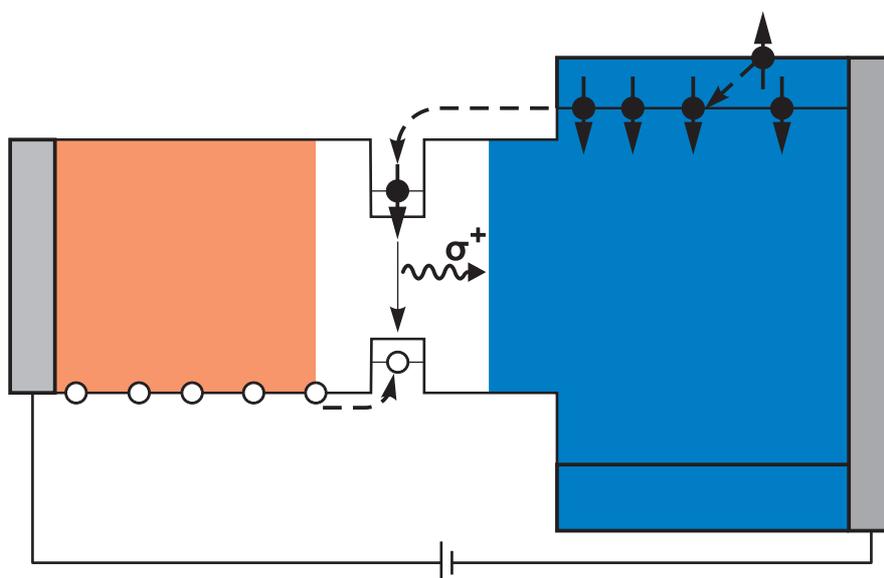




Spininjektion aus (Zn,Mn)Se in GaAs-Quantenfilme



Daniel Tröndle



Cuvillier Verlag Göttingen

Spininjektion aus (Zn,Mn)Se in GaAs-Quantenfilme

Zur Erlangung des akademischen Grades eines
DOKTORS DER NATURWISSENSCHAFTEN
von der Fakultät für Physik
der Universität Karlsruhe (TH)

genehmigte

DISSERTATION

von

Dipl.-Phys. Daniel Tröndle
aus Karlsruhe

Tag der mündlichen Prüfung : 13.01.2006
Referent : Prof. Dr. H. Kalt
Korreferent : Prof. Dr. C. F. Klingshirn

Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

1. Aufl. - Göttingen : Cuvillier, 2006

Zugl.: (TH) Karlsruhe, Univ., Diss., 2006

ISBN 3-86537-743-2

© CUVILLIER VERLAG, Göttingen 2006

Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen

Telefon: 0551-54724-0

Telefax: 0551-54724-21

www.cuvillier.de

Alle Rechte vorbehalten. Ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlages ist es nicht gestattet, das Buch oder Teile daraus auf fotomechanischem Weg (Fotokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen.

1. Auflage, 2006

Gedruckt auf säurefreiem Papier

ISBN 3-86537-743-2

Die Neugier steht immer an erster Stelle eines Problems, das gelöst werden will.

Galileo Galilei

Meinen Kindern, deren Neugier unersättlich ist.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Erzeugung von Spinpopulationen	5
2.1	Optische Orientierung	6
2.1.1	Polarisationsgrad mit Valenzband-Entartung	8
2.1.2	Polarisationsgrad ohne Valenzband-Entartung	11
2.2	Magneto-Polarisation und verdünnte magnetische Halbleiter	13
2.2.1	ZnSe	14
2.2.2	Zn _{1-x} Mn _x Se	22
2.2.3	Zn _{1-x} Mn _x Se als Spinaligner	40
2.3	Spinrelaxationsprozesse in Halbleitern	41
2.3.1	Elliot-Yafet-Mechanismus (EY)	41
2.3.2	D'yakonov-Perel'-Mechanismus (DP)	42
2.3.3	Maialle-de Andrada-Sham-Mechanismus (MAS)	43
2.3.4	Bir-Aronov-Pikus-Mechanismus (BAP)	44
2.3.5	Spinrelaxation in semimagnetischen Halbleitern	44
3	Injektion von Spinpopulationen	47
3.1	Optische Spininjektion	47
3.1.1	Prinzip der optischen Spininjektion	47
3.1.2	Optische Spininjektion in GaAs-Quantenfilme	48
3.1.3	Magneto-Photolumineszenz	57
3.1.4	Bestimmung der optischen Injektionseffizienz	59
3.1.5	Verlust der Spinpolarisation	61
3.2	Elektrische Spininjektion	65
3.2.1	Prinzip der elektrischen Spininjektion	65
3.2.2	Elektrische Spininjektion in GaAs-Quantenfilme	66
3.2.3	Magneto-Elektrolumineszenz	68
3.2.4	Bestimmung der elektrischen Injektionseffizienz	70
3.2.5	Verlust der Spinpolarisation	72
3.2.6	Elektrische Spininjektion in InGaAs-Quantenpunkte	76

