

Spinelektronik

Andreas Waag

„Elektronik der Zukunft“ ist der Titel einer kürzlich veröffentlichten Mini-Delphi Studie des VDI Technologiezentrums im Auftrag des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF). Magnetoelektronik und Spinelektronik werden hier mit der CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor -Technologie) konventioneller Halbleiterchips als zukunftssträchtige Entwicklungen genannt. Es wird erwartet, daß sich in Zukunft Marktpotentiale im Umfang zweistelliger Milliardenbeträge öffnen. Worin unterscheiden sich die Spin- und Magnetoelektronik von der konventionellen Elektronik? Wie sind die Zukunftsaussichten einzuschätzen?

Die Entwicklung der Halbleitertechnik und damit der Elektronik beeinflusste unser tägliches Leben in der zweiten Hälfte des 20. Jhs. zunehmend stark. Dazu trugen die fantastischen Leistungssteigerungen und die drastischen Preisreduktionen bei Mikroprozessoren aus Silizium (Si) bei. Parallel dazu konnte die Packungsdichte und die Verarbeitungsgeschwindigkeit von Speicherbausteinen erhöht werden. Hierdurch erst wurde die Handhabung immens großer Datenmengen in Sekundenbruchteilen möglich. Weniger evident ist die Tatsache, daß auch der Handy-Boom erst durch die Entwicklung neuer Materialien und neuer Bauelemente ermöglicht wurde. Es handelt sich dabei um leistungsfähige, schnelle und rauscharme Verstärker auf der Basis von Galliumarsenid oder um Filterschaltungen, die Oberflächenwellen auf einem piezoelektrischen Material ausnutzen. Auch im Bereich der Optoelektronik – also der Erzeugung und Detektion von Licht – konnten die technologischen Fortschritte einen riesigen neuen Markt eröffnen: den der optischen Datenübertragung. Schnell modulierbare Halbleiter-Laser – auf der Basis von Galliumarsenid (GaAs) – werden zur Übertragung digitaler Information über Glasfaserkabelnetze genutzt. Momentan machen sich die Halbleiter-Entwickler daran, „ihren“ Materialien weitere Märkte zu erschließen. Bald werden hocheffiziente farbige und vor allem weiße Leuchtdioden (LEDs), insbesondere auf der Basis von Galliumnitrid GaN, für die Beleuchtung von Räumen oder in der Automobiltechnik nutzbar werden: ein riesiges Anwendungsfeld mit sehr großen Umsatzaussichten.

Ein weiterer Meilenstein bei der Entwicklung neuer Konzepte für neue Funktionalität in der Elektronik ist die Verwendung des Elektronenspins. Spinabhängiger Transport auf der Basis von metallischen (Magnetoelektronik) oder halbleitenden Schichtstrukturen (Spinelektronik) führt zu neuen Bauelementen mit bemerkenswert nützlichen Eigenschaften.¹ Nicht mehr nur die Ladung von Elektronen wird in diesen Bauelementen genutzt, sondern auch der Spin der Elek-

tronen und damit deren magnetisches Moment. Das Elektron kann nämlich als Elementarmagnet angesehen werden. Es besitzt einen Eigendrehimpuls (Spin) und damit verbunden ein magnetisches Moment. Dabei gehorchen sowohl der Spin als auch das magnetische Moment den Regeln der Quantenmechanik.

Die möglichen Anwendungen magnetoelektronischer oder spinelektronischer Bauelemente können im Wesentlichen in drei Kategorien eingeteilt werden:

1. Ferromagnetische Schichtstrukturen für die magnetische Datenspeicherung, meist auf der Basis metallischer Ferromagnete, wie sie z.B. in modernen Festplatten genutzt werden.
2. Spinpolarisierter Stromtransport durch elektronische Halbleiter-Bauelemente, z.B. für frei programmierbare Prozessoren. Die Programmierung erhält sich stromlos aufrecht und ist trotzdem sehr schnell umprogrammierbar.
3. Manipulation einzelner spin-polarisierter Elektronen, z.B. für die Quanteninformationsverarbeitung.

Halbleitereigenschaften

Was zeichnet die Materialien wie Silizium und GaAs aus, daß diese so erfolgreich in der Elektronik und Optoelektronik eingesetzt werden können? Um zu verstehen, was die Spinelektronik von der konventionellen Elektronik unterscheidet, müssen zunächst einige Grundbegriffe der Halbleiterphysik erläutert werden.

