

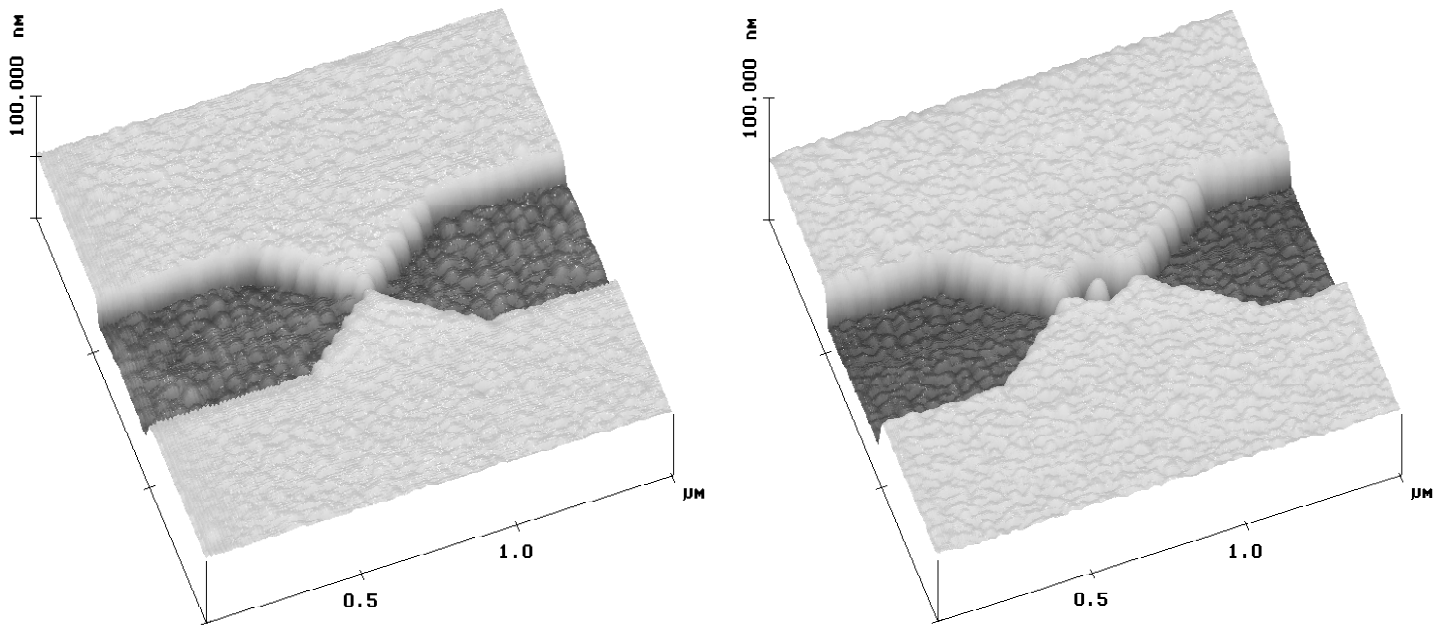
# Materialwissenschaften

Ruhr-Universität Bochum

NR. 4

FORSCHUNGSSCHWERPUNKTE UND INFORMATIONEN

SS 02



Topographie nanostrukturierter GaAs/AlGaAs-Halbleiterschichten in jeweils  $1.5 \mu\text{m} \times 1.5 \mu\text{m}$  Feldern, die mit einem Rasterkraftmikroskop (RKM) abgebildet wurden. Die Strukturen wurden gleichfalls mit dem RKM hergestellt. Dazu wurden zuvor aufgebrachte 5 nm dünne Polymerfilme mit der Spitze des RKM verdrängt, so dass die Halbleiteroberfläche dort durch eine Ätzlösung bis zu einer Tiefe von 20 nm abgetragen werden konnte. Durch einen speziellen Schichtaufbau wird erreicht, dass sich etwa 40 nm unter den abgeätzten Gebieten Elektronen ansammeln, die elektrischen Strom leiten können. So wird die Topographie in eine Potentiallandschaft verwandelt. Links formen die Vertiefungen einen Quantenpunktkontakt zwischen 500 nm breiten Zuleitungen, rechts wird im Zentrum ein Quantenring mit 110 nm Durchmesser gebildet. Beide Nanostrukturen zeigen im elektronischen Transport ausgeprägte Quanteneffekte.

