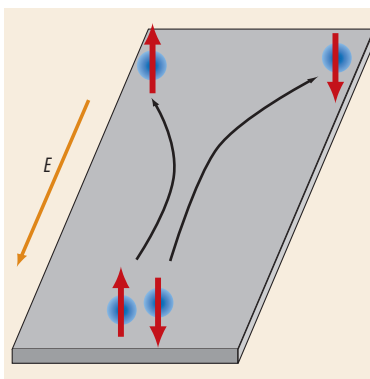


■ Spins auf dem Vormarsch

Erstmals konnte der Spin-Hall-Effekt bei Raumtemperatur nachgewiesen werden.

Bekanntlich tragen Elektronen nicht nur eine elektrische Ladung, sondern auch einen Spin. Der Spinfreiheitsgrad eröffnet neue Möglichkeiten für „spintronische“ Bauelemente, die sich schneller und energiesparender schalten lassen. In metallischen Bauelementen werden spinpolarisierte Ströme seit einigen Jahren ausgenutzt, z. B. in Magnetfeldsensoren, welche auf dem so genannten Riesenmagnetowiderstand in magnetischen Schichtsystemen beruhen.

Warum aber wird in den allgegenwärtigen Halbleiterbauelementen der Spin vernachlässigt? Wären Halbleiter wegen ihrer Dotierbarkeit und ihrer Eignung für optoelektronische Bauelemente nicht vorteilhafter als Metalle? Als Problem stellt sich hier jedoch die aktive Kontrolle über die Elektronenspins heraus: Wie polarisiert man die Spins von Leitungselektronen in Halbleitern? Eine effiziente Lösung dieses Problems würde die Tür zu neuartigen Spintronik-Bauelementen öffnen. Gängige Methoden beruhen auf der optischen und der elektrischen Spin-Injektion. Die optische Spin-Injektion nutzt aus, dass zirkular polarisierte Photonen den Drehimpuls $+\hbar$ beziehungsweise $-\hbar$



Beim extrinsischen Spin-Hall-Effekt werden Elektronen mit unterschiedlicher Spinpolarisation asymmetrisch gestreut. Das führt zu einem Spin-Ungleichgewicht senkrecht zur Elektronendrift und damit zu einer Spinpolarisation an den Probenrändern.

tragen, sodass bei der Absorption eines Photons nur Elektronen mit einer definierten Spinrichtung vom Valenzband ins Leitungsband angeregt werden. Bei der elektrischen Spin-Injektion werden spinpolarisierte Elektronen einer magnetischen Schicht in eine benachbarte nicht-magnetische Schicht injiziert. Auf diesem Weg lassen sich in Halbleitern Polarisationsgrade von bis zu 30 % erzielen.¹⁾

Alternativ kann man Spins auch direkt durch elektrische Felder manipulieren. Elektrische Felder lassen sich technisch mittlerweile so gut beherrschen, dass diese

Methode das Potenzial hat, Spins auf der Nanometerskala zu kontrollieren.

Vor diesem Hintergrund wird gegenwärtig der schon vor mehr als 30 Jahren postulierte Spin-Hall-Effekt intensiv erforscht. Wie beim gewöhnlichen Hall-Effekt verursacht eine an die Probe angelegte Spannung nicht nur einen Transportstrom in Feldrichtung, sondern senkrecht dazu auch einen Spin-Strom, der gegeben ist durch $j_s = \sigma_{SH}E$. Dabei ist σ_{SH} die Spin-Hall-Leitfähigkeit und E die elektrische Feldstärke. Im Gegensatz zum Hall-Effekt benötigt man hier aber kein externes Magnetfeld, sondern nutzt die Spin-Bahn-Streuung der Elektronen aus. Der Spin-Hall-Strom ist ein reiner Spinstrom, d. h. es fließt Spin, aber keine Ladung. Theoretiker unterscheiden zwei Mechanismen, den intrinsischen und den extrinsischen Effekt. Letzterer beruht auf der spinabhängigen Streuung von Elektronen an Defekten („skew scattering“, Abb.), der intrinsische Effekt nutzt die Dynamik der Bloch-Elektronen in einem Spin-Bahn-gekoppelten System und kommt somit ohne Defekte aus.