Halbleiter bestehen aus Atomen, die außerordentlich regelmäßig in einem wohldefinierten Kristallgitter angeordnet sind. Die quantenmechanischen Wellenfunktionen der Elektronen benachbarter Atome überlappen sich. Eine entsprechende Berechnung der Situation zeigt, daß dies zu Energiezuständen für Elektronen im Halbleiter führt, wie sie in Abb. 1 qualitativ für GaAs und den Verbindungshalbleiter Aluminiumgalliumarsenid (AlGaAs) gezeigt ist. Die möglichen Energien liegen in Bändern, in denen sich Elektronen aufhalten

können, während zwischen den Bändern Bandlücken auftreten. In diesen Bandlücken existieren keine Energiezustände für Elektronen, d.h. die zugehörigen Energien kommen nicht vor.

Halbleiter sind deshalb interessant, weil ihre Leitfähigkeit zwischen „isolierend“ und „metallisch“ durch die Zugabe von Dotierstoffen gesteuert werden kann. Diese externe Kontrolle über die Leitfähigkeit zeichnet die Halbleiter im Vergleich zu Metallen aus. Die Leitfähigkeit von Metallen ist i.A. immer konstant groß, die Leitfähigkeit von Halbleitern kann dagegen in weiten Bereichen über viele Zehnerpotenzen variiert werden. Darüberhinaus kann die Leitfähigkeit von Halbleitern auch durch Beleuchtung oder elektrische Felder gesteuert werden. Dieser Feldeffekt ist die Grundlage für Feldeffekt-Transistoren (FETs), die die Basis-Bauelemente moderner elektronischer Schaltungen darstellen.

Eine weitere zentrale Erkenntnis besteht darin, daß an der Grenzfläche zwischen zwei Halbleitern mit unterschiedlicher Bandstruktur ein Potentialsprung auftritt (Abb.1). Der Potentialsprung für Elektronen ist gegeben durch die Differenz der Leitungsbandkanten der beiden Halbleiter. Die Position der Bandkanten kann nun sehr einfach über die Zusammensetzung ternärer Verbindungshalbleiter wie z.B. AlGaAs, d.h. über den Aluminium-Gehalt, gesteuert werden. Dies führt dazu, daß Potentialverläufe, wie sie der Wissenschaftler für neuartige Bauelemente benötigt, in der Realität – im Halbleiterbauelement – nachgebaut werden können. Die Möglichkeit dieses „Band-Gap-Engineerings“ ist einer der großen Vorteile von Halbleitersystemen und Grundlage vieler moderner Halbleiterbauelemente. So wären Laserdioden und damit die moderne Datenkommunikation über Glasfaser ohne Band-Gap-Engineering nicht denkbar. Die Kontrolle über die Leitfähigkeit sowie die Kontrolle über die Potentialverläufe zeichnen moderne Halbleitersysteme aus. Durch diese Flexibilität gelingt es, Mikroprozessoren, Laserdioden und viele andere wichtige Halbleiterbauelemente zu realisieren. Allen diesen Bauelementen ist allerdings gemeinsam, daß sie eine inhärente Eigenschaft der Elektronen vernachlässigen: den Spin.

Das Elektron: nicht nur Ladung, sondern auch Spin

Durch Halbleiter-Bauelemente fließt ein Strom. Strom entsteht aus der Bewegung geladener Teilchen: den Elektronen im Leitungsband des Halbleiters². Das Elementarteilchen Elektron trägt neben der Ladung (der Elementarladung $e = 1.6 \cdot 10^{-19}$ Coulomb) auch einen Eigendrehimpuls – den Elektronenspin. Nach den Vorstellungen der klassischen Physik entsteht ein Drehimpuls, wenn z.B. eine Kugel rotiert. Ist die Kugel geladen, resultiert daraus ein Kreisstrom und damit wie bei einer Spule auch ein magnetisches Mo-

