haben Quantenpunkte aus 200 bis maximal 10 000 Atomen aber eine weitere ungewöhnliche Eigenschaft, die aufregende Perspektiven für optoelektronische Anwendungen eröffnet. Wegen des beengten Raums bleiben die eingesperrten Elektronen auf eine Serie diskreter Energieniveaus beschränkt – während sie in Metallen und Halbleitern breite Bänder zur Verfügung haben. Durch Anregung mit Licht geeigneter Wellenlänge lassen sie sich auf ein höheres Niveau anheben und senden beim Zurückfallen in den Ausgangszustand wieder elektromagnetische Strahlung einer bestimmten Frequenz aus. Die Energie des Übergangs hängt dabei von der Größe der Quantenpunkte, ihrer Form und relativen Anordnung im Gitter ab – eine Vielzahl von Parametern also, mit denen sich spielen lässt.

Dabei liefern im Fall der neu hergestellten Superkristalle die magnetischen Eisenoxid-Teilchen eine weitere Stellschraube. Mit ihrem Magnetfeld sollten sie die vorhandenen Niveaus noch einmal aufspalten – Physiker sprechen vom Zeeman-Effekt. Die Folge sind neue optische Übergänge, die mit der Stärke des Magnetfeldes variieren. Allerdings ließ sich das Phänomen bei den Superkristal-

len bisher noch nicht nachweisen. »Wir hoffen sehr, die Zeeman-Aufspaltung durch die Eisenoxid-Nanopartikel sehen und messen zu können«, meint Murray.

»Der Effekt wäre für die Entwicklung der Nanotechnologie schon sehr hilfreich«, urteilt der Festkörperphysiker und Magnetooptik-Experte Josef Zweck von der Universität Regensburg. Ein magnetisches und ein halbleitendes Partikelchen könnten zusammen einen neuartigen Typ von Speicherzelle bilden. Dabei würde die Magnetisierung des Eisenoxid-Teilchens die Aufspaltung des Quantenpunktes steuern. Mit einem Laser ließe sich dann das Ausmaß des Effektes ermitteln und so feststellen, ob ein starkes oder ein schwaches Magnetfeld vorliegt, was wiederum als binäre 1 oder 0 interpretiert werden könnte. »Ob die Eisenoxid-Kriställchen die Quantenpunkte allerdings wirklich genügend aufspalten, bleibt abzuwarten«, schränkt der Festkörperphysiker aus Regensburg ein.

Aber unabhängig davon bietet die Herstellung von Superkristallen aus verschiedenartigen Nanopartikeln generell viel versprechende Möglichkeiten. »Am meisten fasziniert uns, dass sich mit dieser Methode der modularen Montage beliebige Materialien zusammenbauen lassen«, erklärt Murray. Folglich basteln er und seine Forscherkollegen bei IBM

neben dem Eisenoxid-Bleiselenid-System an vielen weiteren Superkristallen, wobei alle möglichen Kombinationen bekannter Nanopartikel untersucht werden. »Wir wollen ein breites Sortiment von Metamaterialien in der Pipeline haben. Benötigen unsere Entwickler dann neue technische Möglichkeiten, können sie darauf zurückgreifen«, beschreibt Murray die Strategie des Unternehmens.

Eine Besonderheit von Superkristallen ist auch, dass sie bei bestimmten Wellenlängen über einen negativen Brechungsindex verfügen und entsprechende Strahlung folglich im Vergleich mit normalen Materialien wie Glas zur anderen Seite hin brechen. Bisher ließen sich nur Werkstoffe herstellen, die diesen Effekt im Mikrowellenbereich zeigen. Mit Metamaterialien aus Nanoteilchen hoffen die Festkörperphysiker nun die dafür verantwortlichen elektronischen Übergänge in den optischen Spektralbereich verschieben zu können. Das bringt Mihail Roco von der National Science Foundation der USA zum Schwärmen: »Diese Ergebnisse zeigen einen Weg auf, wie die Nanotechnologie eine kommende industrielle Revolution einleiten könnte«, urteilt er enthusiastisch. ◁

Joachim Eiding ist promovierter Chemiker und freier Wissenschaftsjournalist in München.