Ulrich Kunze  
Lehrstuhl für Werkstoffe und  
Nanoelektronik

## Intro

Das vorliegende Faltblatt soll dem interessierten Leser einen kurzen Einblick in laufende Aktivitäten der Materialwissenschaftler an der Ruhr-Universität Bochum (RUB) geben. Die Broschüre erscheint parallel zum 4. *Materialwissenschaftlichen Tag* der RUB am 21. Juni, auf dem in Vorträgen und Postern For-

schungsergebnisse in allgemein verständlicher Form präsentiert werden. Entsprechend der Zugehörigkeit der beteiligten Wissenschaftler zu jeweils drei ingenieur- und naturwissenschaftlichen Fakultäten sind die Themen der Veranstaltung breit gestreut, im Selbstverständnis der Fächer repräsentieren sie zum Teil ihren Kernbereich, zum Teil aber auch interdisziplinäre Projekte. Diese Mischung ist typisch auch für die in den letzten Jahren eingeworbenen Verbundvorhaben. So wurden drei DFG-Schwerpunkte unter Federführung von Mitgliedern des Materialforums eingerichtet: *Strukturgradienten in Kris-*

*tallen* (Sprecher: Prof. Dr. W. Schmahl), *Anorganische Materialien durch Gasphasensynthese: Interdisziplinäre Ansätze zu Entwicklung, Verständnis und Kontrolle von CVD-Verfahren* (Sprecher: Prof. Dr. R. Fischer) und *Organische Feldeffekt-Transistoren: Strukturelle und dynamische Eigenschaften* (Sprecher: Prof. Dr. Ch. Wöll). Vor allem gelang die Einwerbung von drei neuen Sonderforschungsbereichen (SFB) mit ausschließlicher oder überwiegender Beteiligung von RUB-Materialwissenschaftlern. Im ersten Beitrag wird der SFB 459 *Formgedächtnistechnik* (Sprecher: Prof. Dr. G. Eggeler)

vorge stellt, der zweite Beitrag präsentiert ein Projekt aus dem SFB 491 *Magnetische Heteroschichten: Struktur und elektronischer Transport* (Sprecher: Prof. Dr. H. Zabel) und der dritte Beitrag gibt einen Überblick über den SFB 558 *Metall - Substrat - Wechselwirkungen in der heterogenen Katalyse* (Sprecher: Prof. Dr. Ch. Wöll). Im letzten Beitrag stellt sich Prof. Dr. Martin Hofmann als neues Mitglied im Materialforum vor, der für die Leitung der Arbeitsgruppe für Werkstoffe der Mikroelektronik in der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik gewonnen werden konnte.

## Aktuelle Forschung im SFB 459 "Formgedächtnistechnik"

Im Sonderforschungsbereich 459 "Formgedächtnistechnik" arbeiten Wissenschaftler aus verschiedenen naturwissenschaftlichen und ingenieurwissenschaftlichen Fakultäten der Ruhr-Universität Bochum zusammen, die versuchen, den faszinierenden Formgedächtnislegierungen (FGL) zu einem breiten Durchbruch zu verhelfen. FGL werden manchmal den smarten bzw. intelligenten Werkstoffen zugerechnet. Mit dieser Bezeichnung ist gemeint, daß solche Werkstoffe (i) beim Einwirken eines äußeren Reizes mit einer Änderung der Festigkeit, bzw. einer anderen strukturellen oder funktionellen Größe reagieren, dass sie (ii) in der Lage sind Bewegungen auszuführen und Kräfte auszuüben, und dass es (iii) im Prinzip möglich ist, z.B. bei einer Widerstandsmessung, ein Feedback bei einer Geometrie- oder Eigenschaftsänderung zu erhalten. Es gibt drei wichtige FGL-Effekte: Beim Einwegeffekt verformt man das Material. Es behält die neue Form zunächst bei. Führt man Wärme zu, dann