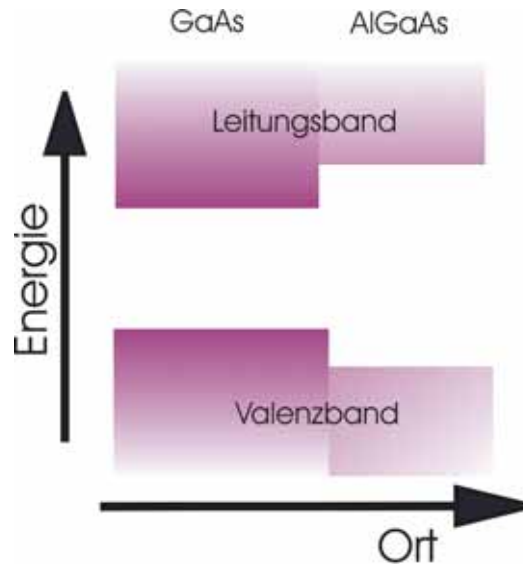


Abb. 1
Bänderschema von Halbleitern mit Potentialsprung an der Grenzfläche

ment. Das Elektron besitzt neben dem Spin ebenfalls ein magnetisches Moment. Es verhält sich damit wie ein winziger Mini-Magnet. Die Eigenschaften Spin und zugehöriges magnetisches Moment des Elektrons sind quantitativ allerdings keineswegs im Rahmen der klassischen Physik verständlich. Berechnungen zeigen, daß die Vorstellung des Elektrons als rotierende Kugel unhaltbar ist, insbesondere würde sie die Relativitätstheorie Einsteins verletzen.

Spin und magnetisches Moment sind dem Elektron als Elementarteilchen eingepreßt. Der Eigendrehimpuls des Elektrons (genauer: dessen z-Komponente) beträgt $J_z = \frac{1}{2} \hbar$ ($\hbar = \text{Plancksches Wirkungsquantum}/2\pi$). Das zugehörige magnetische Moment beträgt ein Bohrsches Magneton, $\mu_B = (e \hbar)/2m$, dabei ist e die Elementarladung und m die Ruhemasse des Elektrons. Das Elektron kann damit als Elementarmagnet angesehen werden.

Der Spin und das magnetische Moment gehorchen quantenmechanischen Regeln. Eine dieser Regeln besagt, daß die Richtung, in der der Elementarmagnet des Elektrons ausgerichtet ist, quantisiert sein muß – im Gegensatz z.B. zu einer Kompaßnadel, die ja in beliebige Richtungen zeigen kann. Bezüglich einer vorgegebenen Richtung existieren beim Elektron nur zwei Einstellmöglichkeiten: „Spin-Up“ oder „Spin-Down“. Damit eignet sich nicht nur die Ladung des Elektrons als Informationsträger, sondern auch dessen Spin. Ziel der Spin- bzw. Magnetoelektronik ist es nun, die Eigenschaft „Spin“ zur Informationsspeicherung und Informationsverarbeitung in elektronischen Bauelementen auszunutzen.

Ferromagnetische Schichtstrukturen für die magnetischen Datenspeicherung

In nicht-magnetischen Halbleitern wie Silizium und GaAs kommen die beiden Spin-Orientierungen gleich häufig vor. In jedem Energiezustand

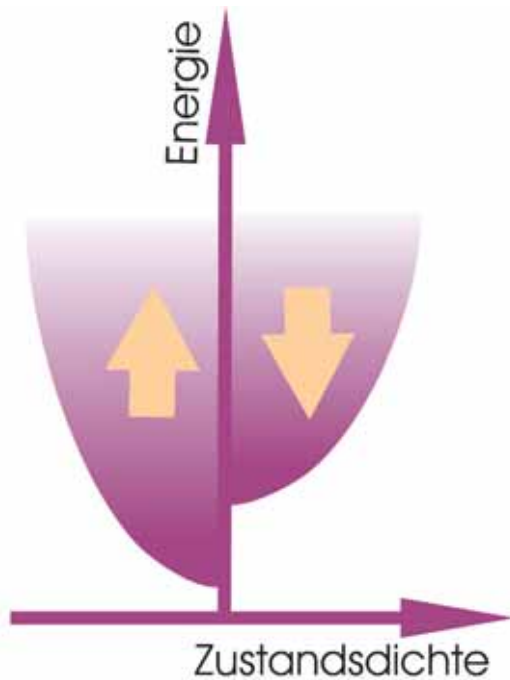


Abb. 2
Zustandsdichte eines
ferromagnetischen
Metalls, getrennt für
Spin-up und Spin-
down Elektronen

kann sich ein Elektron mit Spin-Up und eines mit Spin-Down befinden. Anders ist die Situation in ferromagnetischen Metallen. Dort ergeben sich auf Grund der makroskopischen Magnetisierung sowie der Wechselwirkung zwischen den magnetischen Atomen und den freien Elektronen im Leitungsband andere Verteilungen zwischen Spin-Up und Spin-Down-Elektronen. In Abb. 2 ist qualitativ die Zustandsdichte für eine ferromagnetisches Metall skizziert.³ Wenn die makroskopische Magnetisierung eine Vorzugsrichtung vorgibt, ergibt sich auch eine Spin-Polarisation. In häufig verwendeten ferromagnetischen Metallen beträgt die Spin-Polarisation ca. 30%.

