

Spinelektronik

Das Potenzial des Elektronenspins in der Halbleiterelektronik

Roland Winkler und Michael Oestreich

Elektronen besitzen nicht nur eine elektrische Ladung, sondern auch einen Spin. Die Nutzung dieses in der Halbleiterelektronik bisher vernachlässigten Freiheitsgrades könnte den nächsten Entwicklungsschritt in der Welt der Elektronik bedeuten und das Zeitalter der Spinelektronik, genannt *Spintronik*, einläuten. Was sind die grundlegenden Prinzipien dieser neuartigen Elektronik, welche Vorteile verspricht sie gegenüber den herkömmlichen Methoden, welche Fortschritte haben wir bereits gemacht und welche physikalischen Probleme müssen noch gelöst werden?

Halbleiterbauelemente haben unsere Welt verändert. Computerprozessoren und Halbleiterlaser sind nur zwei Beispiele für die rasante Entwicklung der modernen Elektronik, die unser heutiges Leben prägt. Die Entwicklung begann 1947 mit der Entdeckung des Germaniumtransistors und basiert seither einzig auf der Kontrolle der elektrischen Ladung in immer raffinierteren Bauelementen. In der Elektronik außerhalb der Halbleiterwelt wird auch der Spin schon lange verwendet. Der Spin der Elektronen ist verantwortlich für den Ferromagnetismus in Festkörpern, der beispielsweise der Datenspeicherung in Computerfestplatten zugrunde liegt. Die Nutzung spinpolarisierter Ströme in der Elektronik ist hingegen vergleichsweise neu [1–4]. Angeregt durch Arbeiten von Grünberg et al. entdeckten Fert und Mitarbeiter im Jahr 1988 in mehrlagigen, magnetischen Metallschichten den Riesenmagnetowiderstand (GMR), eine starke Änderung des elektrischen Widerstandes als Funktion eines äußeren Magnetfeldes, die auf der spinabhängigen Streuung der Leitungselektronen beruht [5]. Fert und Mitarbeiter legten damit den Grundstein für die Magnetoelektronik, welche spinabhängige elektrische Ströme in metallischen Bauelementen nutzt. Bereits kurz nach der Entdeckung des GMR wurden magnetoelektronische Bauelemente wie zum Beispiel Magnetfeldsensoren, Leseköpfe für Computerfestplatten und magnetische Speicherbausteine (MRAMs) entwickelt, die diesen Effekt ausnutzen. Diese metallischen Bauelemente haben sich auf einigen Gebieten zu einer echten Herausforderung für die herkömmliche Halbleiterelektronik entwickelt. So sind die bisher gebräuchlichen Halbleiterspeicher (DRAMs) flüchtige Speicher, deren Inhalt während des Betriebs regelmäßig aufgefrischt werden muss. In den neuen MRAM-Speichern wird ausgenutzt, dass verschiedene

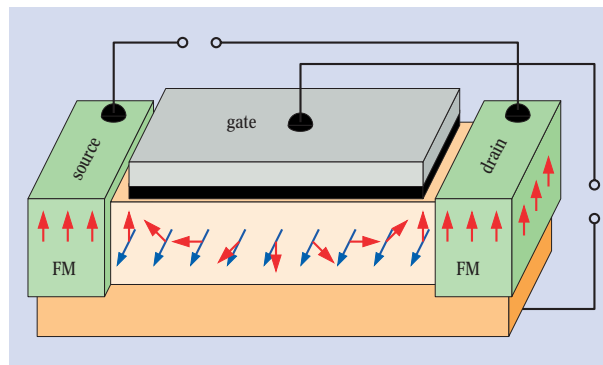


Abb. 1:

Beim Spintransistor nach Data und Das [8] injiziert der linke Kontakt (FM) spinpolarisierte Elektronen (rote Pfeile) in einen Halbleiterkanal, in dem sie zum gleichfalls spinselektiven rechten Kontakt wandern. Eine Spannung senkrecht zur Transportrichtung führt zu einer Spin-Bahn-Kopplung, die einem effektiven Magnetfeld (blaue Pfeile) senkrecht zur Transportrichtung und senkrecht zum elektrischen Feld entspricht. Darin präzedieren die spinpolarisierten Elektronen. Nur wenn die Spins der Ladungsträger bei Ankunft am rechten Kontakt parallel zu den Spins im Kontakt orientiert sind, können die Elektronen den Halbleiter verlassen, und durch den Transistor fließt ein Strom.

Metalle bei Raumtemperatur ferromagnetisch sind, sie also eine spontane Spinausrichtung aufweisen, die ohne Zuführung von elektrischer Energie erhalten bleibt [6]. Deshalb bieten die spinbasierten MRAM-Speicher den großen Vorteil, dass die Informationen auch nach dem Ausschalten des Geräts dauerhaft gespeichert bleiben. In Kürze werden diese Bauteile erstmals serienmäßig hergestellt werden. Mit den etablierten DRAMs konkurrieren sie langfristig um den jährlich 100 Milliarden Dollar starken Markt für Computerspeicher.