4 Zusammenfassung und Ausblick	79
A Konventionen	81
B Aufbau	83
B.1 Magnetkryostat	83
B.2 Anregung	89
B.3 Detektion	90
B.4 Modularität	91
B.5 Verwendete Proben	91
Publikationen	93
Literaturverzeichnis	95
Danksagung	107

Kapitel 1

Einleitung

Der quantenmechanische Freiheitsgrad Spin und seine Ausnutzung für die Informationsverarbeitung steht in der letzten Dekade an einer prominenten Stelle der Forschung. In der konventionellen Elektronik werden Zustände durch An- oder Abwesenheit elektrischer Ladungen dargestellt, Operationen sind mit elektrischen Strömen verknüpft. Trotz erheblicher und bislang zumeist erfolgreicher Bemühungen zur Verringerung von Baugrößen und Rechenzeiten stößt die konventionelle Elektronik allmählich an physikalische Grenzen. Eine dieser Grenzen bestand in der Informationsdichte auf magnetischen Speichermedien (Festplatten) mit konventionellen Leseköpfen, die sehr erfolgreiche Lösung in der Ausnutzung des Riesen-Magneto-Widerstands (giant magneto-resistance). Alle heutigen Festplatten verdanken ihre hohe Informationsdichte diesem spinabhängigen Effekt. Ein verwandter Effekt, der magnetische Tunnelwiderstand, wird in magnetischen Speicherbausteinen (MRAM, magnetic RAM) ausgenutzt, wodurch MRAM bei ähnlich schnellen Schreib- und Lesezeiten wie konventioneller Arbeitsspeicher seine Information auch bei ausgeschalteter Versorgungsspannung erhält. Nach anfänglichen Problemen ist diese Technologie inzwischen über das Prototypenstadium hinaus in ersten Serien erhältlich.

Abgesehen von diesen semiklassischen Speicheranwendungen ist die Ausnutzung des Spins insbesondere für funktionelle Elemente interessant, wie etwa den 1990 von Datta und Das vorgeschlagenen Spin-Feldeffekt-Transistor [1]. Eine Vielzahl von Ideen und Ansätzen bilden in dieser Hinsicht das Gebiet der Spintronik [2, 3], der spinbasierten Elektronik, in deren Mittelpunkt das Spin-Qubit steht. Das Qubit oder Quanten-Bit beinhaltet dabei nicht nur die binären Zustände $|0\rangle$ und $|1\rangle$, sondern auch den gesamten Raum der Mischzustände $|\Psi\rangle = a|0\rangle + b|1\rangle$. Damit ließen sich quantenmechanische Rechenoperationen durchführen, die den konventionellen rein binären Operationen weit überlegen wären [4]. Die Realisation von Qubits ist beispielsweise möglich durch Anregung kalter Ionen in Ionenfallen mit Laserpulsen [5],

in Form von magnetischen Flussquanten oder der Anzahl von Cooper-Paaren in supraleitenden Strukturen mit Josephson-Kontakten [6] oder durch den Kernspin in Molekülen, der über Kernspinresonanzexperimente manipuliert werden kann. Letzterer Ansatz hält bislang den funktionellen Rekord mit der Faktorisierung der Zahl 15 [7], die Skalierbarkeit ist aber recht eingeschränkt. Quantenpunkte in Halbleitern [8, 9] stellen hingegen einen vielversprechenden Weg dar, konventionelle (halbleiterbasierte) Elektronik und Spintronik zu vereinen.

Für spinbasierte funktionelle Anwendungen muss eine Reihe von Schritten erfolgreich absolviert werden: Ein einzelner Spin oder ein Spinensemble muss präpariert werden, eine ausreichend lange Lebensdauer für mögliche Operationen aufweisen und innerhalb dieser Lebensdauer gezielt beeinflusst und anschließend ausgelesen werden können. Für den ersten Schritt, die Präparation, bietet sich in vielen Systemen die Injektion eines Spin(ensembles) aus einer magnetischen Schicht mit stark spinabhängiger Zustandsdichte heraus an. Vielfältige Untersuchungen wurden und werden unternommen zur Spininjektion aus ferromagnetischen Metallen in paramagnetische Metalle [10, 11], Supraleiter [12], Kohlenstoff-Nanoröhrchen [13] und Halbleiter [14–17].

Während die Spininjektion aus einem ferromagnetischen Metall in einen Halbleiter aufgrund der hohen Curie-Temperatur auch bei Raumtemperatur möglich ist, wird ihre Effizienz durch die erheblichen Unterschiede in der Leitfähigkeit stark eingeschränkt [18] und lässt sich nur über Tunnelprozesse durch maßgeschneiderte Schottky-Barrieren erhöhen [19, 20]. Eine in letzter Zeit intensiv untersuchte Alternative zu reinen ferromagnetischen Metallen sind Heusler-Legierungen, die als Halbmetall für den Majoritätsspin metallische und für den Minoritätsspin Eigenschaften eines Halbleiters besitzen und dadurch vollständige Spinpolarisation erreichen [21].