Vor etwa fünfzehn Jahren konnten erste Bauelemente hergestellt werden, deren Widerstand von der relativen Magnetisierung zweier ferromagnetischer Metallschichten abhängt. Dies war der Einstieg in eine stürmische Entwicklung hin zu Bauelementen, die spinabhängigen Transport der Ladungsträger ausnutzen. Mittlerweile werden „Giant Magnetoresistance“-Bauelemente (GMR) und magnetische Tunnelstrukturen (Tunneling Magnetoresistance, TMR) großindustriell hergestellt und z. B. als Leseköpfe in Festplatten eingesetzt: eine Schlüsseltechnologie zur Steigerung der Speicherdichte solcher magnetischen Medien.



Abb. 3
Prinzipieller Aufbau
einer magnetischen
Tunnelodiode

Das Prinzip einer magnetischen Tunnelodiode ist in Abb. 3 skizziert. Eine hartmagnetische Unterlage ist von einer weichmagnetischen Schicht durch eine dünne Barriere (rot) getrennt. Die beiden ferromagnetischen Schichten können in der Ebene magnetisiert werden, und zwar entweder parallel oder antiparallel. Bei paralleler Magnetisierung passen die Spin-Zustandsdichten der beiden Materialien zueinander, die Elektronen können leicht von der oberen weichmagnetischen Schicht in die untere hartmagnetische Schicht tunneln. Es ergibt sich ein vergleichsweise niedriger Widerstand des Bauelements. Sind die beiden Schichten dagegen anti-parallel magnetisiert, so finden die meist spin-up-polarisierten Elektronen aus der oberen Schicht relativ wenige passende spin-up-Zustände in der zweiten Schicht. Der Stromtransport ist behindert, es ergibt sich ein hoher Widerstand. Parallele und anti-parallel Konfiguration führen also zu unterschiedlichen elektrischen Widerständen. Der Widerstand ändert sich in Abhängigkeit von der relativen Magnetisierung, je nach Bauart um ca. 30%. Dies bildet die Grundlage für die Entwicklung von sehr empfindlichen Magnetfeld-Sensoren in den unterschiedlichsten Anwendungen.

Derartige Bauelemente werden seit 1998 u.a. von IBM und Seagate sehr erfolgreich als Leseköpfe von Festplatten eingesetzt. Die weichmagnetische Schicht des Sensors wird durch das Magnetfeld der Festplatte hin- und hermagnetisiert, je nach Magnetisierung der Festplatte, und kann so die digitale Information auslesen. Dabei fliegt der Lesekopf mit einer Geschwindigkeit von ca. 100 km/h und einem Abstand von 20 nm über die Festplatte. Abb. 4 zeigt, wie mit der Entwicklung dieser neuartigen Sensortechnologie auf der Basis der Magnetowiderstandsänderung die Speicherdichte auf Festplatten drastisch erhöht werden konnte.

Magnetische Tunnelstrukturen können nicht nur als Sensor, sondern auch als Speicherbauelement eingesetzt werden. Die Magnetisierungsrichtung der weichmagnetischen Schicht kodiert die digitale Information, das Auslesen erfolgt über Widerstandsmessung. Zur Ummagnetisierung können Schreibleitungen eingesetzt werden, die bei Stromfluß ein Magnetfeld erzeugen, das ausreichen muß, um eine ausgesuchte Speicherzelle in einer bestimmten Richtung zu magnetisieren. Bestechende Vorteile dieser Technologie bestehen in der Erhaltung der Information auch ohne Spannungsversorgung, sowie in der Schnelligkeit des Schreibens und Auslesens. Sie ist damit der konventionellen Speichertechnologie auf der Basis von Silizium-Halbleiterbauelementen überlegen. Allerdings ist die Miniaturisierung bei den magnetischen Speichern noch nicht so weit vorangetrieben wie bei den Silizium-Speichern. Die magnetischen Random Access Memories (MRAMs) (Abb. 5) werden demnächst auf dem Massenmarkt verfügbar sein, weil sich praktisch

