



# GMe-Forum 2001

Kurzfassungen der  
Posterpräsentationen

TU Wien, 5. und 6. April 2001

Gesellschaft für Mikroelektronik  
Wien, 2001

Gesellschaft für Mikroelektronik  
p.Adr. Institut für Industrielle Elektronik und Materialwissenschaften  
Technische Universität Wien  
Gusshausstraße 27–29/366  
1040 Wien

# Posterbeiträge

## Reinraum Wien

- B. BASNAR et al. *Kontrastmechanismen in der Rasterkapazitätsmikroskopie und der Einfluss der Dotierung auf die Signalgröße*
- R. BRATSCHITSCH et al. *Kohärente THz-Emission von optisch gepumpten parabolischen Quantenwells*
- S. HARASEK et al. *Ultradünne Siliziumdioxidschichten: Herstellung und Charakterisierung*
- P.O. KELLERMANN et al. *Multiwellenlängen-Laserdioden-Array basierend auf Oberflächenmodenkopplung*
- R. KOLM et al. *Quantitative SIMS Analysen von GeSi-CVD-Strukturen*
- H. LANGFISCHER et al. *Ionenstrahlunterstützte lokale Wolframabscheidung*
- M. LITZENBERGER et al. *Laser-Interferometric Investigation of Triggering Behavior in CMOS and Smart Power Technology Electrostatic Discharge (ESD) Protection Structures*
- A. LUGSTEIN et al. *Integrierte Ultramikroelektrode für hochaufgelöste topographische und elektrochemische Oberflächenanalysen*
- C. PACHER et al. *Untersuchung von quantenmechanischen Antireflexbeschichtungen für undotierte GaAs/AlGaAs-Übergitter mittels Ballistischer Elektron Spektroskopie*
- D. RAKOCZY et al. *Ballistische Elektronen-Emissionsspektroskopie von GaAs-AlGaAs Übergittern im transversalen Magnetfeld*
- G. STRASSER et al. *Epitaktisches Wachstum von gitterangepassten und verspannten III-V Verbindungen*
- J. ULRICH et al. *Terahertz-Quantenkaskadenemitter: Intra- versus Interwell-Emission*
- H. WANZENBOECK et al. *Sublithographische Siliziumoxid-Strukturen für die Phasenshift-technologie*

## Reinraum Linz

- T. BERER et al. *Herstellung von AlGaAs-Punktkontakten für elektrische Messungen*
- A. DANIEL et al. *Dehnungsmodulation in Si unterhalb von strukturierten Oxid-Streifen*
- D. GRUBER et al. *Characterization of Si/Si<sub>1-x-y</sub>Ge<sub>x</sub>C<sub>y</sub> Heterostructures for Device Applications*

- K. HIMMELBAUER et al. *Außergewöhnliche magnetische Eigenschaften von sehr dünnen Eisenschichten*
- K. HINGERL et al. *Zerstörungsfreie optische Messverfahren für die Materialcharakterisierung während der Herstellung von dünnen Halbleiterschichten*
- G. KOCHER et al. *Erbium in SiO<sub>x</sub>-Umgebung: Möglichkeiten zur Verbesserung der Emission bei 1,54 μm*
- W. MÄRZINGER et al. *In-line Prozesskontrolle mit einem kompakten Echtzeit-FTIR-Spektrometer*
- R.T. LECHNER et al. *Molecular Beam Epitaxy of Self-Organized PbSe Quantum Dot Superlattices*
- N. SANDERSFELD et al. *Conduction Electron Spin Resonance in MBE-Grown Si/SiGe Quantum Wells*
- N. SANDERSFELD et al. *Modulation Doped Si/Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub>-Field-Effect Transistors*
- T. SCHWARZL et al. *Stark verstimzte Resonanzen in IV-VI Mikroresonatoren und Mikrodisk: Modenaufspaltung und Lasertätigkeit*
- H. SITTE et al. *In situ-Kontrolle der Herstellung von Galliumnitrid-Schichten*
- H. SITTE et al. *Kristalline dünne Filme aus Para-Hexaphenyl hergestellt mit Hot-Wall-Epitaxie*
- J. STANGL et al. *Nanotomographie an SiGe-Strukturen*
- K. WIESAUER et al. *Nano-Scale Dislocation Patterning in PbTe on PbSe (100) Heteroepitaxy Studied by Scanning Tunneling Microscopy*

