

WENN ELEKTRONEN DURCH DIE WAND GEHEN ...

SPINPOLARISIERTES TUNNELN IN MAGNETISCHEN NANOSTRUKTUREN

Dirk Sander, Wolfgang Kuch und Jürgen Kirschner

20

Der Elektronentransport durch magnetische Nanostrukturen führt zu einer Reihe von neuen und interessanten Effekten. Besonders das sogenannte Tunneln von Elektronen zwischen zwei magnetischen Strukturen, ein quantenmechanischer Effekt, bei dem Elektronen eine nichtleitende Barriere überwinden, ist für Anwendungen in der Datenspeicherung wichtig. Im Max-Planck-Institut für Mikrostrukturphysik werden Nanostrukturen aus magnetischen Metallen und nichtleitenden Oxiden hergestellt, und der Einfluss der atomaren Grenzflächenstruktur auf die Tunneleigenschaften der Elektronen wird untersucht.

Stellen Sie sich vor, Sie schalten Ihren Computer ein, und alles ist schon da. Kein lästiges Warten auf das Laden des Betriebssystems und der Programme, Sie machen direkt dort weiter, wo sie das letzte Mal aufgehört haben.

Zahlreiche Firmen arbeiten mit Hochdruck daran, dass dies keine Zukunftsvision bleibt, sondern vielleicht schon in wenigen Jahren zur Normalität gehört. Dazu werden sogenannte MRAM-Speicherbausteine (MRAM, magnetic random access memory) entwickelt, die schon bald den jetzigen DRAM (dynamic random access memory) ablösen könnten. In diesem MRAM wird die Information magnetisch gespeichert, und sie geht beim Abschalten des Computers, im Gegensatz zum jetzigen DRAM, nicht verloren.

Magnetische Datenspeicherung ist uns von der Computerfestplatte – aber auch von Tonbändern – wohl vertraut und man blickt auf Jahrzehnte Erfahrung zurück. Warum kommt es dann erst jetzt zum Einsatz erster MRAM-Speicherbausteine? Der Grund ist, dass die im MRAM eingesetzten magnetischen Vielfachschichten, bei denen die einzelnen Schichtdicken nur noch wenige Atomdurchmesser betragen, erst in den achtziger Jahre erforscht wurden. Diese Forschungen haben gezeigt, dass der elektrische Widerstand eines Schichtstapels aus magnetischen und nicht-magnetischen

Materialien, wie er in Abb. 1(a) gezeigt ist, von der relativen Orientierung der Magnetisierung in den übereinander liegenden Schichten abhängt: Ist die Magnetisierung parallel ausgerichtet, so ist der Widerstand gering; ist die Ausrichtung entgegengesetzt, so ist der Widerstand hoch. Der Clou dieses Sandwiches aus magnetischen Schichten ist, dass die Magnetisierung in den Schichten – und damit der elektrische Widerstand – gezielt eingestellt werden kann.

Magnetische Nanostrukturen als Speicherzellen

Beim MRAM erfolgt dieses Einstellen der Magnetisierungsrichtung durch das Magnetfeld, das von einem Strom in der Nähe der Schichtstruktur erzeugt wird. Schaltet man den Strom ab, so bleibt die Magnetisierung des Schichtsystems erhalten. Erst durch einen Stromfluss in umgekehrter Richtung kann die Magnetisierung der Schicht verändert werden. Ordnet man diese Schichtstapel an den Kreuzungspunkten stromführender Leitungen an, so erhält man ein Feld einzelner ansprechbarer Speicherelemente, siehe Abb. 1(b), in denen die Information binär (1: hoher Widerstand, 0: niedriger Widerstand) gespeichert ist. Ein entscheidendes Detail dieser Sandwichstruktur ist, dass die magnetischen Schich-

ten durch eine äußerst dünne, elektrisch isolierende Oxidschicht voneinander getrennt sind. Dennoch können die Elektronen, die für den Stromfluss durch die Schichtstruktur verantwortlich sind, diese nur wenige Atomlagen dünne Oxidschicht durchdringen: Der quantenmechanische Tunneleffekt ermöglicht diesen Elektronendurchgang.

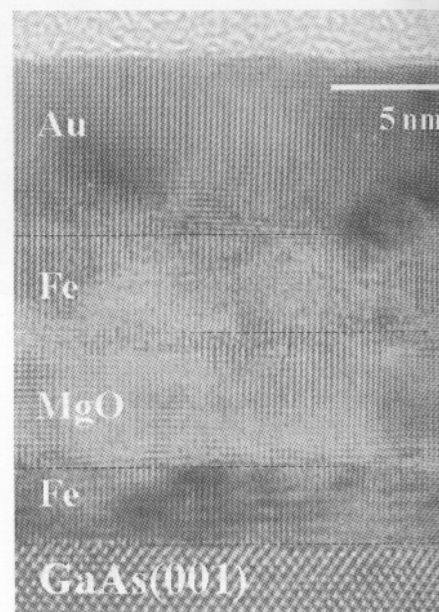


Abb. 2: Transmissionselektronenmikroskopische Aufnahme eines Querschnitts durch ein magnetisches Schichtsystem (Fe), getrennt von einer Oxidschicht (MgO). Die gestrichelte Linie verdeutlicht die atomar scharfen Grenzflächen.