alle Big Player der Elektronik-Branche vor wenigen Jahren die Entwicklung solcher Bausteine zum Ziel gesetzt haben. Neben der Firma Motorola, die gerade einen 4 MB-MRAM-Chip an Testkunden verschickt hat, beschäftigt sich u.a. auch Infineon in Kooperation mit IBM mit dieser neuen Technologie. Ein riesiger Markt mit einem Volumen von geschätzten 100 Milliarden Euro wartet auf seine Erschließung. Der MRAM-Speicher wird hochintegriert wie ein DRAM (dynamic RAM), schnell wie ein SRAM (static RAM) und schneller als ein Flash-Memory sein – also ein Alleskönner unter den Speicherbausteinen. Die Zahl der möglichen Schreib-/Lesezyklen ist sehr groß, und zusätzlich sind MRAMs noch besonders strahlungsresistent gegen hochenergetische Weltraumstrahlung. Diese Vorteile könnten dazu führen, daß MRAMs in Zukunft die unterschiedlichen Speichertypen in Computersystemen sogar komplett verdrängen.

Spinabhängiger Transport wird schon in elektronischen GMR- und MRAM-Bauelementen auf der Basis ferromagnetischer Metalle ausgenutzt. Dieses Gebiet wird im Allgemeinen als Magnetoelektronik bezeichnet. Im Gegensatz hierzu ist es das Ziel der Spinelektronik, spinabhängigen Transport mit den Funktionen der Halbleiter zu kombinieren.

Magnetische Halbleiter

Zur erfolgreichen Umsetzung spinelektronischer Konzepte müssen magnetische Halbleiter entwickelt werden, die es erlauben, den Spin von Elektronen in Halbleitern zu manipulieren. Ein zentrales Experiment hierzu gelang 1999.⁴ Hierbei wurde ein dotierter magnetischer Halbleiter (im Beispiel BeMnZnSe) als Kontakt auf einem ansonsten unmagnetischen Halbleiterbauelement verwendet. Magnetische Halbleiter zeichnen sich dadurch aus, daß die Zustände für Elektronen mit Spin-Up und Spin-Down nicht mehr die gleiche Energie besitzen. Der energetisch tiefere Energiezustand wird bevorzugt oder gar ausschließlich von den Elektronen bevölkert, wie im BeMnZnSe. Da das magnetische Mangan nur ei-

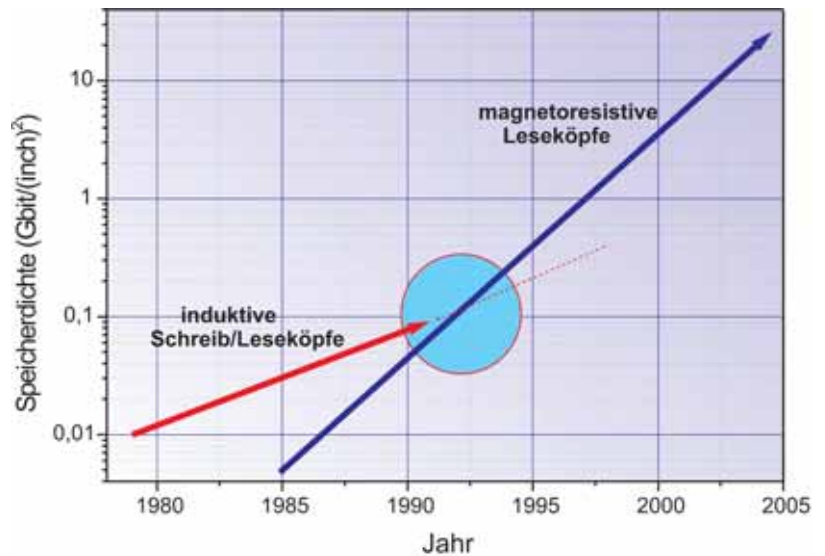


Abb. 4
Erhöhung der Speicherdichte von Festplatten mit der Einführung magneto-elektronischer Leseköpfe