# Posterpräsentation Reinraum Wien



# Kontrastmechanismen in der Rasterkapazitätsmikroskopie und der Einfluss der Dotierung auf die Signalgröße

B. Basnar<sup>a)</sup>, S. Golka<sup>a)</sup>, E. Gornik<sup>a)</sup>, B. Löffler<sup>b)</sup>, M. Schatzmayer<sup>b)</sup>,  
H. Enichlmair<sup>b)</sup>, J. Smoliner<sup>a)</sup>,

a) Institut für Festkörperelektronik, TU-Wien, Floragasse 7, A-1040 Wien

b) Austria Mikro Systeme International AG, Schloss Premstätten,  
A-8141 Unterpremstätten

Die Rasterkapazitätsmikroskopie (Scanning Capacitance Microscopy, SCM) ist eine Abart der Rasterkraftmikroskopie, bei der die Probe mit einer feinen metallisch leitfähigen Nadel abgetastet und simultan die Topographie und die lokale Kapazität gemessen wird. Aus der lokalen Kapazität zwischen Nadel und Probe kann die lokale Dotierstoffkonzentration im Halbleiter bestimmt werden.

In dieser Arbeit werden die physikalischen Prozesse untersucht, welche für den dotierungsabhängigen Kontrast in der Rasterkapazitätsmikroskopie verantwortlich sind. Auf mittels CVD hergestellten stufenförmigen Dotierprofilen in Silizium konnte gezeigt werden, dass nur dann ein monotonen Verhalten des SCM Signals in Abhängigkeit von der Dotierung besteht, wenn die äußere Spannung so eingestellt wird, dass sich die Probe in „accumulation“ oder „depletion“ befindet. Im Übergangsbereich ist das Verhalten nicht monoton, sodass je nach angelegter Spannung jede beliebige Dotierung das maximale SCM Signal erzeugen kann. Es konnte weiterhin gezeigt werden, dass das beobachtete Verhalten in guter Übereinstimmung mit der konventionellen Theorie des Metall-Oxid-Halbleiter-Übergangs erklärt werden kann.

# Kohärente THz-Emission von optisch gepumpten parabolischen Quantenwells

R. Bratschitsch, T. Müller, G. Strasser und K. Unterrainer

Institut für Festkörperelektronik, TU Wien

Kürzlich berichte SEKINE et al. von optisch gepumpter THz Emission von gittergekoppelten Intrasubband-Plasmonen in einem dotierten Quantenwell (QW) [1]. Wir zeigen, dass modulationsdotierte parabolische Quantenwells (PQWs) kohärente THz Strahlung bei der Intersubband-Frequenz emittieren, wenn sie mit Femtosekundenpulsen im nahen Infrarot angeregt werden.

Die in den Experimenten verwendeten Proben sind modulationsdotierte GaAs/AlGaAs PQWs, mit einer Breite von 1200 – 2000 Å und Ladungsträgerdichten von  $1.7 \times 10^{11}$  -  $5 \times 10^{11}$  cm<sup>-2</sup>. Bei optischer Anregung mit kurzen Laserpulsen (780 nm,  $\tau_{\text{FWHM}} = 80$  fs) eines PQWs mit einer Breite von  $W = 1400$  Å zeigt die THz-Autokorrelationsmessung THz-Emission bei zwei Frequenzkomponenten, einer breiten bei 0.8 THz und einer schmalen (FWHM: 0.3 THz) mit einer Mittelfrequenz von 2.55 THz. Diese zwei Emissionsfeatures finden sich bei einer Anregung im Bereich von 815 bis zu 760 nm.