nimmt es seine ursprüngliche Form wieder an. Beim Zweiwegeeffekt kann man durch Temperaturänderung zwischen einer Hochtemperaturform und einer Tieftemperaturform hin- und herschalten. Und im pseudoelastischen Bereich lassen sich mit dem Material große reversible Dehnungsbeträge erzielen, wobei Plateauspannungen beobachtet werden, die sich über große Dehnungsbereiche nicht ändern. Für alle drei Phänomene ist die martensitische Phasenumwandlung wichtig. Es handelt sich um eine diffusionslose strukturelle Phasenumwandlung erster Ordnung. Man beobachtet martensitische Umwandlungen, wenn Ausgangs- und Produktphase durch eine scherungsdominierte Gittertransformation ineinander übergeführt werden können. Es handelt sich um einen kooperativen Scherprozess großer Gruppen von Atomen. Sie erfolgt auch im Falle von Legierungen ohne Konzentrationsänderung. Es gibt immer bestimmte kristallographische Beziehungen

zwischen Gittern, die durch so einen Scherprozess ineinander umwandeln können. Die Erforschung der martensitischen Umwandlung in Ni-reichen NiTi-Legierungen mit Ausscheidungsteilchen stellt einen Schwerpunkt der materialwissenschaftlichen Arbeiten im SFB 459 dar. Bild



Bild 1: NiTi-Martensit im Durchstrahlungselektronenmikroskop.

1 zeigt eine durchstrahlungselektronenmikroskopische Aufnahme von Martensit in NiTi.

Für die technische Anwendung der Legierungen mit Formgedächtnis muss ganz besonders zwei Aspekten Rechnung getragen werden: (1) Sie müssen als Halbzeug gleichbleibend guter Qualität (mit bestimmten funktionellen und strukturellen Eigenschaften) wirtschaftlich hergestellt werden können. (2) Es müssen Konstruktionsprinzipien für Anwendungen gefunden werden, die den besonderen Eigenschaften und Grenzen dieser Werkstoffe angemessen sind. Deshalb

K. Theis-Bröhl, H. Zabel

## Magnetische Heteroschichten

Ferromagnetische Materialien sind seit dem klassischen Altertum bekannt. Antiferromagnetische Materialien wurden erst in den 50iger Jahren des vorigen Jahrhunderts vorausgesagt und kurz danach mit Hilfe von Neutronenstreuung nachgewiesen. Seit dieser Zeit haben wir sehr viel über Magnetismus gelernt. Phasendiagramme und kritisches Verhalten von ferro-, antiferro-, und exotischen magnetischen Ordnungen wurden von den Physikern experimentell untersucht und theoretisch beschrieben. Gleichzeitig wurden weich- und hartmagnetische Materialien von den Ingenieuren für die unterschiedlichsten Anwendungen entwickelt. Seit den 70iger Jahren ist die Vakuumtechnik stetig und sehr erfolgreich verbessert worden. Damit ging eine stetige Verbesserung der Qualität von dünnen magnetischen Schichten einher, die mit unterschiedlichsten Methoden hergestellt wurden. Anfang der 80iger Jahre hielt die Molekularstrahlepitaxie

müssen im Bereich der FG-Technik, mehr als anderswo, grundlagenorientierte Werkstoff-Forscher und Anwender zusammenarbeiten. In der ersten Förderphase des SFB 459 hat diese Zusammenarbeit zwischen Naturwissenschaftlern und Ingenieuren sehr gut funktioniert; der SFB 459 bereitet sich in diesem Sommer intensiv auf die Begutachtung seines Antrags für eine zweite Förderphase vor. Dabei soll die Medizintechnik (Werkzeuge und Implantate) stärker berücksichtigt werden und es soll außerdem ein Schritt in Richtung kleinerer Dimensionen (Mikroaktoren) erfolgen.