nen Bruchteil des gesamten Halbleiters ausmacht, werden solche Systeme oft als semimagnetische Halbleiter bezeichnet. Im Experiment zeigt sich, daß ein Strom, der über den magnetischen BeMnZnSe-Kontakt in das darunter liegende Halbleiter-Bauelement fließt, tatsächlich aus spin-polarisierten Elektronen besteht. Dies kann durch die Analyse des emittierten Lichtes abgelesen werden: Das von der LED abgegebene Licht ist nämlich auf Grund der Spinpolarisation der Elektronen zirkular polarisiert. Dies war der erste überzeugende Beweis, daß es in der Tat möglich ist, die Konzepte des spinabhängigen Transports und die Welt der Halbleiter zu verbinden. Der Nachteil an dem beschriebenen frühen Experiment ist, daß die spinpolarisierenden Eigenschaften des magnetischen Kontaktes aus BeMnZnSe nur bei sehr tiefen Temperaturen und einem externen Magnetfeld auftreten, das permanent aufrecht erhalten werden muß. Beides ist zu aufwendig für die praktische Anwendung.

Viele Gruppen weltweit erforschen deshalb alternative magnetische Halbleiter, die eine Spin-Polarisation auch bei Raumtemperatur anbieten und am besten kein permanentes Magnetfeld benötigen, also selbst ferromagnetisch sind.

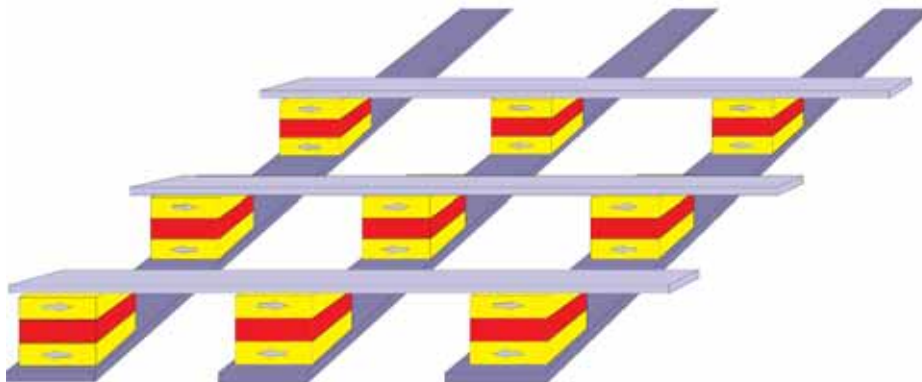
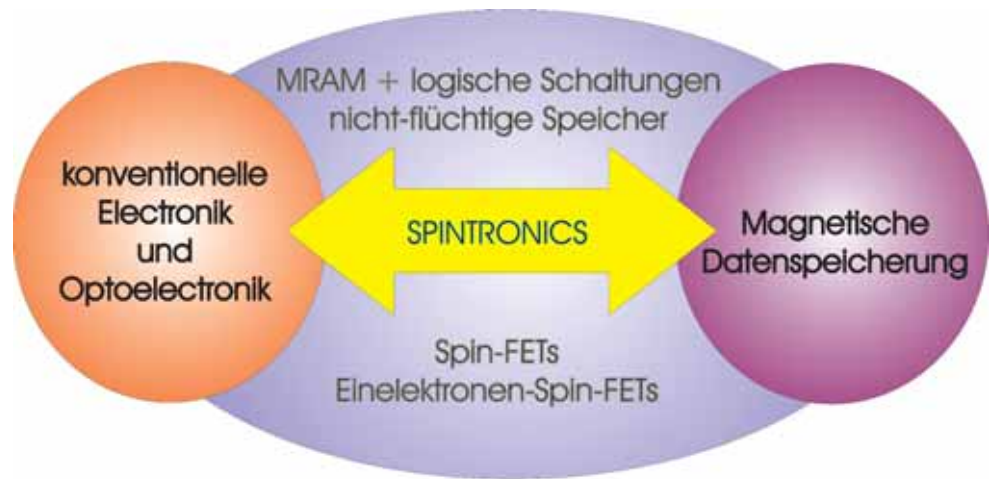


Abb. 5
Prinzip des MRAM (magnetischer Random Access Memories)

Abb. 6
Spinelektronik verbindet die Welt der Halbleiter mit der Welt der magnetischen Datenspeicherung



Magnetische Halbleiter können bisher noch nicht alle Anforderungen erfüllen. Als Beispiel sei hier das GaMnAs oder das ZnCoO genannt. (Es gibt noch viele weitere, diesbezüglich interessante magnetische Halbleiter, die auf ihre Tauglichkeit für die Raumtemperatur-Spinelektronik untersucht werden.) GaMnAs ist zwar ferromagnetisch, allerdings nur bis ca. 170 K, und ZnCoO ist zwar ein ferromagnetischer Halbleiter bei Raumtemperatur, aber dessen Spinpolarisation ist noch unbekannt. Hier gibt es erheblichen Forschungsbedarf bezüglich der Materialentwicklung.

