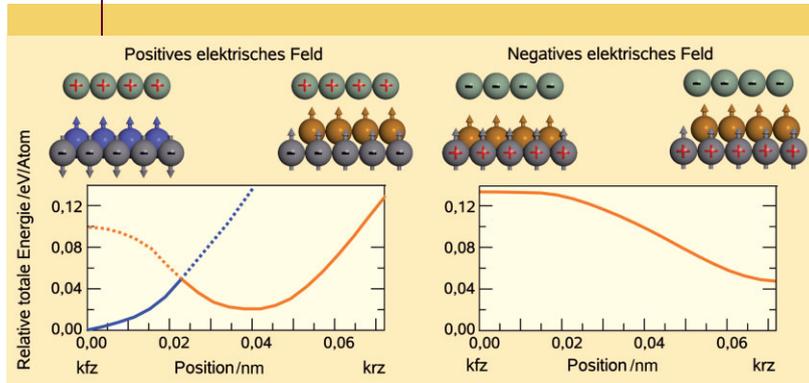


FESTKÖRPERPHYSIK

Magnetoelektrische Kopplung an Metalloberflächen

Bei vielen gängigen Speichermedien wie Festplatten wird die Information magnetisch geschrieben und gelesen. Höhere Speicherdichten könnten Verfahren ermöglichen, bei denen man die magnetische Struktur eines Festkörpers durch ein elektrisches Feld ändert. In enger Zusammenarbeit zwischen dem Max-Planck-Institut für Mikrostrukturphysik, der Universität in Halle und dem Karlsruher Institut für Technologie ist es gelungen, mit Hilfe einer solchen magnetoelektrischen Kopplung die magnetische Ordnung in metallischen Nanostrukturen durch ein elektrisches Feld zwischen zwei stabilen Zuständen hin- und herzuschalten.

ABB. 1 | SIMULATION



Totale Energie von zwei Atomlagen Eisen im elektrischen Feld in Abhängigkeit von der lateralen Position der obersten Atomlage. Im positiven elektrischen Feld (linkes Bild) ist die antiferromagnetische kzf-Konfiguration (blau, links) energetisch am günstigsten. Im negativen elektrischen Feld (rechtes Bild) ist die ferromagnetische (orange) Anordnung immer günstiger als die antiferromagnetische. Das Energieminimum findet man für die krz-Struktur.

Im Allgemeinen wird ein ruhendes magnetisches Moment von einem elektrischen Feld nicht beeinflusst. Es gibt aber Materialien, in denen das elektrische Feld die Kristallstruktur ändert und die veränderte Kristallstruktur wiederum zu einer anderen magnetischen Ordnung führt. Auf der Suche nach Materialien, die eine solche magnetoelektrische Kopplung zeigen, wurden Metalle bisher vernachlässigt. Auf den ersten Blick erscheint in diesen eine Wechselwirkung der Kristallstruktur mit dem elektrischen Feld unmöglich: Das elektrische Feld induziert durch die Bewegung der mobilen Elektronen eine Oberflächenladung, die das Feld im Innern des Festkörpers vollständig kompensiert. Die Atomrümpfe direkt

an der Oberfläche aber erfahren eine ähnliche Kraft wie die Elektronen, wegen ihrer positiven Ladung hingegen in die entgegengesetzte Richtung. Auf Grund ihrer starken Bindung an das Kristallgitter führt diese Kraft nur zu kleinen Verschiebungen der Atome [1].

In bestimmten Materialien hängt die magnetische Ordnung jedoch so empfindlich von der Gitterstruktur ab, dass diese kleine Verschiebung ausreichen kann, um die magnetische Ordnung an der Oberfläche zu verändern. Eisen besitzt diese besondere Eigenschaft. In der dichten, kubisch-flächenzentrierten (kzf) Kristallstruktur ist es antiferromagnetisch, in der weniger dichten, kubisch-raumzentrierten (krz) Kristall-

struktur hingegen ferromagnetisch. Deshalb bietet sich ein dünner Eisenfilm als Modell für die magnetoelektrische Kopplung in Metallen an.

In unseren Computersimulationen haben wir ein System aus zwei Atomlagen Eisen auf einem Kupfersubstrat betrachtet (Abbildung 1). Dabei zeigte sich, dass in einem positiven elektrischen Feld von 1 GV/m der Abstand zwischen den obersten beiden Atomlagen um etwa 15 % geringer ist als in einem negativen Feld. Die berechnete Energielandschaft für die oberste Atomlage zeigt außerdem, dass die energetisch günstigste Konfiguration der beiden Atomlagen im positiven elektrischen Feld antiferromagnetisch und kzf ist, im negativen Feld hingegen ferromagnetisch und krz [2].

