

Schlussbericht

BMBF 01BM476

Oxidische und nitridische Halbleiter für die Spinelektronik

Projektleiter	Prof. Dr. Andreas Waag Institut für Halbleitertechnik TU Braunschweig
Laufzeit	01.01.2005 – 31.09.2009

Institut für Halbleitertechnik,
TU Braunschweig
Hans-Sommer-Strasse 66
38106 Braunschweig

Inhaltsverzeichnis

I Kurze Darstellung des Projektes 01BM476

1. Aufgabenstellung
2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde
3. Planung und Ablauf des Vorhabens
4. Wissenschaftlicher und technischer Stand
5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

II Eingehende Darstellung

1. Erzielte Ergebnisse
2. Voraussichtliche Nutzen
3. Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen
4. Der erfolgten oder geplanten Veröffentlichungen des Ergebnisses

III Erfolgskontrollbericht

IV Kurzfassung (Berichtsblatt) des Projektes 01BM476

I. Kurze Darstellung

1. Aufgabenstellung

Ziel des Projektes war es, magnetische Wide-Band-Gap Halbleiter auf deren Tauglichkeit für den Einsatz in der Magneto- und Spinelektronik zu untersuchen. Vorrangiges Ziel und Basis des Vorhabens ist die kontrollierte Materialherstellung von magnetischer Zn(X)O- oder Ga(X)N-Schichten und -Nanostrukturen sowie deren Charakterisierung. Darauf bauen grundlegende Untersuchungen zu Transport durch einzelne Nanostrukturen, Dotierung, magnetische Messungen. Deren Resultate fließen ein in die Herstellung erster Bauelemente, wie Spin-Injektion in optoelektronische Bauelemente.

2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Die Arbeitsgruppe des Antragstellers konnte auf umfangreiche eigene Erfahrungen in den Bereichen Epitaxie und Charakterisierung von II-VI- und III-V-Halbleitern, insbesondere auch ZnO und GaN mittels MOVPE zurückgreifen. Darüber hinaus beinhalteten Arbeiten auf der Basis von ZnMnSe (MBE) die Herstellung und Untersuchung von spin-elektronischen Bauelementen. Insbesondere konnte mit Hilfe von semimagnetischen II-VI-Halbleitern erstmals die effiziente Injektion spin-polarisierter Ladungsträger in einen Halbleiter unter Verwendung von BeMnZnSe demonstriert werden. Magnetische Halbleiter auf der Basis von GaMnAs wurden ebenfalls in der Arbeitsgruppe untersucht. Hier werden die Schichten und Übergitter mittels MBE hergestellt. Auch Ergebnisse aus dem Gebiet des gitterfehlangepassten epitaktischen Wachstums von III-V-Halbleitern auf Silizium, die in der Arbeitsgruppe des Antragstellers in Braunschweig erzielt wurden,

Es existierte Erfahrung in der Analyse der strukturellen, elektronischen, optischen sowie magnetischen Eigenschaften von Halbleiter-Schichtstrukturen. Verwendete Messmethoden sind neben SQUID Messungen zur direkten Analyse der Magnetisierung als Funktion der Temperatur und des Magnetfeldes u. a. Hall-Messungen, Magnetotransport bei tiefen Temperaturen und hohen Magnetfeldern, hochauflösende Röntgenbeugung sowie Deep Level Transient Spectroscopy (DLTS). Weiterhin wurde die Rasterelektronen- und Rasterkraft-Mikroskopie (AFM) zur Oberflächencharakterisierung genutzt sowie ortsaufgelöste Raman-Spektroskopie und ortsaufgelöste Photolumineszenz. Die Lateralstrukturierung erfolgt mittels Photolithographie sowie nasschemische und trockenchemische Ätzprozesse.

In der Arbeitsgruppe des Antragstellers kommt für die Herstellung von ZnO-Zn(Mg,Cd)O-Schichten sowohl die MOVPE als auch die MBE und für die Herstellung von Ga(X)N Schichten die MOVPE zum Einsatz. Zusätzlich wurde die Herstellung von ZnO Nanosäulen erarbeitet und ZnO, ZnMnO, ZnCoO Nanopulvern eingesetzt.

3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Ziel des Projektes ist es, die technologische Basis für eine auf Wide-Band-Gap Halbleiter-basierende Spinelektronik zu entwickeln.

Die Meilensteinplanung des Projektes, in der auch die zeitliche Abfolge der Arbeitspakete ersichtlich wird, ist unten dargestellt.

	1. Jahr	2. Jahr	3. Jahr	4. Jahr	5. Jahr
Optimierung magnetischer ZnO-Schichten	■	■	■		
Optimierung nanoskaliger ZnO-Säulen	■	■	■		
Herstellung magnetischer GaN-Schichten					■
Untersuchungen zur Spin-Injektion und -Polarisation		■	■	■	■
Herstellung nanoskaliger magnetischer Strukturen		■	■	■	■
Untersuchung grundl. Eigenschaften magnetischen ZnO	■	■	■	■	■
Herstellung gesinterter ZnO-Strukturen			■	■	■
Transportmessungen in Nanostrukturen		■	■	■	■
Strukturen für TMR/ GMR/ MRAM			■	■	■

Die Arbeiten wurden in der ersten Phase meist materialorientiert. Schwerpunkt war die Herstellung und Analyse magnetischer Zn(X)O-Schichten (X = magnetisches Ion), Heterostrukturen und Nanostrukturen. Die Arbeiten wurden auch auf magnetisches GaN ausgeweitet. Auf Grund der begrenzten Restlaufzeit wurden nur erste spinelektronische Strukturen auf der LED-Basis hergestellt. Als Epitaxiemethoden wurden sowohl die MBE, die MOVPE, die VPE, die chemische Abscheidung und Nanopulver-Technologie eingesetzt. Das gesamte Projekt konnte im Wesentlichen wie beantragt und geplant durchgeführt werden.