Eine interessante Besonderheit magnetischer Halbleiter besteht darin, daß die ferromagnetische Kopplung zwischen den magnetischen Ionen durch die freien Ladungsträger und damit durch die Dotierung beeinflusst wird. Da die Dotierung in Halbleitern kontrollierbar ist, kann nun ein magnetischer Halbleiter zwischen „ferromagnetisch“ und „nicht-ferromagnetisch“ hin und hergeschaltet werden – z.B. mittels eines Steuerkontaktes (Gatestruktur), wie sie von Feldeffekt-Transistoren her bekannt ist und die als Grundlage für die CMOS-Technologie dient: ein sehr interessanter Aspekt für die Anwendung.

Anwendungen

Das Gebiet der magnetischen Datenspeicherung wird zunächst wohl den ferromagnetischen Metallen vorbehalten bleiben. Metallische MRAM-Chips sind weit entwickelt. Der Vorteil von MRAM-Strukturen auf der Basis magnetischer Halbleiter würde in der Kombination mit dem für Halbleiter typischen Band-Gap-Engineering bestehen. Elektrische Potentiale könnten in diesen Strukturen maßgeschneidert werden, mit klaren Vorteilen für die Bauelement-Designer.

Der spinpolarisierte Stromtransport durch Halbleiter – das zweite Anwendungsfeld – wird zu Bauelementen völlig neuer Funktionalität führen. In Abb. 7 ist ein Feldeffekt-Transistor gezeigt, dessen Kontakte (Source und Drain genannt) aus

einem magnetischen Halbleiter bestehen. Die relative Magnetisierung der ferromagnetischen Source- und Drainkontakte erlaubt die Realisierung zweier unterschiedlicher Zustände des Bauelements: parallele und anti-parallele Magnetisierung. Beide Zustände führen auf Grund des spinpolarisierten Stromtransports zu zwei unterschiedlichen Strom-Spannungscharakteristika. Diese Elektronik kann also umprogrammiert werden. Die Programmierung wäre semi-permanent, da die Source- und Drainkontakte ferromagnetisch sind. Der jeweilige Zustand wird auch ohne Versorgungsspannung aufrechterhalten, ist gleichzeitig aber auch beliebig oft änderbar. Darüber hinaus läßt sich die Magnetisierung extrem schnell schalten. Die Spininjektion in Laserdioden wäre ebenfalls sehr interessant. Oberflächenemittierende Laser würden bei einer niedrigeren Schwellstromdichte arbeiten, und die Polarisation solcher Laserdioden könnte mit Hilfe der Spinorientierung der Ladungsträger gesteuert werden. Die Demonstration der elektrischen Spin-Injektion in Silizium-CMOS-Schaltungen und GaAs- oder Galliumnitrid-Laserdioden steht allerdings noch aus. Hier befindet man sich am Anfang der Entwicklung.

Die dritte Kategorie möglicher Anwendungen der Spinelektronik betrifft die Manipulation des

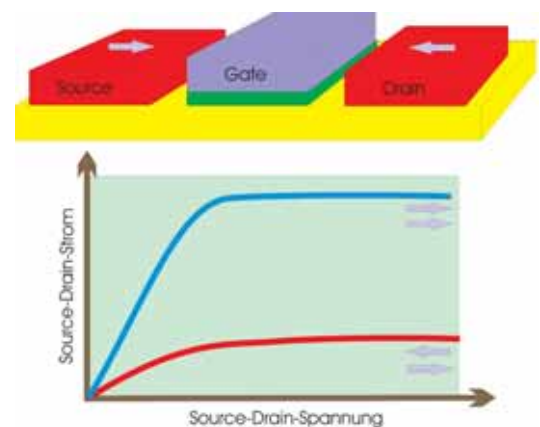


Abb. 7
Programmierbarer Spin-Feld-Effekt-Transistor (Spin-FET)

