

■ Interessant ist der Rand

Auf der Suche nach neuen Materialien für die Spintronik zeigt der so genannte Rashba-Effekt immer wieder neue Gesichter.

Die gewöhnliche Elektronik nutzt nur die elektrische Ladung der Elektronen. Doch Elektronen haben auch einen Spin, und es ist das Ziel der Spintronik, auch diesen Freiheitsgrad zu verwenden, um Bauelemente mit neuen Funktionen zu entwickeln. Während sich Ladungen mit elektrischen Feldern manipulieren lassen, koppelt der Spin an Magnetfelder, die sich aber in Nano-Bauelementen nicht effizient einsetzen lassen. Stattdessen favorisiert die Spintronik die Spin-Bahn-Kopplung. In quasi-zweidimensionalen (2D) Halbleiterstrukturen ohne Inversionssymmetrie bewirkt sie eine Aufspaltung der elektronischen Niveaus in Zustände mit umgekehrter Spinorientierung [1]; dabei bleibt das System insgesamt unmagnetisch (Abb. 1). Dieser Rashba-Effekt ist für diverse neuartige Spintronik-Konzepte von zentraler Bedeutung. Allerdings beträgt die Spinaufspaltung in gängigen Halbleitern nur wenige meV. Verglichen mit der thermischen Energie bei Raumtemperatur (ca. 25 meV) ist dies zu klein, um damit robuste und effiziente Bauelemente zu realisieren, es sei denn, das System wird zu sehr tiefen Temperaturen heruntergekühlt.

Vor einigen Jahren war es daher eine große Überraschung, dass auch verschiedene Metalloberflächen wie Gold(111) eine Spinaufspaltung aufweisen, die tatsächlich wesentlich größer ist als in Halbleitern (bis zu einigen hundert meV). Allerdings konkurrieren in Metallen die spinaufgespaltenen Oberflächenzustände mit den spinentarteten Volumenzuständen bei gleicher Energie, sodass sich derartige Systeme für Spintronik-Anwendungen nicht ohne weiteres eignen. Trotzdem haben diese Arbeiten gezeigt, dass es sich lohnt, auch außerhalb des althergebrachten Terrains den Rashba-Effekt zu untersuchen. Zwei jüngst erschienene Arbeiten zeigen auf unterschiedliche Weise,

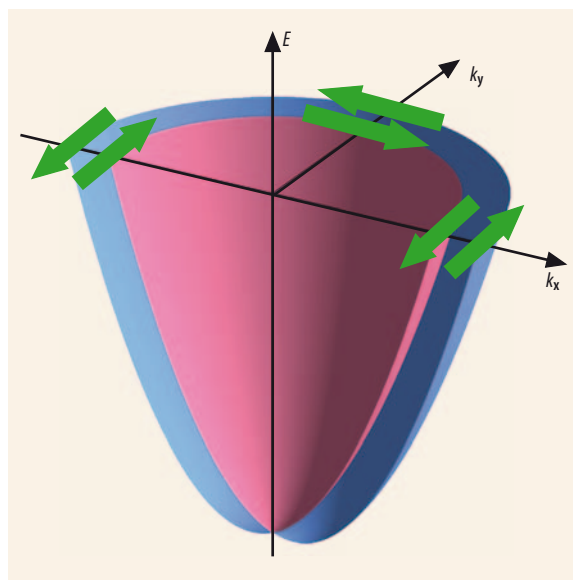


Abb. 1 Der Rashba-Effekt führt dazu, dass die Spinentartung der Dispersion $E(k_x, k_y)$ in unsymmetrischen zweidimensionalen Systemen aufgehoben wird. Auf einer Energiefläche sind die Spins der Zustände (dargestellt durch Pfeile) im Uhrzeigersinn orientiert, auf der anderen entgegen dem Uhrzeigersinn.

welche Fortschritte bei dieser Suche weiterhin möglich sind.