Die metallischen Bauelemente der Magnetoelektronik besitzen jedoch auch entscheidende Nachteile gegenüber den in der heutigen Elektronik allgegenwärtigen Halbleitern. In Metallen lässt sich die Ladungsträgerdichte nicht wie in Halbleitern kontinuierlich verändern. Zudem haben Metalle keine Bandlücke, weshalb sie für viele elektronische und alle optoelektronischen Bauelemente ungeeignet sind. Doch wie in Metallen besitzen natürlich auch die Elektronen in Halbleitern einen Spin. Deshalb wird in jüngster Zeit mit großer Intensität untersucht, wie sich der Spinfreiheitsgrad auch dort ausnutzen lässt. Beim spinabhängigen Transport lassen sich beispielsweise einige Konzepte der Magnetoelektronik direkt auf die Halbleiter übertragen. Daneben beschreitet die Halbleiter-Spintronik auch

Priv.-Doz. Dr. Roland Winkler und Prof. Dr. Michael Oestreich, Institut für Festkörperphysik, Universität Hannover, Appelstr. 2, 30167 Hannover.

eigene Wege, welche die Besonderheiten der Halbleiter ausnutzen. Beispielsweise kann in Halbleitern die Spinorientierung aktiv geregelt werden [7], was die Grundlage für einen Transistor darstellt. Datta und Das haben bereits 1990 einen Spintransistor skizziert, bei dem die Gate-Spannung die Spin-Bahn-Wechselwirkung ändert, welche dann den Durchfluss spinpolarisierter Ladungsträger regelt (Abb. 1) [8]. Ein weiteres Beispiel sind Halbleiterlaser, bei denen die Laserintensität und die Polarisation der Emission durch die Spinorientierung gesteuert werden kann, ohne dass die Ladungsträgerdichte geändert werden braucht [9].

Häufig wird die Spintronik in einem Atemzug mit der *Quanteninformationsverarbeitung* genannt. Diese beiden nah verwandten Forschungsgebiete haben sich in jüngster Zeit fruchtbar ergänzt und gegenseitig wichtige Anregungen geliefert [2]. Die Quanteninformationsverarbeitung verwendet verschränkte quantenmechanische Zustände, um neue Rechner-Architekturen und eine abhörsichere Quantenkommunikation zu entwickeln [2, 10]. Gekoppelte Spin-1/2-Systeme sind eine von mehreren möglichen Realisierungen eines Quantencomputers. Im Grenzgebiet zwischen Spintronik und Quanteninformationsverarbeitung wird intensiv untersucht, wie sich Quantencomputer beispielsweise mithilfe gekoppelter Halbleiter-Quantenpunkte realisieren lassen. Doch die Spintronik befasst sich auch mit anderen Anwendungsmöglichkeiten des Spinfreiheitsgrads in Halbleiter-Bauelementen. Etliche Spintronik-Bauelemente, die in den letzten Jahren diskutiert worden sind, benutzen ein Ensemble gleichartiger Spins (vgl. den Spin-Transistor in Abb. 1).

Auf dem Weg zur Halbleiter-Spintronik konzentriert sich die aktuelle Forschung auf die Schwerpunkte Spin-Injektion, Transport und Speicherung der spinpolarisierten Ladungsträger sowie Spinmanipulation [1–3]. Gerade beim Datta-Spintransistor (Abb. 1) lassen sich diese Punkte modellhaft studieren.

1) In einem Tight-Binding-Bild sind die Valenzband-Zustände der gängigen Halbleiter aus p-artigen Atomorbitalen aufgebaut. Mit dem Spin ergibt sich dann ein Gesamtdrehimpuls $3/2$ [7].

Spin-Injektion

Ein erster, wichtiger Schritt, um Spintronik-Bauelemente zu realisieren, ist die Spin-Injektion, also das Einbringen spinpolarisierter Elektronen in den Halbleiter. Sie übernimmt die Rolle der Stromquelle in der gewöhnlichen Elektronik. Dabei bezeichnet Spinpolarisation das Verhältnis zwischen dem Überschuss von Elektronen einer Spinorientierung zur Gesamtzahl der Elektronen. Es gibt mehrere Möglichkeiten, die spinpolarisierten Elektronen in den Halbleiter zu injizieren: Zum einen bewirkt die optische Anregung eines Halbleiters mit polarisiertem Licht unter bestimmten Voraussetzungen, dass sich im Halbleiter vornehmlich Elektron-Loch-Paare mit nur einer Spinorientierung bilden (optische Spin-Injektion). Eine andere Vorgehensweise, die elektrische Spin-Injektion, verwendet magnetische Schichten, um spinpolarisierte Elektronen zu erzeugen, die dann in einen – normalerweise unmagnetischen – Halbleiter eindringen können.

Die optische Spin-Injektion [9, 11] nutzt aus, dass rechts- beziehungsweise linkszirkular polarisierte Photonen einen Drehimpuls $+1$ beziehungsweise -1 tragen. Bei der Absorption eines Photons im Halbleiter wird ein Elektron aus dem Valenzband in das Leitungsband angehoben, wobei der Drehimpuls des Photons auf das Elektron übertragen wird. Die Elektronen im Leitungsband eines Halbleiters verhalten sich wie freie Elektronen mit dem Spin $1/2$. Die Elektronen im obersten Valenzband können wir uns dagegen als Teilchen mit dem Drehimpuls $3/2$ vorstellen.¹⁾ Nur solche Übergänge sind möglich, bei denen das Elektron tatsächlich den Drehimpuls des Photons aufnehmen kann, wobei die verschiedenen erlaubten Übergänge allerdings unterschiedliche Anregungswahrscheinlichkeiten besitzen (Abb. 2). Die optische Anregung mit zirkular polarisierten Photonen erzeugt deshalb eine Ungleichverteilung im Leitungsband. Die optische Spin-Injektion eignet sich vor allem für Grundlagenexperimente, da sie keine