Es zeigt sich, daß die Breitbandkomponente in der Frequenz schiebt, die Emission bei 2.55 THz aber sich nicht verändert, wenn man die Zahl der optisch angeregten Ladungsträger im Quantenwell verändert. Die breitbandige Komponente tritt bei allen PQWs auf und zeigt ungefähr dieselbe Frequenzabhängigkeit; sie ist also unabhängig vom speziellen Design des PQWs. Sie rührt von der Emission von THz Strahlung an der Oberfläche der Probe her. Die schmalbandige Komponente hingegen wird durch die Oszillation von Ladungsträgern im parabolischen Potential des QWs erzeugt [2]. Dies ist die Resonanzfrequenz des Intersubbandplasmons des PQWs. Eine grobe Abschätzung der Schwingungsfrequenz ergibt 2.2 THz, was in hinreichender Übereinstimmung mit dem gemessenen Wert ist. Da die Intersubbandplasmon-Frequenz nur von den geometrischen Parametern wie Breite oder Höhe des Wells abhängt, hat man damit die Möglichkeit, einen THz-Emitter für die gewünschte Frequenz zu designen.

[1] N. Sekine, K. Yamanaka, K. Hirakawa, M. Voßbürger, P. Haring-Bolivar und H. Kurz, Appl. Phys. Lett. 74, 1006 (1999).

[2] R. Bratschitsch, T. Müller, R. Kersting, G. Strasser und K. Unterrainer, Appl. Phys. Lett. 76, 3501 (2000).

# Ultradünne Siliziumdioxidschichten: Herstellung und Charakterisierung

S. Harasek, S. Golka, J. Smoliner und E. Bertagnoli

Institut für Festkörperelektronik, TU Wien

Die Technologie ultradünner Schichten stellt einen immer bedeutender werdenden integralen Bestandteil der Fertigung mikroelektronischer Bauelemente dar. Mit der anhaltenden Verkleinerung der lateralen Strukturdimensionen geht die Verringerung der vertikalen Schichtdicken einher. Im Bereich der dielektrischen Schichten liegt das Hauptaugenmerk nach wie vor auf Siliziumdioxid. Der Anwendungsbereich dieses Materials im Bereich der Mikroelektronik erstreckt sich von der Isolation von Leiterbahnen auf Halbleiterchips bis zur Ladungsspeicherung in Kondensatoren. Insbesondere bei der Verwendung als Gatedielektrikum in MOSFETs ist das weitere Abnehmen der Oxiddicke zur Aufrechterhaltung günstiger Device-Eigenschaften mit abnehmenden Gatelängen unumgänglich. Die besten elektrischen Eigenschaften von Siliziumdioxidschichten werden bei der Herstellung durch thermische Oxidation von Silizium erreicht. In dieser Arbeit wurden daher Schichten mit Dicken von wenigen Nanometern, wie sie von besonderem technologischen Interesse sind, durch thermische Oxidation erzeugt. Die oxidierten Substrate wurden zu Metal-Oxid-Semiconductor (MOS)-Kondensatoren komplettiert und die elektrische Charakterisierung der ultradünnen Oxidschichten erfolgte durch Kapazitäts-Spannungs-Messungen sowie Strom-Spannungs-Messungen. Ein Vergleich der gemessenen  $C(U)$ -Kurven mit simulierten Kurven zeigt, daß das in den Simulationen verwendete einfache MOS-Modell auch im Bereich ultradünner Isolatoren angewendet werden kann.

# **Multiwellenlängen-Laserdioden-Array basierend auf Oberflächenmodenkopplung**

**P.O. Kellermann, N. Finger, E. Gornik**

**Institut für Festkörperelektronik, TU Wien**

**M. Ost, F. Scholz**

**4. Physikalisches Institut, Universität Stuttgart**

Das Prinzip dieser GaInP/AlGaInP Laserdioden basiert auf einem durch ein Oberflächengitter bedingten Koppelmechanismus zwischen Lasermode und Oberflächenmode. Für die Oberflächenmode wird an der Oberfläche des Lasers eine Wellenleiterschicht (Metall/Dielektrikum) aufgebracht. Das Gitter bewirkt Abstrahlungsverluste der Lasermode, welche durch den Anregungs- und Rückkopplungsprozess der Oberflächenmode nur in einem engen spektralen Bereich wesentlich verringert werden. Dieser effektive Gewinnmechanismus führt zur Monomodigkeit. Die unterschiedlichen Emissionswellenlängen der Laser werden über die Dicke der Wellenleiter (nominell 8 nm Differenz zwischen zwei benachbarten Lasern auf dem Array) und den daraus resultierenden verschiedenen Dispersionsrelationen der Oberflächenmoden postepitaktisch eingestellt.