Atomar geordnete Grenzflächen

Im Max-Planck-Institut für Mikrostrukturphysik wird untersucht, wie die Atome in der Nähe der Grenzfläche zwischen magnetischer Schicht und Oxid angeordnet sind, und welchen Einfluss die atomare Struktur auf die physikalischen Eigenschaften der Schicht hat. Dabei kommen eine Reihe von speziellen Untersuchungsmethoden wie die Transmissionselektronenmikroskopie, die Rastertunnelmikroskopie und die Oberflächenröntgenbeugung zum Einsatz, und die Ergebnisse werden im Zusammenhang mit Berechnungen der Theorieabteilung des Max-Planck-Instituts ausgewertet.

Da die elektronischen Transporteigenschaften beim Tunneln empfindlich von der Beschaffenheit und Breite der Oxidbarriere und der Struktur der Grenzflächen abhängen, werden kristallin wohlgeordnete

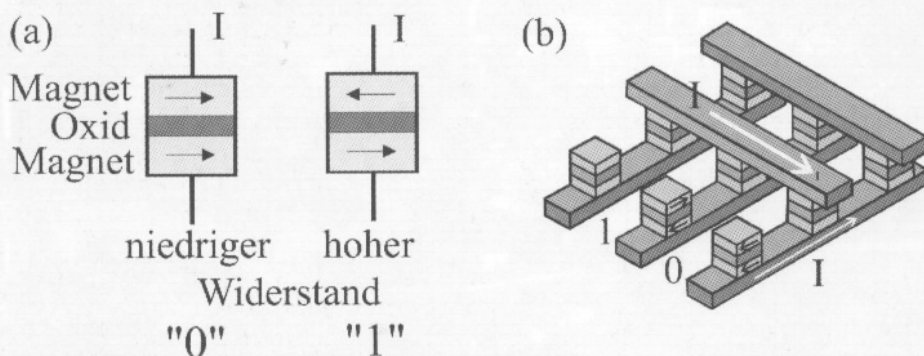


Abb. 1: Schema einer MRAM Zelle. (a) Bei paralleler Magnetisierungsrichtung der Magnet-schichten ist der elektrische Widerstand für den Strom I niedrig, bei entgegengesetzter wird über den Widerstand die binäre Information 0 und 1 magnetisch gespeichert. (b) Anordnung mehrerer MRAM Zellen an den Kreuzungspunkten von Strompfaden I ergibt frei adressierbaren Speicher.

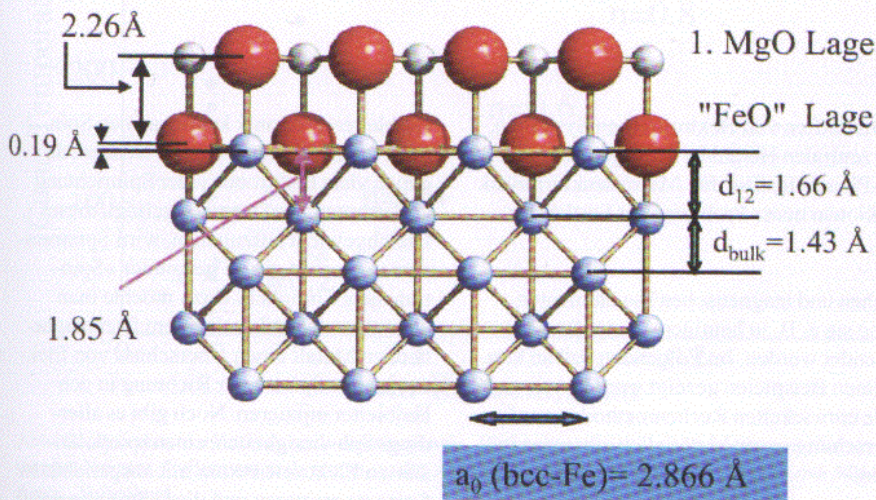


Abb. 3: Strukturmodell einer Fe-MgO Grenzfläche. Ergebnis einer Oberflächenröntgenbeugungs-Strukturanalyse am Synchrotron. Zwischen Fe und MgO hat sich eine FeO Schicht gebildet. Abstände in Å = 0.1 nm.

Proben untersucht, bei denen die Atome auf definierten Gitterplätzen regelmäßig angeordnet sind. Abbildung 2 zeigt eine Transmissions-Elektronenmikroskopie Aufnahme eines Querschnitts durch ein Eisen-Magnesiumoxid-Eisen Schichtsystem auf Gallium-Arsenid, das mit einer Goldschicht abgedeckt wurde. Die Aufnahme zeigt, dass die einzelnen Schichten von atomar scharfen Grenzflächen getrennt sind und kristallin gut geordnet sind. Doch wo genau sitzen die einzelnen Atome? Diese Frage wird mit der Röntgenbeugung geklärt.