Spin und Spin-Bahn-Wechselwirkung

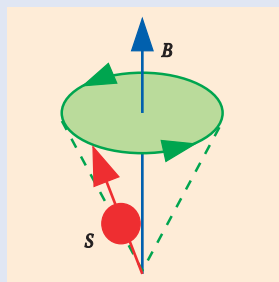
Neben den drei Freiheitsgraden für die räumliche Bewegung besitzen Elektronen einen zusätzlichen Freiheitsgrad, den Spin, dessen Existenz sich nur im Rahmen einer quantenmechanischen Betrachtung begründen lässt. Es handelt sich hier um einen inneren Drehimpuls, der anschaulich betrachtet dadurch gekennzeichnet ist, dass er entlang der Drehachse nur die Werte $\pm \hbar/2$ („Spin up“ und „Spin down“) annehmen kann. Dabei kann die Drehachse im Raum beliebig orientiert sein. Das Symbol \hbar bezeichnet das Plancksche Wirkungsquantum. Es ist die natürliche Einheit zur Beschreibung quantenmechanischer Drehimpulse. Im Folgenden setzen wir $\hbar=1$.

Mit jedem Drehimpuls geht ein magnetisches Moment einher. Deshalb präzediert der Spin S in einem

Magnetfeld B gemäß (Abb.)

$$\dot{S} = \gamma S \times B,$$

wobei die Konstante γ das gyromagnetische Verhältnis



Bei der Spinpräzession bewegt sich der Spinvektor S (roter Pfeil) auf einem Kegel (grün) um den Vektor des Magnetfeldes B (blauer Pfeil).

bezeichnet. In einer quantenmechanischen Betrachtung beschreibt diese Gleichung die Zeitentwicklung des Erwartungswertes des Spinoperators in Gegenwart des Magnetfeldes B .

Bei einem freien Elektron ist der Spin von den räumlichen Freiheitsgraden vollständig losgelöst. In Atomen und Festkörpern gibt es allerdings eine Spin-Bahn-Wechselwirkung, die den Spin an die räumliche Bewegung ankoppelt [7]. Die Spin-Bahn-Wechselwirkung ergibt sich aus der relativistischen Schrödinger-Gleichung (Dirac-Gleichung) für die Bewegung der Spin-behafteten Elektronen im Coulomb-Feld der Atomkerne. Entsprechend ist die Spin-Bahn-Wechselwirkung in Atomen und Festkörpern um so stärker, je größer die Ordnungszahl der beteiligten Atome ist. Die Spin-Bahn-Wechselwirkung entspricht einem effektiven Magnetfeld, in dem der Spin präzediert.

Im Festkörper macht sich die Spin-Bahn-Wechselwirkung vornehmlich auf drei Weisen bemerkbar

[7]: Zum einen verursacht die Spin-Bahn-Kopplung zusätzliche Aufspaltungen in der elektronischen Bandstruktur. In Ge oder GaAs bewirkt sie beispielsweise eine Aufspaltung des obersten Valenzbandes. Daneben beeinflusst sie auch die Zeeman-Aufspaltung der Spin-Niveaus in einem äußeren Magnetfeld, die durch den so genannten g -Faktor charakterisiert wird. Aufgrund der Spin-Bahn-Kopplung besitzen Elektronen im Festkörper effektive g -Faktoren, deren Werte sich vom g -Faktor 2 für freie Elektronen deutlich unterscheiden. Schließlich führt die Spin-Bahn-Wechselwirkung in Festkörpern mit einer gebrochenen räumlichen Inversionssymmetrie dazu, dass die zweifache Spinentartung der elektronischen Zustände bereits ohne ein äußeres Magnetfeld aufgehoben wird.

aufwändige Strukturierung der Proben erfordert. Andererseits benötigt man eine Lichtquelle, sodass sie für elektrische Bauelemente weniger geeignet erscheint.

Die elektrische Spin-Injektion [12] verfolgt das Ziel, die spinpolarisierten Elektronen einer magnetischen Schicht durch das Anlegen einer elektrischen Spannung in eine benachbarte Schicht aus einem unmagnetischen Halbleiter zu transferieren. Am naheliegendsten erscheint es, ferromagnetische Kontakte zu verwenden, also Substanzen, bei denen die Spins eine permanente Vorzugsrichtung besitzen. Die meisten Materialien, die

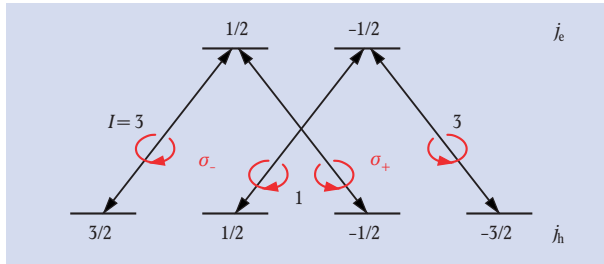


Abb. 2: Elektronen im Leitungsband und Löcher im Valenzband besitzen den Gesamtdrehimpuls $j=1/2$ beziehungsweise $j=3/2$. Bei einer optischen Anregung mit rechtszirkular polarisiertem Licht (σ_+) erhöht sich die z -Komponente des Drehimpulses um 1, bei linkszirkular polarisiertem Licht (σ_-) erniedrigt sie sich um 1. Die verschiedenen, jeweils erlaubten Übergänge besitzen unterschiedliche relative Übergangswahrscheinlichkeiten I , sodass zirkular polarisiertes Licht spinpolarisierte Elektronen im Leitungsband erzeugt. In Halbleiter-Quantenstrukturen können die Löcher mit Spin- z -Komponente $\pm 3/2$ von den Löchern mit z -Komponente $\pm 1/2$ energetisch getrennt werden. Mit Licht der passenden Wellenlänge lassen sich dann sogar Polarisationsgrade von nahezu 100 % erreichen.

