

NACHWUCHSFÖRDERUNG

Multifunktionale magnetische Hybride

FÜR SEINE ZUKUNFTSWEISENDEN FORSCHUNGEN IN DER FESTKÖRPERPHYSIK ERHIELT SEBASTIAN T. B. GOENNENWEIN DEN ARNOLD SOMMERFELD-PREIS 2008.

Abb. 1 (a): Die Erde wirkt als Permanentmagnet, dessen Magnetisierung (großer roter Pfeil) mit Nord- (N) und Südpol (S) ein magnetisches Streufeld H (schwarze Feldlinien) hervorruft. **(b)–(e):** Die Magnetisierung eines Ferromagneten ist ein digitales Bit. **(b)** „1“ entspricht z. B. „Magnetisierung nach oben“. **(c)** Kleine Magnetfelder $H < H_c$ beeinflussen die Magnetisierungsrichtung nicht, die Information bleibt gespeichert. **(d)** Mit hinreichend großen Magnetfeldern $H > H_c$ kann die Magnetisierungsrichtung verändert werden. **(e)** „0“ entspricht „Magnetisierung nach unten“.

VON SEBASTIAN T. B. GOENNENWEIN

Magnetische Instrumente sind seit vielen Jahrhunderten ein fester Bestandteil der menschlichen Zivilisation. Ein Paradebeispiel hierfür ist der Magnetkompass, der bis heute in mehr oder weniger unveränderter Bauform in der Navigation eingesetzt wird. Sein Funktionsprinzip ist in Abb. 1 (a) dargestellt: Die Erde entspricht einem Permanentmagneten, dessen Magnetisierung – als Pfeil mit magnetischem Nord- und Südpol eingezeichnet – außerhalb der Erde zu einem magnetischen Streufeld führt. Auf dieses Magnetfeld reagiert die Kompassnadel,

indem sie sich wie jeder frei drehbar aufgehängte Stabmagnet entlang des Streufelds ausrichtet und es so erlaubt, die Richtung des Magnetfelds zu messen. Technisch gesehen ist der Magnetkompass also nichts anderes als ein magnetischer Sensor.

Magnetische Datenspeicherung

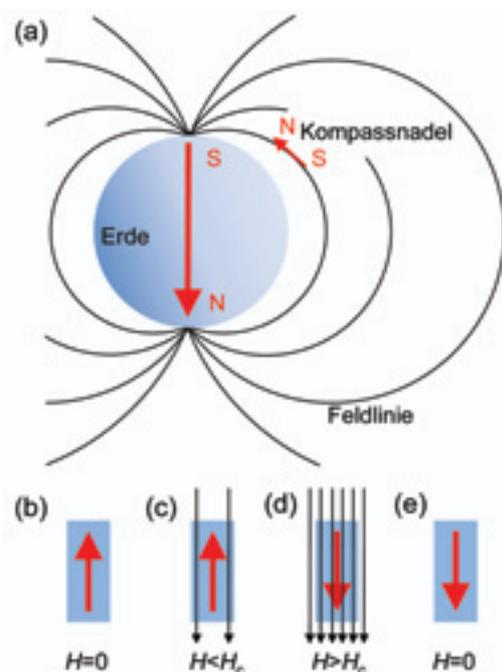
Heute spielen magnetische Strukturen nicht nur in der Sensorik, sondern in einer Vielzahl von Technikfeldern eine wichtige Rolle. Besonders hervorzuheben ist dabei die magnetische Datenspeicherung. Hier nutzt man die Richtung der Magnetisierung in einem Permanentmagneten als digitale Bits (Abb. 1 (b)–(e)). So entspricht Magnetisierung nach oben der digitalen Information 1, Magnetisierung nach unten der 0. Wenn man ein starkes externes Magnetfeld anlegt, lässt sich die Richtung der Magnetisierung kontrolliert verändern (Abb. 1 (d)), so dass Information in den Ferromagneten eingepreßt („geschrieben“) werden kann. Weil diese Magnetisierungsrichtung auch dann bestehen bleibt, wenn das externe Magnetfeld wieder abgeschaltet wird, kann im Ferromagneten tatsächlich Information gespeichert werden. Auslesen lässt sich diese Information anhand der entsprechenden magnetischen Streufelder, ganz ähnlich der Messung des Erdmagnetfelds mit einem Magnetkompass. Allerdings verwendet man zum Auslesen von modernen magnetischen Speichermedien

magneto-elektronische Sensoren, die die magnetische Information direkt in ein elektronisches Signal umwandeln.