Oberflächenemission mit geringer Strahldivergenz ( $0.1^\circ \times 10^\circ$ ) wird ebenfalls durch das Gitter erzielt. Die Laser emittieren im Bereich von 681.5 nm bis 686.8 nm mit einer Wellenlängendifferenz von  $0.76 \pm 0.05$  nm zwischen zwei benachbarten Lasern. Eine Seitenmodenunterdrückung von 30 dB und eine spektrale Linienbreite von weniger als 0.1 nm wurden im Gleichstrombetrieb erreicht.

# **SIMS-Analyse von SiGe-CVD-Strukturen**

**R. Kolm, J. Foisner, K. Piplits, H. Hutter**

**Institut für Analytische Chemie, TU Wien**

Um mittels CVD Strukturen herzustellen, ist eine Kalibrierung der Flüsse der zur Synthese verwendeten Gase gegen die Konzentration der Elemente in der Probe vorzunehmen. Des Weiteren ist die auf den unterschiedlichen Gasflüssen abhängige Wachstumsgeschwindigkeit zu bestimmen. Dazu wurden Proben zur Multi-Parameter Kalibrierung hergestellt. Jedes dieser Schichtsysteme wurde mittels CVD aus  $\text{SiH}_4$ ,  $\text{GeH}_4$  und  $\text{B}_2\text{H}_6$  epitaktisch auf Silizium hergestellt. Die Gasflüsse von  $\text{GeH}_4$  und  $\text{B}_2\text{H}_6$  wurden von Schicht zu Schicht geändert. Von dieser Kalibrierung ausgehend ließ man eine Schicht, in der die Germanium-Konzentration linear ansteigt, epitaktisch auf Silizium aufwachsen. Darüber brachte man eine Schicht mit konstanter Bor-Konzentration auf. Dann wurde die Probe einem RTA Schritt unterworfen, wobei Bor in die Germanium enthaltende Schicht diffundierte.

# **Ionenstrahlunterstützte lokale Wolframabscheidung**

**H. Langfischer, B. Basnar, E. Bertagnolli**  
**Institut für Festkörperelektronik, TU Wien**

**H. Hutter**  
**Institut für analytische Chemie, TU Wien**

Die vorgestellte Arbeit beschäftigt sich mit der direkten lokalen Abscheidung von Wolfram aus der organischen Wolfram-Verbindung  $W(CO)_6$  (Wolfram-Hexacarbonyl) mittels eines fokussierten  $Ga^+$ -Ionenstrahls (Focused Ion Beam, FIB).

Die Prozessierung verschiedenartiger Teststrukturen erlaubt es eine Reihe von physikalischen Analyse- und Charakterisierungsverfahren einzusetzen. Dadurch ist die umfassende Beschreibung der Eigenschaften des erzeugten Wolframs in Abhängigkeit von der Wahl der Prozessparameter möglich.

Aus elektrischen Messungen werden der spezifische Widerstand und die Kontakteigenschaften des Materials bestimmt. Für den materialanalytischen Teil der Untersuchungen wurde Sekundärionen-Massenspektroskopie (SIMS) eingesetzt.

Raster-Kraft-Mikroskopie (AFM) und der Abbildungsmodus des rasternden Ionenstrahls (durch Detektion von Sekundärelektronen und -ionen) stellen die bildgebenden Verfahren dar. Erstmals wird die zeitaufgelöste Untersuchung der lokalen Abscheidung von Wolfram mit 50 keV  $Ga^+$ -Ionen präsentiert.