hierfür zur Verfügung stehen, sind Metalle oder Halbleitermetalle. Allerdings waren vielfältige Anstrengungen bei der Entwicklung metallischer ferromagnetischer Kontakte lange Zeit erfolglos. Die Ursache hierfür liegt vor allem in der deutlich unterschiedlichen Leitfähigkeit von dem Halbleiter und dem Metall [2]. Mehrere Gruppen haben inzwischen gezeigt, dass Tunnelkontakte diese Fehlanpassung in effizienter Weise überbrücken können [2]: Bei Tunnelkontakten ist der injizierte Strom proportional zu den Zustandsdichten der Materialien auf beiden Seiten der Grenzfläche, sodass die unterschiedlichen Zustandsdichten für Spin-up- und Spin-down-Elektronen in ferromagnetischen Metallen einen spinpolarisierten Tunnelstrom vom Metall in den Halbleiter hervorrufen. Mehrere Forschergruppen haben inzwischen den experimentellen Nachweis erbracht, dass Fe-Kontakte eine elektrische Spin-Injektion in GaAs ermöglichen. Der Polarisationsgrad der elektrischen Spin-Injektion aus Metallen liegt bei bis zu 30 % und hängt bis hinauf zu Raumtemperatur nur schwach von der Temperatur ab [12].

Magnetische Halbleiter sind eine interessante Alternative, um die Fehlanpassung zwischen den Schichten zu vermeiden. Bereits seit vielen Jahren kennt man ferromagnetische Halbleiter wie Europium-Chalkogenide und halbleitende Spinelle. Diese ungewöhnlichen Materialien sind allerdings schwierig zu handhaben. Ihre technologische Nutzung scheint daher momentan unwahrscheinlich. Eine faszinierende Alternative bietet die Dotierung des Halbleiters mit magnetischen Störstellen wie beispielsweise Mn. Bei Mn-Ionen besteht eine starke Austauschwechselwirkung zwischen den lokalisierten d-Elektronen und den delokalisierten

Elektronen im Leitungs- und Valenzband, die bewirkt, dass Mn-haltige Halbleiter ausgeprägte magnetische Eigenschaften aufweisen: Werden Mn-Atome in II-VI-Halbleiter wie CdTe eingebaut, so tritt ein starker Paramagnetismus auf, das heißt, schon ein schwaches äußeres Magnetfeld ist in der Lage, die Spins der Leitungselektronen vollständig auszurichten [4].

Paramagnetische, Mn-dotierte Halbleiter haben sich bewährt, um grundlegende Fragen der elektrischen Spin-Injektion zu untersuchen. Sie erfordern allerdings ein äußeres Magnetfeld, was für die angestrebte Verwendung in integrierten Bauelementen ein großes Hindernis darstellt. Darüberhinaus wird der Paramagnetismus bei Raumtemperatur von der thermischen Bewegung der Elektronen überdeckt. Ein wesentlicher Durchbruch gelang hier 1996 mit der Entdeckung, dass GaAs bei starker Mn-Dotierung ferromagnetisch wird [2, 4]. Dies ist besonders interessant, da der Halbleiter GaAs schon seit längerer Zeit kommerziell eingesetzt wird, beispielsweise in HEMT-Transistoren in Handys und Laserdioden in CD-Spielern. Allerdings verschwindet der Ferromagnetismus in GaMnAs-Legierungen oberhalb von ca. 110 – 150 K. Intensive Untersuchungen widmen sich nun der Frage, wie sich diese kritische Temperatur, die so genannte Curie-Temperatur, erhöhen lässt. Beispielsweise zeigen GaMn-Mikrocluster, die bei geeigneten Bedingungen in GaAs epitaktisch wachsen, eine Curie-Temperatur von ca. 310 K. Daneben offenbaren inzwischen auch etliche weitere Halbleiter Ferromagnetismus, darunter CdMnGeP, CrAs, TiO₂, ZnCoO und CrSb. Einige dieser Substanzen sind sogar bei Raumtemperatur ferromagnetisch.

Mehrere Experimente haben inzwischen gezeigt, dass sich mit magnetischen Schichten eine effiziente elektrische Spin-Injektion realisieren lässt. Dazu wurde eine dünne Schicht des magnetischen Materials auf das nicht magnetische Material aufgebracht, sodass die