Elektrische Kontrolle der Magnetisierungsrichtung

Interessanterweise ist der zur magneto-elektronischen Sensorik komplementäre Prozess, also die Umwandlung von elektronischen Steuersignalen in eine Magnetisierungs-Richtungsänderung, sehr viel schwieriger. Verschiedene Konzepte für eine solche elektrische Kontrolle der Magnetisierungsrichtung werden derzeit untersucht und auf ihre Anwendbarkeit in magnetischen Festkörperspeichern geprüft.¹ Im Rahmen unserer Experimente mit multifunktionalen magnetischen Hybridstrukturen konnten wir nun zeigen, dass sich die Magnetisierung in ferromagnetisch/piezoelektrischen² Schichtstrukturen elektrisch kontrolliert um bis zu 90° drehen lässt.

Unser Ansatz fußt einerseits darauf, dass sich die Ausdehnung von piezoelektrischen Materialien beim Anlegen eines elektrischen Felds verändert. Aufgrund der so genannten magneto-elastischen Kopplung beeinflusst eine solche mechanische Verformung andererseits aber die magnetischen Eigenschaften eines Ferromagneten. Verknüpft man beide Effekte in einer ferromagnetisch/piezoelektrischen Hybridstruktur, so sollte die Magnetisierungsrichtung von der am Piezoelektrikum



S. GOENNENWEIN/WIKI

anliegenden elektrischen Spannung abhängen. In Abb. 2 (a–c) ist dieses Konzept schematisch dargestellt: Auf eine multifunktionale Hybridstruktur, bestehend aus einem kommerziell erhältlichen piezoelektrischen Aktor, wurde eine dünne ferromagnetische Nickelschicht aufgebracht. Legt man eine negative Spannung $V_p < 0$ an den Piezoaktor an, zieht sich dieser entlang seiner langen Achse zusammen und dehnt sich gleichzeitig entlang der kurzen Achse aus (Abb. 2 (b)). Da der Ferromagnet in der Hybridstruktur fest auf dem Piezoaktor verankert ist, wird er ebenfalls verformt. Das macht eine Orientierung der Magnetisierung parallel zur langen Achse des Piezoaktors energetisch günstig. Die Magnetisierung zeigt also z. B. nach oben. Legt man hingegen eine positive Spannung $V_p > 0$ an (Abb. 2 (c)), wird die lange Achse des Aktors gedehnt, die kurze gestaucht, so dass die elliptische Verformung des Ferromagneten um 90° gedreht erscheint. Dementsprechend wird auch die Magnetisierungsrichtung gedreht, die Magnetisierung zeigt dann z. B. nach rechts.

Dass in einer ferromagnetisch/piezoelektrischen Hybridstruktur die Magnetisierungsrichtung tatsächlich durch das Anlegen eines elektrischen Feldes qualitativ verändert werden kann, zeigen die in Abb. 2 (d) dargestellten Messdaten. In diesem Experiment haben wir die Projektion M_{lang} des Magnetisierungsvektors auf die lange Achse des Piezoaktors als Funktion der elektrischen Spannung V_p aufgezeichnet. Zu Beginn der Messung, bei negativen V_p (s. Punkt A in Abb. 2 (d)), erhält man einen großen Wert für M_{lang} – das ist zu erwarten, da die Magnetisierung vor der Messung entlang der langen Achse ausgerichtet wurde. Erhöht man die Spannung am Piezoaktor dann auf immer positivere Werte, so nimmt M_{lang} stark ab (Punkt B). Die Magnetisierung dreht sich also von der langen Achse weg,