Auch experimentell konnten wir das Schalten zwischen beiden Zuständen demonstrieren. Dazu untersuchten wir mit einem Rastertunnelmikroskop (RTM) zwei Atomlagen dicke Eiseninseln auf einem Kupfersubstrat. Die Eiseninseln zeigen zwei Phasen: kzf im Zentrum der Insel und krz auf dem Rand [3]. Die magnetische Ordnung lässt sich indirekt über den Vergleich von Tunnelspektren mit der theoretisch berechneten Zustandsdichte bestimmen. Hierbei ergibt sich, dass

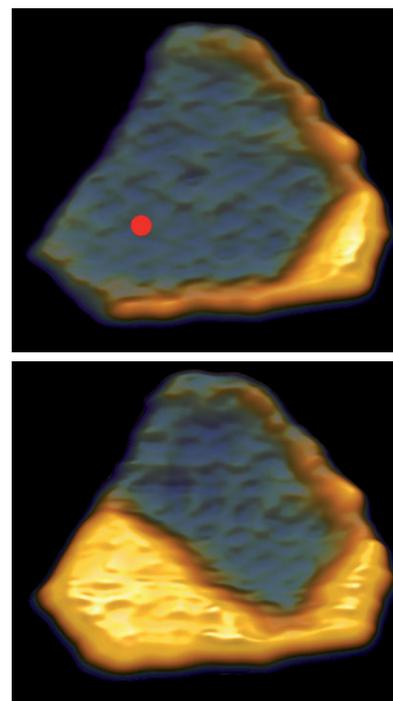


Abb. 2 Zwei RTM-Aufnahmen derselben Eiseninsel vor und nach einem elektrischen Feldimpuls. Oben ist die Eiseninsel fast vollständig im antiferromagnetischen kzf-Zustand (blau). Der rote Kreis zeigt die Position des folgenden positiven Feldimpulses. Unten ist diese Ecke nach dem elektrischen Feldimpuls im ferromagnetischen krz-Zustand (orange).

LEHRERFORTBILDUNG

Thermodynamik – Quantenphysik – Experimente

Die Deutsche Physikalische Gesellschaft veranstaltet im Physikzentrum Bad Honnef drei Fortbildungskurse für Physiklehrer mit den Themen:

27. Juni-1. Juli: **Thermodynamik**. Wissenschaftliche Leitung: Andreas Engel (Uni Oldenburg) und Michael Vollmer (FH Brandenburg).

25.-29. Juli: **Physikalische Experimente – in der Forschung und in der Lehre**. Wissenschaftliche Leitung: Dieter Schumacher (Uni Düsseldorf), Heike Theyßen (Uni Dortmund).

21.-25. Oktober 2011: **Quantenphysik**. Wissenschaftliche Leitung: Rainer Müller (TU Braunschweig), Markus Arndt (Uni Wien).

Kursgebühren inklusive Unterkunft und Verpflegung 246 € (196 € für Lehramtskandidaten und Referendare, 155 € für Tagesgäste). Nähere Informationen: www.pbh.de

der kfz-Bereich wie theoretisch vorhergesagt lagenweise antiferromagnetisch ist, während der krz-Teil ferromagnetisch ist. Das nötige elektrische Feld in der Größenordnung von 1 GV/m lässt sich im Tunnelkontakt des RTMs bei üblichen Messbedingungen von etwa einem Volt angelegter Spannung und einem Abstand zwischen Spitze und Probe von etwa einem Nanometer leicht erreichen.

Um die magnetische Ordnung zu beeinflussen, platzierten wir die Spitze des RTMs über einer Insel und legten für 50 ms ein positives elektrisches Feld von 2 GV/m an. Die Abbildungen 2a und 2b zeigen RTM-Aufnahmen der Insel vor und nach dem Feldpuls. Man erkennt, dass sich der ferromagnetische krz-Bereich (orange) zu Gunsten des antiferromagnetischen kfz-Bereichs (blau) vergrößert hat. Legt man ein negatives elektrisches Feld an, so kann man zur anfänglichen Konfiguration zurückschalten.

Dieser Schaltprozess ist deterministisch und reproduzierbar. Liegt jedoch kein oder nur ein niedriges elektrisches Feld an, bleibt die Konfiguration unverändert. Damit ist es erstmals gelungen, Informationen magnetischer Natur mit einem elektrischen Feld auf der Nanometerskala zu schreiben, zu speichern und auszulesen [2]. Um diese Speichertechnik in Halbleiterbauteilen einsetzen zu können, soll in Zukunft versucht werden das nötige elektrische Feld über Festkörperisolatoren statt über einen Vakuum-Tunnelkontakt aufzubauen.

- [1] J. Weissmuller et al. *Science* **2003**, 300, 312.
- [2] L. Gerhard et al. *Nature Nano.* **2010**, 31.10.2010, DOI: 10.1038/nnano.2010.212
- [3] Biedermann et al. *Phys. Rev. B.* **2006**, 73, 165418.

*Lukas Gerhard, KIT Karlsruhe;
Arthur Ernst, MPI für
Mikrostrukturphysik Halle*