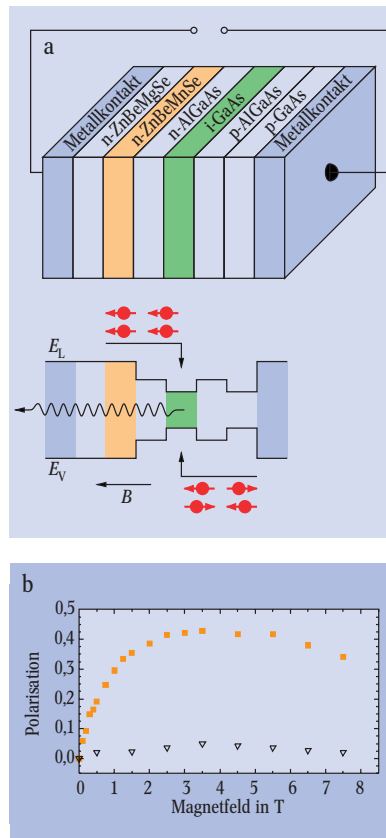


Abb. 3: **a)** Schichtenfolge einer GaAs-AlGaAs-Leuchtdiode (grün) mit einem Mn-dotierten Kontakt (orange) zur Spin-Ausrichtung. Der untere Teil zeigt die ortsabhängige Leitungsbandkante (E_L) und die Valenzbandkante (E_V) der Struktur. Getrieben durch ein elektrisches Feld bewegen sich die spinpolarisierten Elektronen (rot) von der ZnBeMnSe-Schicht in die unmagnetischen Halbleiter AlGaAs und GaAs. Diese Schichten bilden eine Leuchtdiode, die entsprechend der Spinorientierung der Elektronen zirkular polarisiertes Licht emittiert. **b)** Polarisationsgrad des aus der Leuchtdiode emittierten Lichts als Funktion des äußeren Magnetfeldes B . Die Quadrate zeigen die Messergebnisse für eine Probe mit einer paramagnetischen ZnBeMnSe-Schicht. Die Dreiecke zeigen das Ergebnis einer Vergleichsmessung an einer Probe, die lediglich eine unmagnetische ZnBeMgSe-Schicht enthält (nach [13]).

spinpolarisierten Ladungsträger von der magnetischen in die nicht magnetische Schicht hinüberwandern. Die Spinpolarisierung der injizierten Ladungsträger wurde dann auf optischem Weg als polarisierte Lumineszenz nachgewiesen – in direkter Umkehrung der in Abbildung 2 dargestellten Methode zur optischen Generierung spinpolarisierter Ladungsträger. Als magnetische Schicht wurden paramagnetische, Mn-dotierte Halbleiter, der ferromagnetische Halbleiter GaMnAs sowie fer-

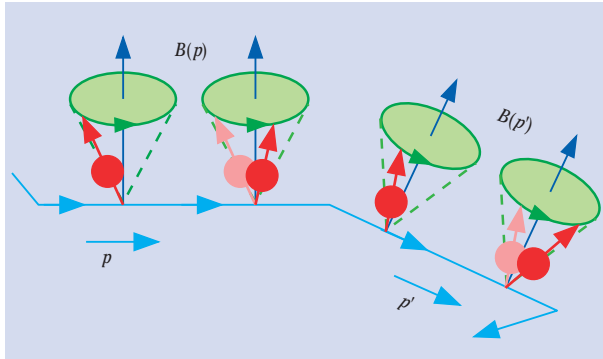


Abb. 4: Spinrelaxation nach D'yakonov und Perel' [11]: Der Spin S (rot) eines Elektrons mit Impuls p präzediert im effektiven Magnetfeld $B(p)$ (blau). Infolge häufiger Impulsstreuung ändert sich die Richtung von $B(p)$, bevor sich die Orientierung von S wesentlich geändert hat. So wird die Spinstreuung durch häufige Impulsstreuungsprozesse unterdrückt.

romagnetische Kontakte aus Fe erfolgreich eingesetzt [1, 12]. Die Magnetisierung dieser Schichten lässt sich mit einem äußeren Magnetfeld kontinuierlich einstellen, so dass man zum Nachweis der Spin-Injektion die Polarisation der Lumineszenz als Funktion dieses Parameters beobachtet. Als Beispiel zeigt Abbildung 3 die Polarisation der Lumineszenz für eine GaAs-AlGaAs-Leuchtdiode, bei der die Spins der injizierten Elektronen in einer ZnBeMnSe-Schicht ausgerichtet werden [13].

Ein gleichfalls elektrischer Nachweis einer elektrischen Spininjektion ist experimentell wesentlich schwieriger zu führen, da der Effekt der Spinpolarisierung beispielsweise vom gewöhnlichen Hall-Effekt unterschieden werden muss, den die Streufelder der magnetischen Schicht im Halbleiter hervorrufen [2]. Eine Alternative stellen Spinfilter dar, deren elektrischer Widerstand von der Spinorientierung der Ladungsträger abhängt. Einerseits lassen sich mit einem derartigen Bauelement spinpolarisierte Ladungsträger erzeugen. Andererseits lässt sich ein Spinfilter auch als Spindetektor verwenden, der die Spinorientierung in einen messbaren Stromfluss „übersetzt“ [3].

Transport, Speicherung und Relaxation von Spins

Der zweite wichtige Schritt für die Realisierung von Spintronik-Bauelementen sind Transport und Speicherung der spinpolarisierten Ladungsträger im Halbleiter. Diese Punkte sind eng verknüpft mit der Spinstreuung oder Spinrelaxation. Die Eigenschaft des Spinfreiheitsgrades, zwei verschiedene Werte annehmen zu können, ist einerseits die wesentliche Neuerung in der Spintronik, welche grundsätzlich neue Möglichkeiten eröffnet, die in der ladungsbasierten Elektronik nicht bestehen. Gleichzeitig liegt hier aber auch eine der größten Herausforderungen: Während die elektrische Ladung eine Erhaltungsgröße ist, die beispielsweise von Streupro-

zessen nicht beeinflusst wird, kann der Spin die ihm aufgeprägte Information – die Richtung des Spinvektors – bei Streuprozessen verlieren. Einem detaillierten Verständnis der Spinstreuung kommt deshalb eine große Bedeutung zu.