Spins von Einzelelektronen. Diese Einzelelektronen werden durch eine quantenmechanische Wellenfunktion beschrieben. Da der Einzelspin nur zwei Einstellmöglichkeiten hat – Spin up oder Spin down – wird ein lokalisiertes Einzelelektron auch als quantenmechanisches Bit oder auch Qbit bezeichnet. Qbits können miteinander verschränkt (gekoppelt) werden, womit dann quantenmechanische logische Operationen durchgeführt werden können. Diese sind die Grundlage für die Realisierung eines Quantencomputers. Neben dem Konzept der Einzelspins gibt es noch weitere Konzepte zur Realisierung eines Quantencomputers (z.B. die Verwendung von Kernspins oder von Einzelatomen in Atomfallen). Die Realisierung eines Quantencomputers auf Halbleiter-Basis hätte den Vorteil, daß für die Massenproduktion die Erfahrung der Silizium-Industrie genutzt werden kann.

Da ein Quantencomputer quantenmechanischen Regeln gehorcht, ist seine Arbeitsweise nur mit Hilfe der Quantenmechanik zu verstehen. Auszeichnen wird einen Quantencomputer seine massive Parallelität. Während z.B. 100 klassische Bits nur eine von 2^{100} Zahlen repräsentieren, können 100 Qbits 2^{100} Zahlen gleichzeitig repräsentieren, mit denen auch Rechenoperationen gleichzeitig durchgeführt werden können. Ein Quantencomputer mit nur 100 Qbits würde damit eine enorme Rechenleistung entwickeln. Spezielle mathematische Probleme z.B. im Zusammenhang mit der Dechiffrierung von Sicherheitscodes könnten hiermit extrem effizient angegangen werden. Die Arbeitsweise und die Anwendbarkeit eines Quantencomputers sind Gegenstand aktueller Forschung, wobei allerdings viele Fragen z.B. bezüglich der Dephasierung der quantenmechanischen Wellenfunktion und der notwendigen Fehlerkorrektur noch weiter erforscht werden müssen. Man ist noch weit davon entfernt, einen brauchbaren Quantencomputer zu realisieren.

Blick in die Zukunft

Die Kontrolle über den Spin der Elektronen erlaubt die Realisierung von Bauelementen mit völlig neuer Funktionalität. Während die Magnetoelektronik,

d.h. die Spinelektronik auf der Basis metallischer Ferromagnete, zur Zeit den Weg in die industrielle Fertigung findet und uns in Zukunft vermutlich das lästige „Booten“ der PCs und Notebooks ersparen wird, steckt das Gebiet der Spinelektronik auf der Basis von Halbleiterstrukturen noch in Kinderschuhen. Eine einigermaßen präzise Beschreibung der weiteren Entwicklung dieses Teilbereiches ist deshalb schwierig. Diese wird sehr stark davon abhängen, inwieweit neue, für den Praxiseinsatz taugliche Materialien mit geeigneten magnetischen Eigenschaften entdeckt und entwickelt und mit den konventionellen Halbleitern wie Silizium oder GaAs und GaN kombiniert werden. Das Verhalten der Elektronenspins in Halbleitern ist nur mit Hilfe der Quantenmechanik zu verstehen. Eine genauere physikalische Beschreibung sollte helfen, magnetische Materialeigenschaften vorherzusagen und die Arbeitsweise von Bauelementen insbesondere in der Quanteninformationsverarbeitung genauer kennen zu lernen. Klar ist allerdings, daß das Fenster für reale Anwendungen der Spinelektronik weit aufgestoßen wurde und daß speziell in Europa viele der weltweit führenden Gruppen auf diesem Gebiet tätig sind.

Anschrift des Verfassers:

Prof. Dr. Andreas Waag
TU Braunschweig
Institut für Halbleitertechnik
Hans-Sommer-Straße 66
38106 Braunschweig

Anmerkungen

- ¹ Die Begriffe „Magnetoelektronik“ bzw. „Spinelektronik“ werden immer noch nicht einheitlich benutzt. Die hier gegebene Definition ist die wohl gebräuchlichste.
- ² Alternativ kann Strom auch durch Defektelektronen (Löcher) getragen werden. Dabei handelt es sich um fehlende Elektronen im Valenzband.
- ³ Die Zustandsdichte gibt an, wie viele Elektronen mit der entsprechenden Energie im Halbleiter vorkommen.
- ⁴ R. Fiederling, M. Keim, G. Reuscher, W. Ossau, G. Schmidt, A. Waag, L.W. Molenkamp; Injection and detection of a spin polarized current in a n-i-p light emitting diode, Nature 402(1999)787.