# Laser-Interferometric Investigation of Triggering Behavior in CMOS and Smart Power Technology Electrostatic Discharge (ESD) Protection Structures

M. Litzenberger<sup>1</sup>, R. Pichler<sup>1</sup>, C. Fürböck<sup>1</sup>, S. Bychikhin<sup>1</sup>, D. Pogany<sup>1</sup>, E. Gornik<sup>1</sup>,  
K. Esmark<sup>2</sup>, G. Groos<sup>2</sup>, H. Gossner<sup>2</sup> und M. Stecher<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Institut für Festkörperelektronik, TU Wien, Floragasse 7, 1040 Wien

<sup>2</sup> Infineon Technologies, München, BRD

Der Schutz von integrierten elektronischen Schaltung (ICs) gegen elektrostatische Entladungen (ESD) wird mit der Skalierung der Technologien und der Verwendung in immer rauerer Umgebung (z.B. in der Automobilelektronik) immer wichtiger. Die Aufgabe von ESD-Schutzstrukturen die mit jedem I/O-Pad eines ICs verbunden sind, ist es, einen schnellen Entladungspfad zur Masse bereitzustellen und eine Zerstörung des integrierten Schaltkreises und auch der Schutzstruktur selbst zu verhindern. Eine zu starke Erwärmung ist die häufigste Ursache für das Versagen der Schutzstrukturen. Aufgrund nichtlinearer Vorgänge in diesen bipolaren Bauelementen kann es zu inhomogenen Stromfluss in den Strukturen und damit zu stark lokalisierter Erwärmung kommen, was zur Zerstörung der Schutzstruktur führt. Wir haben kürzlich eine auf Laser-Interferometrie beruhende Methode entwickelt, die die nicht-invasive Messung der Temperaturverteilung in ESD Schutzstrukturen während Hochstrombelastung mit einer Zeitauflösung von 10 ns und einer Ortsauflösung von 1.5  $\mu\text{m}$  ermöglicht.

In unserem Beitrag präsentieren wir die Ergebnisse von Untersuchungen der Zündhomogenität und der thermischen Dynamik, sowie Fehleranalysen in ESD-Schutzstrukturen der CMOS- und „Smart Power“-Technologie, die von INFINEON Technologies hergestellt werden.

In gg-nMOS ESD-Schutzstrukturen einer 0.35 $\mu\text{m}$  CMOS Technologie haben wir ein inhomogenes Zünden längs der Weite des Bauelements bei kleinen Strömen und ein homogenes Zünden bei großen Strömen feststellen können. Dieses Verhalten ist mit einer Änderung des differentiellen Widerstandes in der Hochstromkennlinie der Bauelemente korreliert. In Strukturen der „Smart Power“-Technologie konnten wir die Ausbildung von zwei Strompfaden beobachten, die zu starker Erwärmung unter dem Emitter und an der Kante der Basisregion führen. Dabei zeigt sich längs der Strukturweite eine homogene Temperaturverteilung. Die Resultate zeigen gute qualitative Übereinstimmung mit den Ergebnissen elektro-thermischer Bauelementesimulation. Die Stellen, an denen die ESD-induzierten Schäden in den Strukturen auftreten, stimmen sehr gut mit den Maxima der gemessenen Temperaturverteilungen überein.

# Integrierte Ultramikroelektrode für hochaufgelöste topographische und elektrochemische Oberflächenanalysen

A. Lugstein<sup>1)</sup>, C. Kranz<sup>2)</sup>; E. Bertagnoli<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Institut für Festkörperelektronik, TU Wien

<sup>2)</sup> Institut für Analytische Chemie, TU Wien

Ultramikroelektroden zur lateral hochaufgelösten Charakterisierung von Oberflächen liefern quantitative Aussagen über Oberflächenreaktivitäten, Korrosionsprozesse, und Stofftransportphänomene an Membranen und Geweben. Neben der Analyse können sie auf das weite Gebiet der lateral aufgelösten Oberflächenmodifikation mittels Ätzen oder Abscheidens angewendet werden. Voraussetzung hierfür ist jedoch eine exakte, reproduzierbare Abstandskontrolle zwischen Ultramikroelektrode und der Probenoberfläche im Bereich einiger Elektrodenradien.

Im konventionellen Experiment stellt das bei elektrochemischen Oberflächenuntersuchungen erhaltene Bild eine Überlagerung von Einflüssen, insbesondere der elektrochemischen Aktivität und der Distanz zwischen Probenoberfläche und Sonde dar. Bisher untersuchte Lösungsansätze, die auf Scherkraft und piezoelektrischen Testvorrichtungen basieren, schränken die Möglichkeiten der zu untersuchenden Proben stark ein.