Auf einen hundertstel Nanometer genau

Ein atomares Strukturmodell, das aus einer detaillierten Strukturanalyse mit Oberflächenröntgenbeugung an einem Synchrotron gewonnen wurde, ist in Abb. 3 dargestellt. Die atomaren Positionen werden mit einer Genauigkeit von 0.01 nm, ein Zehntel des Durchmessers eines Wasserstoffatoms (1 Å=0.1 nm), bestimmt. Im Gegensatz zur Erwartung einer scharfen Grenzfläche zwischen ferromagnetischer Schicht und Oxid findet man, dass die oberste Eisen-schicht einem Eisenoxid zuzuordnen ist. Diese Entdeckung hat große Bedeutung für die Beschreibung des Tunnelvorgangs durch die Eisen- und Magnesiumoxid Schicht. Elektronen mit verschiedener Spin-Orientierung tunneln mit unterschiedlicher Wahrscheinlichkeit zwischen den magnetischen Schichten. Der Tunnelstrom hängt davon ab, wie die Magnetisierung in den magnetische Strukturen ausgerichtet ist. Zur Untersuchung des spinpolarisierten Tunnelns in magnetischen Nanostruk-

turen wird die Rastertunnelmikroskopie verwendet. Wie erfolgt das Schichtwachstum bei geringen Bedeckungen, und wie verhält sich dann der magnetisierungsabhängige Tunnelwiderstand? Diese Fragen werden mit einem im Max-Planck-Institut entwickelten Rastertunnelmikroskop zur Messung des Elektronenspin-abhängigen Transports untersucht. Abbildung 4 zeigt das Anfangsstadium des Wachstums von Eiseninseln (hellgrün) auf einer Magnesiumoxid-Schicht auf einem Eisenkristall. Das Eisen wächst in Form zahlreicher Inseln mit einem Durchmesser von 4 nm, und bei dieser Bedeckung wird noch kein geschlossener Eisenfilm gebildet. Der Spin-abhängige Tunnelstrom durch diese Eisen-Nanostrukturen wird untersucht.

Dirk Sander wurde 1992 an der RWTH Aachen promoviert und erhielt für seine Dissertation die Borchers-Plakette der RWTH. 1992–1993 arbeitete er am IBM Forschungszentrum in Yorktown Heights, New York, bevor er 1993 an das MPI für Mikrostrukturphysik wechselte. Er habilitierte sich 1999 in Halle an der Martin-Luther-Universität. 2000–2001 war er mehrere Monate als Gast-Professor an die Universität Marseille eingeladen. Er wurde 2004 mit dem Gaede-Preis der Deutschen Vakuum Gesellschaft ausgezeichnet.

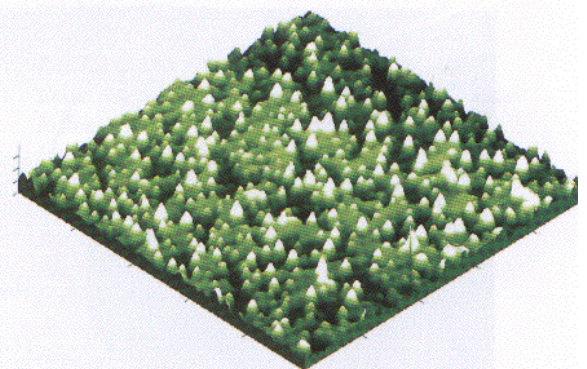


Abb. 4: Rastertunnelmikroskopische Aufnahme von Fe-Inseln auf MgO. Bildgröße 100 x 100 nm², die höchsten Strukturen sind 1.5 nm hoch.

Wolfgang Kuch studierte 1984–1989 Physik an der Johann Wolfgang von Goethe-Universität in Frankfurt am Main und wurde 1993 an der Universität Stuttgart promoviert. Seit 1993 ist er wissenschaftlicher Mitarbeiter am Max-Planck-Institut für Mikrostrukturphysik in Halle, unterbrochen von einem Auslandsaufenthalt 1996 am IBM Almaden Research Center in San Jose (U.S.A.). 2002 Habilitation an der Universität Halle. Kuch beschäftigt sich schwerpunktmäßig mit der Erforschung magnetischer Schichtstrukturen mit Synchrotronstrahlung.

Jürgen Kirschner wurde 1974 an der Technischen Universität München promoviert und arbeitete zunächst am Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, bevor er 1974–1988 am Institut für Grenzflächenforschung und Vakuumphysik des Forschungszentrums Jülich als wissenschaftlicher Mitarbeiter tätig war. 1982 habilitierte er sich an der RWTH Aachen. Ihm wurde 1986 der (erste) Gaede-Preis der Deutschen Vakuum Gesellschaft verliehen. 1988 folgte er einem Ruf an die Freie Universität Berlin auf eine C4-Professur für Experimentalphysik. Seit 1993 ist er Professor an der Martin-Luther-Universität und beurlaubt an das Max-Planck-Institut für Mikrostrukturphysik.