(MBE) Eingang in die Herstellung von magnetischen dünnen Schichten. Bei der MBE-Methode werden Metalle auf kristalline Substrate unter Bedingungen eines Ultrahochvakuums ( $<10^{-9}$  mbar) aufgedampft. Die metallischen und magnetischen Schichten sind dann ebenfalls kristallin und haben einen hohen Grad an chemischer Reinheit, der häufig den von Volumenkristallen um ein Vielfaches übertrifft. Mit dieser neuen Aufdampftechnik konnten Schichtqualitäten erreicht werden, wie man sie nur von Halbleiter-Heterostrukturen kannte. Der besondere Vorteil der modernen Aufdampftechniken lag auch in der Herstellung von magnetischen Heteroschichten. Heteroschichten bestehen aus unterschiedlichen Materialien, die durch scharfe Grenzflächen

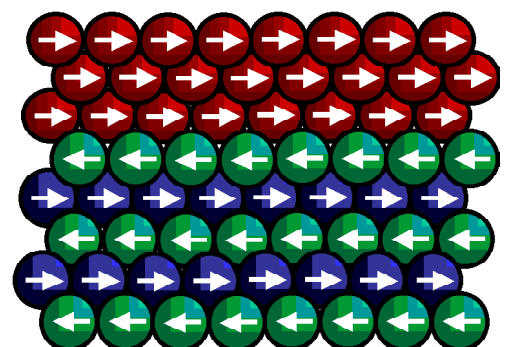


Bild 2

getrennt sind und sich über die gemeinsame Grenzfläche gegenseitig beeinflussen können. Dies ermöglicht ein Maßschneiden von wohldefinierten magnetischen Eigenschaften. Heute werden ultradünne magnetische Heteroschichten als Magnetfeldsensoren in Leseköpfe von Festplatten sowie als Winkelsensoren in Maschinen und Bremssystemen eingebaut. Von besonderer Bedeutung sind Heteroschichten, bei denen ferro- und antiferromagnetische Schichten in Kontakt sind, wie sie schematisch in Bild 2 dargestellt sind. Die Pfeile deuten die Richtung der magnetischen Momente in den jeweiligen atomaren Lagen an. Die gegenseitige Beeinflussung

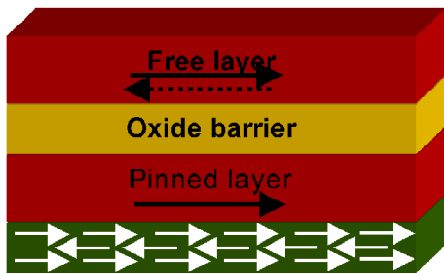


Bild 3

ist hier dergestalt, dass das Zentrum der ferromagnetischen Hysterese systematisch in eine bestimmte Feldrichtung verschoben ist. Dies wird als Austausch-Asymmetrie bezeichnet. Sie wird in der zukünftigen Speichertechnologie eine entscheidende Rolle spielen, da mit ihrer Hilfe polarisierte Elektronenströme bei definierten Magnetfeldern geschaltet werden können. Ein Bauelement, welches dieses Schalten in Form eines ‚Spinventils‘ mit Hilfe einer antiferromagnetischen Unterlage ausnutzt, ist in Bild 3 schematisch wiedergegeben. In der Festkörperphysik der RUB

werden magnetische Heteroschichten mit Austausch-Asymmetrie hergestellt. Insbesondere untersuchen wir die Grenzfläche von ferromagnetischem Co mit antiferromagnetischem CoO. Mit Neutronenstreuung an diesen ultradünnen Heteroschichten wollen wir die mikroskopische Ursache für die Hystereseverschiebung genauer verstehen und quantitativ mit den Eigenschaften der Grenzfläche und der Defektstruktur innerhalb des Antiferromagneten in einen Zusammenhang bringen. Dazu wird die magnetische Hysterese der Heteroschichten mit magneto-optischen Methoden und mit Hilfe von Neutronenstreuung untersucht und verglichen. Typisch verschobene Hysteresen für verschiedene Temperaturen sind in Bild 4 wiedergegeben. Unsere Ergebnisse zeigen, dass zwischen der ferro- und der antiferromagnetischen Schicht noch eine weitere magnetische Zwischenschicht vorhanden sein muss. Die Zwischenschicht weist eine hohe Unordnung der magnetischen Momente auf, und kann leicht durch äußere Magnetfelder beeinflusst werden. Sie hängt außerdem von der Rauigkeit der Grenzfläche ab. Es muss jetzt noch geklärt werden, welchen Einfluss die Zwischenschicht nicht nur auf die Verschiebung, sondern auch auf die Breite der Hysterese, d.h. auf ihre Koerzitivität, hat.