Es gibt mehrere Mechanismen, die zur Relaxation einer vorgegebenen Spinpolarisation beitragen [11]. Häufig stammt der dominante Beitrag von einem Mechanismus, den D'yakonov und Perel' vorgeschlagen haben (Abb. 4). In Halbleitersystemen mit einer gebrochenen Inversionssymmetrie entspricht die Spin-Bahn-Kopplung einem effektiven Magnetfeld, in dem die Spins präzedieren (vgl. Infokasten). Die Richtung (und der Betrag) dieses effektiven Magnetfeldes hängt vom Impuls der Elektronen ab. Eine Elektronenverteilung mit unterschiedlichen Impulsen würde daher sehr schnell ihre Spinpolarisation verlieren, da die Spins der Elektronen um entsprechend unterschiedlich orientierte Feldvektoren präzedieren. Innerhalb der Zeit, welche die Spins benötigen, um einmal um den Feldvektor zu präzedieren, finden allerdings üblicherweise viele Impulsstreuungsprozesse statt. Deshalb ändern sich ständig die Richtungen der effektiven Felder, um welche die einzelnen Spins präzedieren. So ergibt sich das erstaunliche Ergebnis, dass die Spinstreuung durch häufige Impulsstreuungsprozesse unterdrückt wird („Motional Narrowing“).

Die Spinrelaxationszeit bezeichnet die charakteristische Zeit, innerhalb der die Spinpolarisation der Elektronen verloren geht. Sie variiert sehr stark und lässt sich durch die geschickte Wahl des Halbleitermaterials, der Kristallorientierung und anderer Parameter über viele Größenordnungen einstellen. Die Kontrolle der Spinrelaxation in der Spintronik ist vergleichbar mit der Kontrolle der Leitfähigkeit in der konventionellen Elektronik. Die Spinpolarisation muss über lange Zeiten und weite Strecken erhalten bleiben, wenn die Spininformation in einem vom Spin-Injektor räumlich

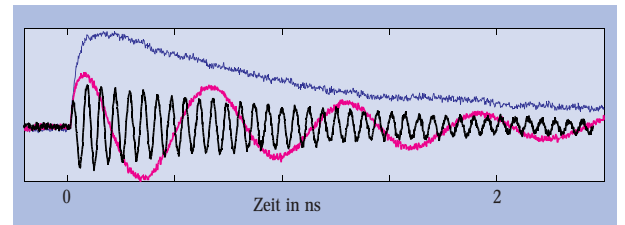


Abb. 5: Spinspeicherung in ZnSe bei Raumtemperatur. Das Messsignal zeigt die Kerr-Rotation in ZnSe für $B=0$ T (lila), $B=0,025$ T (rosa) und $B=0,25$ T (schwarz) (nach [1]).

getrennten Bereich verarbeitet oder gespeichert werden soll [1]. Eine schnelle Spinrelaxation kann hingegen beim schnellen Schalten vorteilhaft sein. Beispielsweise lassen sich Halbleiterlaser durch eine Umorientierung der Spins extrem schnell ausschalten [9].

Die Spinrelaxationszeiten reichen bei Raumtemperatur von einigen Pikosekunden in Halbleitern mit kleiner Bandlücke und fehlender Inversionssymmetrie bis zu vielen Millisekunden in Silizium, wo die Spin-Bahn-Wechselwirkung aufgrund der niedrigen Ordnungszahl sehr schwach ist. Sie kann aber auch bei ähnlichen Halbleiterstrukturen über viele Größenordnungen variiert werden. Nehmen wir als Beispiel die in der Industrie sehr gebräuchlichen Halbleiter InGaAs, GaAs und AlGaAs, die epitaktisch aufeinander aufgewach-

sen werden können. InGaAs hat bei Raumtemperatur eine Spinrelaxationszeit von wenigen Pikosekunden, Volumen-GaAs eine Spinrelaxationszeit von einigen 10 ps und (110)-GaAs/AlGaAs-Quantentröge eine Spinrelaxationszeit von mehreren Nanosekunden. Dies entspricht drei Größenordnungen Unterschied in der Spinrelaxationszeit. Das in Abb. 3 gezeigte Experiment belegt nicht nur eine gelungene Spin-Injektion, sondern gleichzeitig auch den erfolgreichen Spintransport.

Die über lange Zeiten stabile Spinorientierung der Elektronen lässt sich im Experiment direkt beobachten, wenn man ein schwaches äußeres Magnetfeld anlegt, in dem die ausgerichteten Spins gemeinsam präzedieren. Die Kerr-Rotation ist ein optisches Verfahren, um diese Spinpräzession zeitaufgelöst darzustellen. Abbildung 5 zeigt eine Messung in ZnSe bei Raumtemperatur für verschiedene Werte des äußeren Magnetfeldes [1]. Die Oszillationen können über viele Perioden aufgelöst werden.

Spin-Manipulation

Die Realisierung aktiver Bauelemente, mit denen sich Spin manipulieren lassen, ist sicher der anspruchsvollste Schritt auf dem Weg zur Spintronik. Es ist davon auszugehen, dass der Datta-Spintransistor (Abb. 1) gegenüber den hochentwickelten Transistoren in der ladungsbasierten Elektronik keine Vorteile aufweist. Dennoch handelt es sich um den Prototyp eines aktiven Spintronik-Bauelements, der die grundsätzlich neuen Möglichkeiten dieser Technologie aufzeigt, sodass er eine intensive Suche nach spinabhängigen Bauelementen ausgelöst hat. Der Datta-Spintransistor setzt voraus, dass sich die Elektronen auf ballistischen Bahnen (also ohne Impulsstreuung) vom Source- zum Drain-Kontakt bewegen. Impulsstreuungsprozesse wie in Abb. 4 behindern die kontrollierte Spinpräzession in diesem Bauelement. Verschiedene Gruppen haben deshalb veränderte Spintransistoren vorgeschlagen, bei denen sich die Elektronen diffusiv (das heißt, mit Impulsstreuung) bewegen dürfen [3]. Andere Bauelemente sind beispielsweise Spin-Ventile, spinabhängige resonante Tunneldioden und spin-kohärente Bauelemente [3, 12]. Für Spintronik-Anwendungen im Bereich des Quantencomputing werden vor allem gekoppelte Halbleiter-Quantenpunkte sowie Kernspins und ihre Wechselwirkung mit dem Elektronensystem untersucht [1, 2].