zur kurzen Achse hin, so dass die Projektion M_{lang} auf die lange Achse immer kleiner wird; bei Punkt B beträgt der Winkel zwischen Magnetisierung und langer Achse über 70° . Beim erneuten Anlegen von negativen Spannungen erholt sich M_{lang} wieder auf den ursprünglichen, großen Pegel, was beweist, dass die Magnetisierung tatsächlich nur ihre Orientierung ändert und nicht etwa zerfällt. Schließlich haben wir die magnetischen Eigenschaften der Hybridstruktur mit unabhängigen Messmethoden charakterisiert und basierend auf diesen Daten die Evolution der Magnetisierungsrichtung als Funktion von V_p berechnet. Das Ergebnis dieser Simulation ist in Abb. 2 (d) ebenfalls eingezeichnet und bestätigt unsere Interpretation. Damit ist die elektro-mechanische Kontrolle der Magnetisierungsrichtung bei Raumtemperatur gezeigt.³

Ausblick

Um das Potenzial und die Grenzen der elektro-mechanischen Kontrolle der Magnetisierungsrichtung in ferromagnetisch/ferroelektrischen Hybriden auszuloten, haben wir aus den Ferromagneten Nickel und Kobalt, aus Eisen-Kobalt-Legierungen, aus dem magnetischen Mineral Magnetit (Fe_3O_4) und aus dem magnetischen Halbleiter (Ga,Mn)As entsprechende Hybridstrukturen hergestellt und untersucht. Die gewonnenen Erkenntnisse wollen wir einerseits zur Realisierung eines hybriden ferromagnetisch/ferroelektrischen Festkörperspeichers einsetzen, entsprechende Experimente laufen bereits. Andererseits liefert die elektrische Kontrolle der Magnetisierungsrichtung auch neue Impulse für die Forschung an Ferromagnet/Supraleiter- und Ferromagnet/Halbleiter-Hybriden.

Für die hervorragende Unterstützung möchte ich mich bei R. Gross und M. S. Brandt bedanken. Mein

Dank gilt ferner allen, die zu den vorgestellten Ergebnissen beigetragen haben. Unsere Arbeiten zu multifunktionalen Materialien und Hybridstrukturen werden von der Deutschen Forschungsgemeinschaft im Rahmen der Schwerpunktprogramme 1157 und 1285 sowie im Rahmen der Exzellenzinitiative im Exzellenzcluster Nanosystems Initiative Munich gefördert.



Anmerkungen:

¹ S. S. P. Parkin, M. Hayashi, L. Thomas, Science 320, 190 (2008).

² In piezoelektrischen Materialien erzeugt mechanischer Druck elektrische Ladungen bzw. umgekehrt ein elektrisches Feld eine mechanische Verformung.

³ M. Weiler, A. Brandlmaier, S. Geprägs, M. Althammer, M. Opel, C. Bihler, H. Huebl, M. S. Brandt, R. Gross, S. T. B. Goennenwein, New Journal of Physics 11, 013021 (2009).

Der Autor ist wiss. Mitarbeiter am Walther-Meißner-Institut für Tieftemperaturforschung und leitet dort eine Nachwuchsgruppe.

Abb. 2 (a): Hybridstruktur aus einem ferroelektrischen Piezoaktor, auf den ein ferromagnetischer Nickelfilm aufgebracht ist. **(b), (c)** Elektro-mechanische Kontrolle der Magnetisierungsrichtung: Der Piezoaktor verformt sich beim Anlegen einer elektrischen Spannung V_p . Die damit einhergehende mechanische Verformung des Ferromagneten verändert die Magnetisierungsrichtung (roter Pfeil). **(d)** In einer Nickel/Piezoaktor-Hybridstruktur ändert sich die Komponente M_{lang} der Magnetisierung entlang der langen Achse des Piezoaktors (rote Kreise) als Funktion von V_p . Die Messdaten werden von einer Simulation der Magnetisierungsrichtung (schwarze Linie) gut wiedergegeben.