Diese Arbeiten werden von dem Sonderforschungsbereich „Magnetische Heteroschichten: Struktur und Transport“ (SFB 491) der DFG unterstützt.

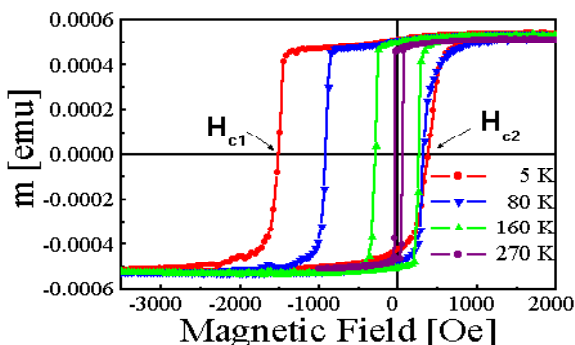


Bild 4

W. Grünert

## Metall-Substrat-Wechselwirkungen in der heterogenen Katalyse

Heterogene Katalysatoren spielen heutzutage in der chemischen Industrie eine überragende Rolle, sie sind aber – als Abgaskatalysatoren im Automobil oder im Selbstreinigungssystem moderner Haushaltsbacköfen – auch ins Alltagsleben unserer Gesellschaft tief eingedrungen. Obwohl mehr als 80 % aller industriellen chemischen Prozesse – mit steigender Tendenz – katalytische Verfahrensschritte enthalten, gibt es im molekularen Verständnis der heterogenen Katalyse noch erhebliche Lücken. Die Funktionsweise heterogener Katalysatoren aufzuklären ist deshalb ein lohnendes Forschungsziel. Es ist jedoch außerordentlich schwierig zu erreichen, weil heterogene Katalysatoren über ihre Oberflächen wirken, die wegen der oft porösen Textur der Untersuchung schwer zugänglich sind. Außerdem sind reale Katalysatoren i.a. komplexe Feststoffgemische, deren Komponenten Wechselwirkungen miteinander eingehen, deren Oberflächen sich in Abhängigkeit von den Reaktionsbedingungen verändern.

Zahlreiche Katalysatoren enthalten Metalle, die zur

Gewährleistung hoher Oberflächen (kleiner Partikeldimensionen) auf anorganische Träger hoher Oberfläche aufgebracht und durch sogenannte Promotoren in ihrer Wirkung modifiziert werden. Inzwischen weiß man, dass auch zahlreiche Trägermaterialien die Eigenschaften der Metallkristallite beeinflussen. Diese Wechselwirkungen zwischen Metall und Substrat (Träger, Promotor) werden im SFB unter die Lupe genommen, z. Zt. bevorzugt am Beispiel des Kupfer-Zinkoxid-Systems, das die Grundlage des industriellen Katalysators der Methanolsynthese darstellt.

Der SFB vereinigt Wissenschaftler verschiedener Gebiete der Chemie (physikalische, anorganische, theoretische, technische Chemie), der Physik, der Mineralogie und der Werkstoffwissenschaft. Entsprechend interdisziplinär ist das Herangehen: Neben grundlegenden Projekten über die Bedeutung der Metall-Träger-Wechselwirkung für die Methanolsynthese, die Steuerung der Selektivität, den Einsatz kombinatorischer Methoden zum Studium von Substrateinflüssen, über die Charakterisierung realer Katalysatoren mit innovativen

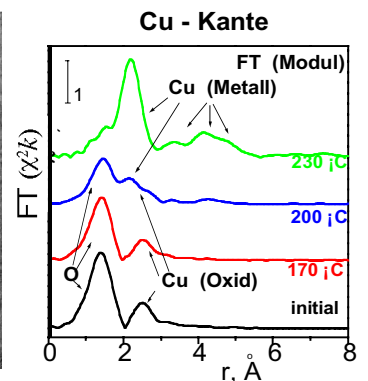
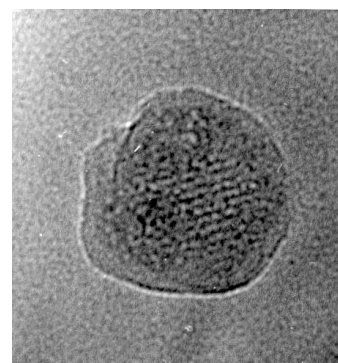