Die von uns entwickelte Ultramikroelektrode ermöglicht die gleichzeitige Durchführung der elektrochemischen und topographischen Nahfeldmikroskopie ohne Einschränkung der zu untersuchenden Proben. Wir zeigen die Herstellung und Funktionsweise einer integrierten Ultramikroelektrode basierend auf einem konventionellen AFM  $\text{Si}_3\text{N}_4$  Cantilever als Grundkörper. Auf diesem Grundkörper wird in einem RF-Sputterprozess eine etwa 5 nm dicke Chromschicht und eine 100 bis 400 nm dicke Metallschicht aufgebracht. Die Wahl des Metalls bestimmt die chemische Aktivität der Elektrode. Die Isolation der elektrisch leitenden Schicht gegenüber dem bei der Messung eingesetzten Elektrolyten (Mediator) erfolgt durch eine in einem plasmaunterstützten CVD-Prozess konform abgeschiedene  $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2$ -Sandwichschicht. Das Freilegen der isolierten AFM Spitze und der umgebenden Mikroelektrode erfolgt durch lokales Sputtern mit einem fokussierten Gallium-Ionenstrahl. Dieses Verfahren ermöglicht durch die Wahl der Dicke der aufgetragenen Metallschicht und der Sputterstrategie die Elektrodenfläche als auch den Abstand der Elektrode zur Oberfläche dem Messproblem anzupassen. Darüber hinaus ermöglicht dieses Verfahren die Herstellung unterschiedlicher Elektrodengeometrien (Rahmenelektrode, Rundelektrode). Die simultane Erfassung der Topographie und des elektrochemischen Signals sowie das erzielbare Auflösungsvermögen wird anhand von Modellproben gezeigt. Diese Ultramikroelektrode ermöglichte damit erstmals die topographieunabhängige Aufnahme der elektrochemischen Aktivität beliebiger Probenoberflächen.

# Untersuchung von quantenmechanischen Antireflexbeschichtungen für undotierte GaAs/AlGaAs-Übergitter mittels Ballistischer Elektron Spektroskopie

C. Pacher, M. Kast, C. Coquelin, G. Fasching, G. Strasser, E. Gornik

Institut für Festkörperelektronik, TU Wien

Um den Strom durch Minibänder von Halbleiter-Übergitter (*superlattices*) zu erhöhen, wurde der Einfluss von quantenmechanischen Antireflexbeschichtungen (in Analogie zu optischen Antireflexbeschichtungen) auf die kohärente Transmission  $T(E)$  untersucht. Quantenmechanische Antireflexbeschichtungen für Übergitter bestehen im einfachsten Fall aus einer zusätzlichen Barriere vor und hinter dem Übergitter. Um die Transmission zu erhöhen, muss diese Barriere dünner sein als die Barrieren des Übergitters. Wir konnten u.a. zeigen, dass zusätzliche Barrieren vor und hinter dem Übergitter im Abstand von einer Übergitter-Topfbreite die Transmission optimal erhöhen, wenn sie exakt die halbe Dicke der Übergitter-Barrieren aufweisen. Für die untersuchte Übergitterstruktur steigt die Transmission des ersten Minibandes um einen Faktor 3.1 (berechnet) bzw. 2.4 (experimentell). Für das zweite Miniband beträgt der Anstieg 76% (berechnet) bzw. 35% (experimentell). Der signifikantere Unterschied zwischen Theorie und Experiment im zweiten Miniband ist das Ergebnis der inelastischen LO-Phonon-Streuung, die aufgrund der notwendigen Energie von  $\hbar\omega_{LO}=36\text{meV}$  nur innerhalb des breiteren zweiten Minibandes wirksam wird. Durch diesen Streumechanismus wird die Phasenkohärenz der Elektronen zerstört, was zu einer Reduktion der Wirkung der Antireflexbeschichtung führt.