Beispielhaft soll hier eine Möglichkeit zur Kopplung von Elektronenspins in einem System von Halbleiter-Quantenpunkten vorgestellt werden [14]. Die räumlich lokalisierten Spins in einem Quantenpunkt können einerseits mit den umgebenden freien Elektronen in den Zuleitungen des Quantenpunktes wechselwirken. Diese Kopplung äußert sich im so genannten Kondo-Effekt, einer Erhöhung der Leitfähigkeit des Systems. (Damit verhält sich der Kondo-Effekt in Quantenpunkten umgekehrt wie der Kondo-Effekt bei magnetischen Störstellen in einem Volumenmaterial, wo man eine Abnahme der Leitfähigkeit beobachtet [15].) Andererseits können die Spins in zwei benachbarten Quantenpunkten über die so genannte Rudermann-Kittel-Kasuya-Yosida-(RKKY)-Kopplung miteinander wechselwirken.

Wird bei dem in Abb. 6a gezeigten Aufbau die Gate-Spannung V_{gL} so eingestellt, dass sich im linken Quantenpunkt eine ungerade Zahl N an Elektronen befindet, so erwartet man eine Kondo-Resonanz der Leitfähigkeit dI/dV_L dieses Quantenpunktes im Bereich $V_L = 0$. Über den mittleren schwarzen Bereich in Abb. 6a kön-

nen die Elektronen im linken Quantenpunkt allerdings mit den Elektronen im rechten Quantenpunkt wechselwirken. Hier zeigt sich im Experiment [14], dass die Kondo-Resonanz nur dann beobachtet werden kann, wenn sich im rechten Quantenpunkt eine gerade Zahl $M \pm 1$ an Elektronen befinden (Abb. 6b). Wird die Gate-Spannung V_{gR} so eingestellt, dass sich im rechten Quantenpunkt eine ungerade Zahl M an Elektronen befindet, so verschwindet die Kondo-Resonanz. Dieser Befund deutet darauf hin, dass in diesem Fall der Kondo-Effekt durch die RKKY-Kopplung unterdrückt wird. Bis sich die hier beispielhaft dargestellten grundlegenden Beobachtungen in echten Bauelementen nutzen lassen, wird man noch einen langen Weg zurücklegen müssen.

Ausblick

Der Spin in Halbleitern verbindet faszinierende Physik mit der Aussicht auf Bauelemente mit neuartiger Funktionalität. Bisher sind erst einige grundlegende Probleme in Richtung einer kommerziellen Spintronik gelöst worden, und einige Lösungsansätze werden auf die Grundlagenforschung beschränkt bleiben. Jenseits der heute intensiv diskutierten Konzepte besteht die

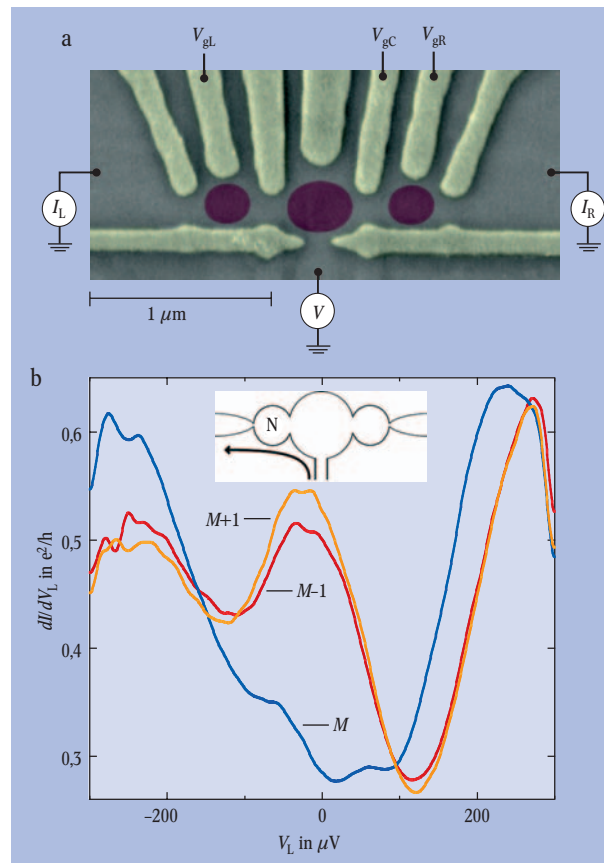


Abb. 6:

► a) Probenstruktur des gekoppelten Quantenpunkt-Systems: Die schwarzen Ovale zeigen schematisch die Lage der Quantenpunkte. Die Gate-Spannungen V_{gL} und V_{gR} ändern die Energien und die Besetzungen des linken und rechten Quantenpunktes. I_L und I_R sind die Ströme, die in der linken und rechten Zuleitung gemessen werden.