Philip King (University of St Andrews) und Mitarbeiter haben in einer europaweiten Zusammenarbeit gezeigt, dass der Halbleiter Bi_2Se_3 oberflächennahe Raumladungszonen ausbildet, die sich durch eine große Rashba-Aufspaltung von bis zu 180 meV auszeichnen [2]. Mit spin- und winkelaufgelöster Photoemissionsspektroskopie gelang es, die für den Rashba-Effekt typische spinaufgespaltene Dispersion (Abb. 1) direkt nachzuweisen. Frisch präparierte Bi_2Se_3 -Oberflächen bilden die Raumladungszonen in einer Vakuumkammer innerhalb einiger Stunden infolge der Wechselwirkung mit dem verbliebenen Restgas. Durch Zugabe von CO oder Ru ließ sich die Ausformung der Randschicht weiter beschleunigen und mittels Ausheizens sogar teilweise wieder umkehren.

Der interessante Aspekt dieser Arbeit liegt darin, dass die große Spinaufspaltung in der oberflächennahen Raumladungszone eines Halbleiters auftritt. Die größten Rashba-Aufspaltungen wurden bislang in 2D-Elektronensystemen beobachtet, die direkt an der Oberfläche lokalisiert sind. Derartige Systeme reagieren jedoch relativ empfindlich auf äußere Einflüsse.

Raumladungszonen, die sich nahe der Oberfläche tiefer ins Volumenmaterial erstrecken, lassen sich mit Deckschichten wesentlich besser schützen. Allerdings steckt bei dem vergleichsweise exotischen Halbleiter Bi_2Se_3 die Materialphysik noch in den Kinderschuhen. Gate-Kontakte zur elektrischen Manipulation einer vergrabenen Raumladungszone, wie sie bei gängigen Halbleitern Standard sind, sind langfristig sicher die aussichtsreichste Methode, um die Rashba-Aufspaltung im Bi_2Se_3 gezielt und vollständig reversibel zu verändern.

Die Arbeit von Ishizaka (Universität Tokyo) und Mitarbeitern beleuchtet einen ganz anderen Aspekt des Rashba-Effekts [3]. Auch diese Wissenschaftler beobachten mithilfe von spin- und winkelaufgelöster Photoemissionsspektroskopie, dass eine halbleitende Bismut-Verbindung, hier BiTeI , einen großen Rashba-Effekt von etwa 100 meV aufweist. Die Autoren ordnen in diesem System die Spinaufspaltung jedoch der Volumenbandstruktur zu. Tatsächlich beschränkt sich der Rashba-Effekt nicht auf quasi-2D-Systeme. Vielmehr war dieser Effekt ursprünglich vom russischen Physiker Emmanuel Rashba für Volumenhalbleiter mit Wurtzit-Struktur vorhergesagt worden [4] (analog

Prof. Dr. Roland Winkler, Department of Physics, Northern Illinois University, De Kalb, IL 60115, USA, zur Zeit: University of the Basque Country und IKERBASQUE, Basque Foundation for Science; Dr. Christian Ast, MPI für Festkörperforschung, Heisenbergstraße 1, 70569 Stuttgart

dem Dresselhaus-Effekt in Halbleitern mit Zinkblende-Struktur). Die Kristallstruktur von BiTeI ist dem Wurtzit so ähnlich, dass das Volumenmaterial gleichfalls den Rashba-Effekt zeigt, wie die Autoren mit relativistischen ab-initio-Rechnungen zur Bandstruktur bestätigen konnten. Im Gegensatz hierzu ist die Kristallstruktur von Bi₂Se₃ inversionssymmetrisch, so dass hier Volumeneffekte bei der Spinaufspaltung keine Rolle spielen. Allerdings bilden sich auch in den BiTeI-Proben nahe der Oberfläche Raumladungszonen aus. Somit können im BiTeI tatsächlich zwei unabhängige Mechanismen in den oberflächensensitiven Photoemissionsspektren zum beobachteten Rashba-Effekt beitragen. Weitere Untersuchungen müssen klären, welche Anteile der gemessenen Aufspaltung sich dem intrinsischen Volumeneffekt bzw. den Raumladungszonen zuschreiben lassen.