Das Problem der Grenzschicht Metall-Halbleiter lässt sich insbesondere auch umgehen, wenn als spinausrichtende Schicht ebenfalls ein Halbleitermaterial verwendet wird. Hier hat sich die Gruppe der verdünnten magnetischen Halbleiter [22] einen einzigartigen Stellenwert verschafft, da gewöhnliche nichtmagnetische Halbleiter wie GaAs oder ZnSe durch Einbringen eines geringen Anteils von Mn^{2+} -Ionen eine außergewöhnlich starke Magnetisierung in einem äußeren Magnetfeld zeigen.

Verdünnte magnetische Halbleiter auf Basis von III-V-Materialien wie (Ga,Mn)As weisen bei tiefen Temperaturen Ferromagnetismus auf [23, 24], sind aber aufgrund ihrer Komposition stark p-dotiert, sodass sie meist zur Injektion spinpolarisierter Löcher benutzt werden. Da Löcher aber zu schneller Spinrelaxation neigen, ist die Injektionseffizienz damit erheblich eingeschränkt [25]. Eine Injektion von Elektronen mit langlebigerem Spin ist nur mit komplizierten Bandstrukturen möglich [26].

Mit semimagnetischen Halbleitern auf Basis von II-VI-Materialien wie (Zn,Mn)Se

hingegen nimmt man zwar eine stark eingeschränkte Möglichkeit des ferromagnetischen Verhaltens in Kauf, kann die Struktur jedoch beliebig dotieren, da Mangan beim Einbau in das Kristallgitter ebenso zweiwertig ist wie Zink. Damit kann die Spininjektion wahlweise wiederum elektrisch realisiert werden, indem Elektronen aus einem metallischen Kontakt durch den n-dotierten magnetischen Halbleiter driften [27–29]. Ladungsträgerpaare können in einem undotierten System aber auch durch optische Anregung mit geeigneter Wellenlänge direkt in der magnetischen Schicht erzeugt werden [30, 31] und von dort aus in die funktionale Schicht gelangen, also optisch injiziert werden. Allen angesprochenen Injektionsverfahren ist jedoch gemein, dass einer vollständigen Spinpopulation in der funktionellen Schicht eine Vielzahl von Relaxationsmechanismen im Wege steht und je nach Verfahren nur zwischen einigen wenigen Prozent und etwa 80 Prozent Injektionseffizienz erzielt wurden.

Gliederung der Arbeit

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich in diesem Kontext mit der Spininjektion aus paramagnetischen (Zn,Mn)Se-Schichten in GaAs-Quantenfilme. Die Arbeit entstand im Teilprojekt A2.3 des an der Universität Karlsruhe neu eingerichteten DFG-Forschungszentrums „Centrum für Funktionelle Nanostrukturen“ (CFN).

Die Arbeit gliedert sich in zwei Hauptteile. Der erste Teil handelt von der Erzeugung von Spinpopulationen durch zirkular polarisierte optische Anregung und durch spinabhängige Zustandsdichten in verdünnten magnetischen Halbleitern. Dazu wurden am Materialsystem $\text{Zn}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Se}$ in Abhängigkeit vom Mangangehalt x ausführliche Messungen durchgeführt, die einerseits das Wachstum und den neu eingerichteten Aufbau für magneto-optische Messungen charakterisieren und andererseits Einblicke in die besonderen Eigenschaften des Materials und seine Eignung für die Experimente zur Spininjektion bieten. Da für eine erfolgreiche Spinpolarisation in dem Material eine Relaxation der Spins in das energetisch günstigere Niveau notwendig ist, wird anschließend ein Überblick über die verschiedenen und vielfältigen Mechanismen zur Spinrelaxation gegeben.

Der zweite Teil der Arbeit ist dann der eigentlichen Spininjektion gewidmet. Entsprechend der oben geschilderten Möglichkeiten des II-VI-basierten verdünnten magnetischen Halbleiters (Zn,Mn)Se werden sowohl optische als auch elektrische Spininjektion vorgestellt. Die auf die jeweilige Weise erzeugten spinpolarisierten Ladungsträger werden in nichtmagnetische GaAs-Quantenfilme injiziert und aus der zirkularen Polarisation der beobachteten Photo- oder Elektrolumineszenz werden Rückschlüsse auf die Injektionseffizienz und die beteiligten Prozesse zur Spinrelaxation gezogen.

Nach der Zusammenfassung folgen im Anhang einige Konventionen zur Notation und eine Beschreibung des neu errichteten und für die Experimente verwendeten Versuchsaufbaus.