Bild 5: links – transmissionselektronenmikroskopische Aufnahme von Kupferoxidclustern in der regulären mesoporösen Matrix MCM-48 (A. Birkner, H. Gies), rechts – in-situ-EXAFS-Studie der Reduktion dieser Kupferoxidcluster in Wasserstoff (O. P. Tkachenko, W. Grünert)

Techniken (u.a. Röntgenemissionspektroskopie, Elektronenmikroskopie) widmen sich zahlreiche Arbeiten der Schaffung von Modellsystemen zum Studium der Cu-ZnO-Wechselwirkung: Polyoxometallatsysteme als Modelle für ZnO, metallorganische Verbindungen mit Cu/Zn-Wechselwirkungen, Cu/ZnO-Einschlüsse in geordneten Mikro- und Mesoporensystemen (s. Bild 5). Auch quantenchemischen Modellen

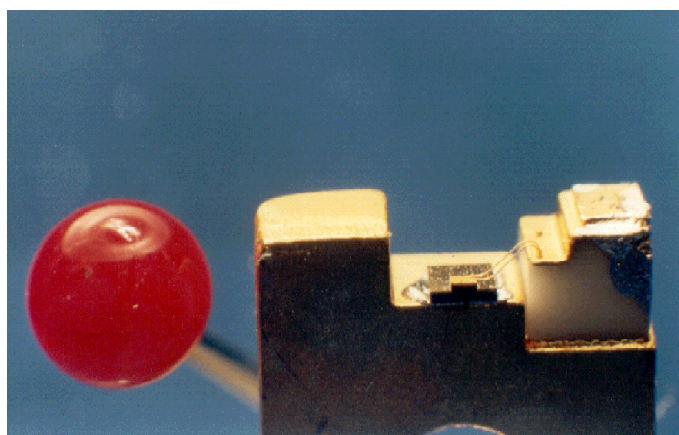
für den Träger ZnO, seine Wechselwirkung mit Kupfer sowie für die Adsorption von Reaktionsteilnehmern werden etabliert und untersucht. Gegenwärtig bereitet sich der SFB auf die Antragstellung zur zweiten Förderperiode vor. Bewährte Forschungsansätze werden am System Cu/ZnO vertieft werden, jedoch soll der Blickwinkel durch Einbeziehung verwandter Metalle und Trägermaterialien erweitert werden.

N. Gerhardt, M. Hofmann

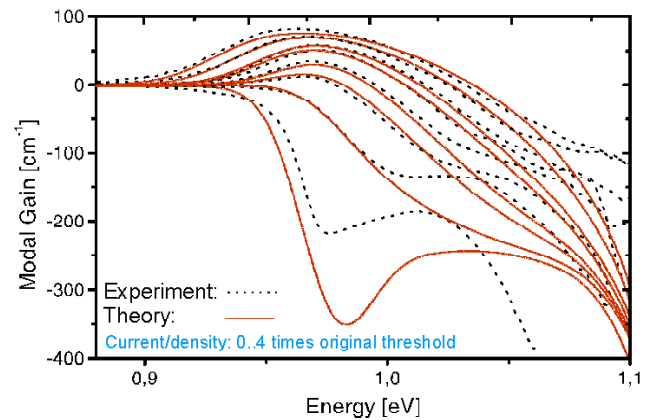
## Neue aktive Materialien für Halbleiterlaser

Halbleiterlaser sind aus vielen modernen Anwendungen nicht mehr wegzudenken. Diese Anwendungen gehen inzwischen weit über die klassischen Bereiche wie optische Datenspeicherung (ein CD-Spieler findet sich heute in fast jedem Haushalt) und optische Nachrichtentechnik (Telefon, Internet) hinaus. Weitere Einsatzbereiche sind die Drucktechnik, die Umweltmesstechnik, die Medizintechnik und die Spektroskopie in der Grundlagenforschung. Trotz ihrer geringen Größe (vgl. Bild 6) werden Hochleistungs-Halbleiterlaser darüber hinaus auch zunehmend zur Materialbearbeitung eingesetzt und ersetzen damit andere, deutlich teurere Lasersysteme. Trotz des enormen Marktes für Halbleiterlaser gibt es immer noch wichtige ungelöste Probleme.