► b) Differentielle Leitfähigkeit dI/dV_L des linken Quantenpunktes, wenn dieser eine ungerade Zahl N an Elektronen enthält: Gibt es im rechten Dot eine gerade Zahl $M \pm 1$ an Elektronen, so erhält man bei $V_L = 0$ ein Maximum der Leitfähigkeit dI/dV_L (Kondo-Resonanz, rote und gelbe Kurve). Falls der rechte Dot eine ungerade Zahl M an Elektronen enthält, so ist die Kondo-Resonanz unterdrückt (blaue Kurve). (nach [14])

Chance, dass die aktuelle Forschung grundsätzlich neue Wege aufzeigen wird, die gegenwärtig noch gar nicht absehbar sind [1, 2].

Ein großes Entwicklungspotenzial bergen ferromagnetische Halbleiter [4]. Sie bieten nicht nur die Möglichkeit, die Funktionalität der metall-basierten Magnetoelektronik in einen Halbleiterchip zu integrieren. Beispielsweise gelang es auch bereits zu zeigen, dass sich der Ferromagnetismus in InMnAs optisch und elektrisch manipulieren lässt. Für breite Anwendungen muss allerdings die Curie-Temperatur dieser Materialien merklich oberhalb der Raumtemperatur liegen. Deshalb ist man einerseits bestrebt, bei den bereits bekannten ferromagnetischen Halbleitern wie GaMnAs die Curie-Temperatur weiter zu erhöhen. Andererseits sucht man gleichermaßen intensiv nach weiteren Materialien, die es erlauben, Halbleiterelektronik und Ferromagnetismus miteinander zu kombinieren. Ein weiteres wichtiges Feld sind ultraschnelle optoelektronische Anwendungen, die den Spin der Elektronen mit der Polarisation des emittierten oder absorbierten Lichts verknüpfen [4, 9].

Bei der Entwicklung eines Quantencomputers konkurrieren sehr unterschiedliche mögliche Realisierungen eines solchen Systems. In der Spintronik setzt man vor allem auf Elektronen in Halbleiter-Quantenpunkten und Kernspins einzelner Störstellen in Silizium. Daneben gibt es aber auch gleichermaßen spannende Aktivitäten, um einen Quantencomputer etwa mit supraleitenden Josephson-Kontakten, Kernspins in Flüssigkeiten und Ionen in Quadrupolfallen zu realisieren. Noch ist gänzlich offen, welcher Ansatz sich hier möglicherweise durchsetzen wird.

Literatur

- [1] S. A. Wolf et al., Science **294**, 1488 (2001)
- [2] D. D. Awschalom, D. Loss und N. Samarth (Hrsg.), Semiconductor Spintronics and Quantum Computations, Springer, Berlin (2002)
- [3] I. Žutić, J. Fabian und S. Das Sarma, Rev. Mod. Phys. **76**, 323 (2004)
- [4] H. Akinaga und H. Ohno, IEEE T. Nanotechnol. **1**, 19 (2002)
- [5] M. N. Baibich et al., Phys. Rev. Lett. **61**, 2472 (1988)
- [6] J. Dreßen und A. Hofknecht, Physik Journal, Januar 2004, S. 39
- [7] R. Winkler, Spin-Orbit Coupling Effects in Two-

Dimensional Electron and Hole Systems, Springer, Berlin (2003)

- [8] S. Datta und B. Das, Appl. Phys. Lett. **56**, 665 (1990)
- [9] M. Oestreich et al., Semicond. Sci. Technol. **17**, 285 (2002)
- [10] D. Leibfried und T. Schätz, Physik Journal, Januar 2004, S. 23
- [11] F. Meier und B. P. Zakharchenya (Hrsg.), Optical Orientation, Elsevier, Amsterdam (1984)
- [12] B. T. Jonker, Proc. IEEE **91**, 727 (2003)
- [13] R. Fiederling et al., Nature **402**, 787 (1999)
- [14] N. J. Craig et al., Science **304**, 565 (2004)
- [15] L. Kouwenhoven und L. Glazman, Physics World, Januar 2001, S. 33

Die Autoren

Roland Winkler (links) promovierte 1994 an der Universität Regensburg mit einer theoretischen Arbeit über die elektronische Struktur geschichteter Halbleitersysteme.



Nach einem Postdoc-Aufenthalt an der Vanderbilt-University in Nashville, Tennessee, wurde er wissenschaftlicher Assistent an der Universität Erlangen-Nürnberg, wo er sich über Spin-Bahn-Kopplung in zweidimensionalen Systemen habilitierte. Seit Ende 2003 ist er Assistent in der Abteilung Nanostrukturen in der Universität Hannover. Spin-Phänomene in Halbleitern stehen im Mittelpunkt seiner Tätigkeit, wenn er nicht mit dem Fahrrad durch die Lande tourt.

Michael Oestreich promovierte 1994 am Max-Planck-Institut für Festkörperforschung in Stuttgart mit einer experimentellen Arbeit über die Dynamik von Ladungsträgern in eindimensionalen Halbleiterstrukturen. Nach einem Postdoc-Aufenthalt an der University of California Santa Barbara, Kalifornien, wurde er wissenschaftlicher Mitarbeiter am MPI in Stuttgart und anschließend an der Philipps-Universität in Marburg, wo er auf dem Gebiet der Spintronik habilitierte. Seit Ende 2000 ist er Professor an der Universität Hannover, Abteilung Nanostrukturen. Zu seinem Zeitvertreib gehören die Ultrakurzzeitspektroskopie, Spintronik und Basketball.