4. Wissenschaftlichen und technischen Stand

Ein direkter Weg zur Erzeugung spinpolarisierter Ladungsträgersysteme ist die Verwendung semimagnetischer Halbleiter („dilute magnetic semiconductors“, DMS), die auf Grund einer großen Zeeman-Aufspaltung in Kombination mit einer relativ niedrigen n-Dotierung zu einer 100%igen Polarisation der Ladungsträgerspins führen können. Halbleiter-Heterostrukturen erlauben darüber hinaus, das Band-Gap-Engineering zur Herstellung von Bauelementen auszunutzen. Die ersten Strukturen für effiziente elektrische Spin-Injektion in einen Halbleiter wurde von der Gruppe des Antragstellers 1999 mittels BeMnZnSe-Injektoren realisiert, die gitterangepasst auf GaAs epitaktisch abgeschieden wurden [1]. BeMnZnSe als typischer semimagnetischer Halbleiter erlaubt zwar fast 100% Spin-Injektion, ist allerdings paramagnetisch und schon bei Temperaturen oberhalb von ca. 10 K verliert das Material

seine spinpolarisierende Wirkung. Darüber hinaus wurden erste magnetische Tunnelstrukturen (BeTe-ZnMnSe) hergestellt und auf ihr Verhalten bezüglich Spin-Schalten untersucht [2].

Mittlerweile werden weltweit auf breiter Front alternative Materialien erforscht (GaMnAs, Heusler-Verbindungen, GaMnN ...). GaMnAs ist zwar interessant wegen seiner ferromagnetischen Kopplung, bisher konnten aber Curie-Temperaturen von nur 160 K realisiert werden. Da Mn im GaAs als Akzeptor eingebaut wird, ist GaMnAs löcherleitend, was die Anwendung eines solchen Materials in spinelektronischen Bauelementen erschwert, da die Dephasierung von Löchern wesentlich schneller ist als die der Elektronen. Heusler-Verbindungen sind zwar bei Raumtemperatur ferromagnetisch, stellen aber oft nur in einer Raumrichtung 100% Spin-Polarisation zur Verfügung, ein Band-Gap-Engineering mit Heusler-Verbindungen, wie es z. B. zur Entwicklung von Spin-Schaltern notwendig ist, ist momentan nicht abzusehen.

Ein bevorzugtes Material für die avisierten Anwendungen in der Spinelektronik und damit in der Quanteninformationsverarbeitung muss idealerweise folgende Anforderungen erfüllen:

- 100% Spin-Polarisation
- Elektronenleitung
- ferromagnetische Kopplung
- magnetische Eigenschaften auch bei Raumtemperatur stabil
- Möglichkeit des Band-Gap-Engineerings zur Herstellung von spintronischen Bauelementen
- Ankopplung an Silizium und/oder GaAs möglich

Magnetisches Zn(X)O scheint diesen Anforderungen sehr nahe zu kommen.

ZnO weist für viele Anwendungen sehr interessante fundamentale Eigenschaften auf:

- ZnO besitzt die höchste Exziton-Bindungsenergie aller II-VI und III-V-Halbleiter (60 meV). Diese hohe Bindungsenergie führt zu exzitonischer stimulierter Emission in optisch gepumpten Strukturen schon bei niedrigen Pumpdichten. Stimulierte Emission konnte bis 550 K selbst in polykristallinen Schichten beobachtet werden.
- ZnO besitzt eine Bandlücke von 3,37 eV bei Raumtemperatur, interessant für optoelektronische Bauelemente im UV.
- ZnO besitzt ausgezeichnete piezoelektrische Eigenschaften.
- Das ternäre System MgO-ZnO-CdO überstreicht Bandlücken von 2,8 eV bis 4 eV mit einer im Vergleich zu GaN relativ kleinen Änderung der Gitterkonstante von 0,324 nm auf 0,326 nm.
- Die Drift-Beweglichkeit der Ladungsträger in ZnO ist größer und sättigt bei höheren Feldern als in GaN. ZnO Varistoren werden zum Schutz von elektronischen Schaltungen gegen Überspannung eingesetzt.
- ZnO ist strahlungsresistenter als GaN, Si und GaAs. Deshalb wird ZnO für Anwendungen in der Raumfahrt (z. B. als Solarzellenmaterial) diskutiert und untersucht.
- ZnO hat schließlich zu GaN eine Gitterfehlpassung von nur 1,8%, und kristallisiert wie GaN in der Wurtzit-Struktur. Eine Kombination von ZnO- und GaN-Technologie ist denkbar.