So steht zum Beispiel bis heute kein Halbleitermaterial ausreichender Qualität zur Verfügung, das die Massenerstellung grüner oder gelber Laserdioden gestatten würde. Dies würde den Durchbruch für das "Laser-Fernsehen" bedeuten. Aber auch in den traditionellen Einsatzfeldern von Halbleiterlasern gibt es weiteres Optimierungspotential, das materialwissenschaftliche Fragestellungen beinhaltet. So besteht beispielsweise in der optischen Nachrichtentechnik Bedarf an Halbleiter-Mikrolasern mit Emissionswellenlängen um 1300 oder 1550 nm. Der Vorteil solcher Mikrolaser ist, dass sich ihre Emissionswellenlänge exakt einstellen lässt, so dass – ähnlich wie beim Radio – Daten auf genau definierten unterschiedlichen Wellenlängen-



**Bild 6:** Halbleiterlaser im Größenvergleich mit einem Stecknadelkopf.



**Bild 7:** Experimentelle und theoretische Verstärkungsspektren eines MBE-gewachsenen (GaIn)(NAs)/GaAs-Quantenfilm-Rippenwellenleiter-Lasers

Kanälen übertragen werden können (sogenanntes "Wavelength Division Multiplexing"). Die herkömmlichen, InP-basierenden Halbleitermaterialien verursachen aber bei der Herstellung solcher Mikrolaser erheblichen technologischen Mehraufwand, der durch den Einsatz neuer, GaAs-basierender Materialien umgangen werden könnte. Das derzeit wichtigste Materialsystem in diesem Zusammenhang ist der metastabile Halbleiter (GaIn)(NAs)/GaAs. Metastabil bedeutet, dass der Halbleiterkristall sich nicht im thermodynamischen Gleichgewicht befindet. Daher können die Materialeigenschaften ganz erheblich durch den Wachstumsprozess gesteuert werden.

Wir beschäftigen uns mit dem Design und der Charakterisierung von (GaIn)(NAs)/GaAs-Halbleiterlasern und mit der Untersuchung der optischen Eigenschaften des neuen Materials. Von zentraler Bedeutung ist dabei die Messung der optischen Verstärkung. Bild 7 zeigt von uns gemessene Verstärkungsspektren einer (GaIn)(NAs)/GaAs-Laserstruktur (B. Borchert, A. Yu. Egorov und H. Riechert, Infineon Technologies) im Vergleich zur theoretischen Modellierung (J. Hader und J.V. Moloney, Univ. of Arizona und S.W. Koch, Uni Marburg). Die hervorragende Übereinstimmung belegt, dass das aktive Material aus Quantenfilmen besteht, d.h. wie durch das Wachstum vor-

gegeben nur eine Nanostrukturierung in der Wachstumsrichtung beinhaltet. Messungen an Proben, die mit anderen Wachstumsmethoden hergestellt wurden (W. Stolz, Uni Marburg) zeigen dagegen, dass unter diesen Bedingungen auch eine selbstorganisierte Nanostrukturierung in der Filmebene stattfindet und sich lokalisierte Bereiche mit unterschiedlichen elektronischen Eigenschaften ausbilden. Die weitere Untersuchung dieser Effekte wird zum einen zeigen, ob es sich bei diesen Strukturen um sogenannte "Quantenpunkte" handelt und zum anderen, inwieweit sich die strukturellen, elektronischen und optischen Eigenschaften dieser Strukturen durch den Wachstumsprozess beeinflussen lassen.

### Impressum

**Herausgeber:**  
Koordinationsausschuss der  
RUB-Materialwissenschaften

**Redaktion und Gestaltung:**  
Dr. M. Carroll  
Institut für Werkstoffe

**Autoren:**  
Prof. Dr. G. Eggeler  
Dipl.-Phys. N. Gerhardt  
Prof. Dr. W. Grünert  
Prof. Dr. M. Hofmann  
Prof. Dr. U. Kunze  
PD Dr. B. Skrotzki  
PD Dr. K. Theis-Bröhl  
Prof. Dr. H. Zabel

**Druck:**  
Gebr. Hoose GmbH, Bochum