Bisher kann man Spinströme nicht direkt experimentell nachweisen. Man erwartet aber, dass sich

¹⁾ s. R. Winkler und M. Oestreich, Physik Journal, November 2004, S. 39

■ Die dunkle Seite des Saturn

Eine Sonnenfinsternis der etwas anderen Art hat die Planetensonde Cassini beobachtet, als sie für zwölf Stunden im Schatten des Planeten Saturn verschwand. Dieses atemberaubende, farbverstärkte Foto wurde aus insgesamt 165 Aufnahmen der Weitwinkelkamera von Cassini erstellt. Das Licht auf der Planetenscheibe wird von den Ringen dorthin

reflektiert. Außen ist der sog. E-Ring zu erkennen, weiter innen der schmale G-Ring. Aufgrund der günstigen Konstellation gelang es, weitere diffuse und bislang unbekannte Ringbestandteile abzulichten. Und wer genau hinsieht, kann links oberhalb des hellen Ringbereichs auch die Erde entdecken.



NASA/JPL/Space Institute

aufgrund der Spinströme Spins an den Rändern der Proben ansammeln, welche sich mit optischen Methoden wie der Kerr-Rotations-Mikroskopie sichtbar machen lassen. Die Spins an gegenüberliegenden Rändern haben hierbei entgegengesetzte Polarisation, und der Polarisationsgrad ist proportional zur Spannung. Vor etwa zwei Jahren gelang es der Gruppe von D. Awschalom von der University of California in Santa Barbara erstmals, in einem GaAs-System bei Kryostat-Temperaturen ($T = 30$ K) eine solche spannungsabhängige Spinanhäufung an den Probenrändern nachzuweisen [1]. Vieles spricht für den extrinsischen Spin-Hall-Effekt als Ursache. Andererseits könnte die Spinpolarisation auch nur ein Randeffect sein, verursacht durch eine lokale Modifikation der Bandstruktur. Diese Erklärung konnte jedoch in einer vor kurzem publizierten Arbeit [2] durch eine geschickte Wahl der Probengeometrie ausgeschlossen werden.

In einem weiteren Experiment der Awschalom-Gruppe [3] wurde nun der III-V-Halbleiter GaAs durch den II-VI-Halbleiter ZnSe ersetzt. Zum Nachweis des Spin-Hall-Effekts diente ein Kerr-Rotations-Mikroskop mit einer räumlichen Auflösung von ca. $1 \mu\text{m}$, womit ein Profil der Spinpolarisation über den vollen Querschnitt der etwa $100 \mu\text{m}$ breiten Proben erstellt wurde. Bei $T = 20$ K und einer Elektronendichte von $10^{17}/\mu\text{m}^3$ wurde eine Spinpolarisation von bis zu $16 \text{ Spins}/\mu\text{m}^3$ beobachtet, was einer Spin-Hall-Leitfähigkeit von etwa $\sigma_{\text{SH}} \approx 3 |e|/\Omega\text{m}$ entspricht.

Der Effekt ist im Vergleich zu GaAs – hier erreicht man mittels Spin-Hall-Effekt bis zu 1 % Spinpolarisation [4] – relativ klein. Andererseits bestehen in ZnSe wegen der großen Bandlücke und der langen Spinkohärenzzeit viele Spin-Effekte bei höheren Temperaturen als in GaAs. In ZnSe gelang es nun, den Spin-Hall-Effekt erstmals bei Raumtemperatur nachzuweisen,

mit einer Spin-Hall-Leitfähigkeit von etwa $\sigma_{\text{SH}} \approx 0,5 |e|/\Omega\text{m}$.

Die Experimente zeigen, dass auf rein elektronischem Weg eine Spinakkumulation bei Raumtemperatur erzeugt werden kann. Die kalifornischen Physiker sind optimistisch, dass auch eine spinbasierte Logik in Halbleiterbauelementen technologisch machbar sein könnte. Wird die Halbleiter-Spintronik ein eher grundlagenorientiertes Forschungsgebiet bleiben oder wird sie ihren Weg in kommerzielle Anwendungen finden, und wo werden die Einsatzgebiete liegen? Auf diese Fragen erhoffen wir Antworten vom neuen DFG-Schwerpunktprogramm „Halbleiter-Spintronik“.

Peter Schwab

Priv.-Doz. Dr. Peter Schwab, Institut für Physik, Universität Augsburg, 86135 Augsburg

- [1] Y. K. Kato et al., *Science* **306**, 1910 (2004)
- [2] V. Sih et al., *Phys. Rev. Lett.* **97**, 096605 (2006)
- [3] N. P. Stern et al., *Phys. Rev. Lett.* **97**, 126603 (2006)
- [4] J. Wunderlich et al., *Phys. Rev. Lett.* **94**, 047204 (2005); K. Nomura et al., *Phys. Rev. B* **72**, 245330 (2005)