Seit etlichen Jahren werden die mikroskopischen Ursachen des Rashba-Effekts intensiv diskutiert. Ein vereinfachtes Bild suggeriert, dass ein symmetriebrechendes (effektives) elektrisches Feld den Rashba-Effekt hervorruft. Dem Feld entspricht im Ruhesystem der Bloch-Elektronen ein effektives Magnetfeld, sodass man die Rashba-Aufspaltung als Zeeman-Effekt interpretieren könnte. Für ein System im Gleichgewicht verschwindet allerdings der Erwartungswert des elektrischen Feldes,

da das Feld dann selbst in einem stark asymmetrischen System keine Kraft ausüben kann. (Gäbe es eine Kraft, würde das System wie in der klassischen Mechanik versuchen, diese Kraft auszugleichen, bis sich ein neues Gleichgewicht einstellt.) Darüber hinaus sind typische Zahlenwerte für elektrische Felder und Fermi-Geschwindigkeiten um Größenordnungen zu klein, als dass ein solches Bild den Rashba-Effekt zufriedenstellend erklären könnte. Tatsächlich ist die Ursache ein Zusammenspiel von gebrochener Inversionssymmetrie, atomarer Spin-Bahn-Wechselwirkung und ausgedehnter Dynamik der Bloch-Elektronen im Kristall, welches wir bei diesen unkonventionellen Materialien bisher nur ansatzweise verstehen. Die atomare Spin-Bahn-Wechselwirkung spielt dabei als „Vermittler“ zwischen räumlicher Bewegung und Spindynamik des Elektrons eine zentrale Rolle. Wichtig ist demnach ein steiles Coulomb-Potential des Atomkerns, sodass neuartige Materialien mit schweren Atomen wie Bi für die Spintronik in eine vielversprechende Richtung weisen.

Roland Winkler und Christian Ast

- [1] Y. A. Bychkov und E. I. Rashba, JETP Letters **39**, 78 (1984)
- [2] P. D. C. King et al., Phys. Rev. Lett. **107**, 096802 (2011)
- [3] K. Ishizaka et al., Nature Mat. **10**, 521 (2011)
- [4] E. I. Rashba, Sov. Phys. – Solid State **2**, 1109 (1960)

KURZGEFASST

■ Silizium zeigt Riesenmagnetowiderstand

Chinesische Physiker haben gezeigt, dass der Widerstand des unmagnetischen Halbleiters Silizium fast so empfindlich vom Magnetfeld abhängen kann, wie es bei Materialien mit Riesenmagnetowiderstand der Fall ist. Dafür war eine besondere Ladungsinhomogenität in n-dotierten Silizium-Streifen nötig. Bei Änderung des Magnetfelds um 0,5 Tesla wuchs der gemessene Widerstand um das Zehnfache, bei 7 Tesla Änderung sogar um das 15 000-fache. Grund dafür ist vermutlich, dass die entstandene p-n-Grenzschicht auf die Elektronen wie eine Ansammlung von magnetischen Streuzentren wirkt. C.-H. Wan et al., Nature **407**, 304 (2011)

■ Rabi-Modell analytisch gelöst

Das Rabi-Modell beschreibt die Kopplung eines Zwei-Niveau-Systems mit einem klassischen Feld. In seiner quantenmechanischen Form ist es grundlegend, um Prozesse der Hohlraum-Quantenelektrodynamik, Atomphysik oder supraleitender Qubits zu beschreiben. Nun ist es Daniel Braak (Universität Augsburg) erstmals gelungen, dieses Modell analytisch zu lösen. Dies könnte von großer Bedeutung sein, um Systeme zu beschreiben, bei denen die Kopplungsstärke in der Größenordnung der relevanten Frequenzen der Teilsysteme liegen, sodass gängige Näherungen nicht mehr gelten. D. Braak, Phys. Rev. Lett. **107**, 100401 (2011)