Weiters wurde die Methode der Ballistischen Elektron Spektroskopie, mit der diese Experimente durchgeführt werden, weiterentwickelt. Die energetische Auflösung konnte auf 10 meV verbessert werden. Die Bestimmung der Form und der Breite der Energieverteilung der ballistischen Elektronen erfolgte mit einer Dreifachbarriere als Analysator.

# **Ballistische Elektronen- Emissionsspektroskopie von GaAs-AlGaAs Übergittern im transversalen Magnetfeld**

**D. Rakoczy, R. Heer, G. Strasser, J. Smoliner  
Institut für Festkörperelektronik, TU Wien**

In dieser Arbeit wird der Elektronentransport durch das niedrigste Miniband eines GaAs-AlGaAs-Übergitters im transversalen Magnetfeld untersucht. Zu diesem Zweck wurde eine einfach herzustellende Probenstruktur entwickelt, welche neben hohen ballistischen Strömen (und daher einem guten Signal-Rausch-Verhältnis) und stabilem Betriebsverhalten (auch im Magnetfeld) überdies die Möglichkeit bietet, die Bandstruktur des zu untersuchenden Übergitters elektronisch zu verspannen. Der Emitter für die ballistischen Elektronen besteht aus einer Al-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Al-Struktur, welche mittels optischer Lithographie auf die zu untersuchende Halbleiter-Heterostruktur aufgebracht wird.

In Abhängigkeit von der am Gitter angelegten Spannung zeigt der ballistische Kollektorstrom ein Maximum bei Erreichen der Flachbandbedingung. Bringt man die Struktur in ein transversales Magnetfeld, so verringert sich die Höhe des Maximums mit stärker werdendem Magnetfeld. Durch eine erweiterte Transfer-Matrix-Methode kann das Phänomen semi-quantitativ beschrieben werden. Die Messdaten zeigen darüber hinaus Strukturen, die darauf schließen lassen, daß die durch das Magnetfeld bedingte verlängerte Verweildauer der Elektronen im Übergitter eine (ohne Magnetfeld nicht stattfindende) Emission von LO-Phononen innerhalb des Übergitters ermöglicht.

# Epitaktisches Wachstum von gitterangepaßten und verspannten III-V Verbindungen

G. Strasser, W. Schrenk

Institut für Festkörperelektronik, TU Wien

Eine funktionierende Wachstumstechnologie stellt die Grundlage für die Herstellung niedrigdimensionaler Systeme und neuartiger optoelektronischer Bauelemente dar. GaAs-Schichten, AlGaAs/InGaAs/GaAs-Vielschichtsysteme (Heterostrukturen), hochbewegliche zweidimensionale Elektronengasstrukturen (2DEGs), resonante Tunneldioden (RTDs), Quantumwell- und Minibandstrukturen, Halbleiterdiodenlaser, Quantum Cascade-Laserstrukturen, Bragg-Spiegel, saturierbare Absorber, und InAs-Quantumdot-Systeme werden am Institut für Festkörperelektronik im Mikrostrukturzentrum epitaktisch hergestellt. Diese Molekularstrahlepitaxieschichten mit Einzeldicken von einzelnen Monolagen bis zu einigen Mikrometern kommen vor allem den Projekten zugute, die mit der Herstellung und Weiterentwicklung neuartiger kohärenter Strahlungsquellen beschäftigt sind. Weiters werden alle Gruppen, die niedrigdimensionale Systeme durch nasschemisches oder reaktives Ionenätzen oder Elektronenstrahlolithographie herstellen und untersuchen, sowie Gruppen die Transportuntersuchungen an GaAs-Verbindungen durchführen, versorgt. Diese Arbeit soll diese Technik einem breiteren Publikum zugänglich machen und einige Beispiele für epitaktisches Wachstum darstellen.

# Terahertz-Quantenkaskadenemitter: Intra- versus Interwell-Emission

J. Ulrich, W. Schrenk, R. Zobl, G. Strasser, K. Unterrainer

Institut für Festkörperelektronik, TU-Wien

Die Machbarkeit eines Quantenkaskadenlasers mit einer Emissionsfrequenz im Bereich einiger Terahertz hängt kritisch von der Gestaltung der Subbandstruktur des Laserüberganges ab. Eine Variation des räumlichen Überlapps der Wellenfunktionen des Ausgangs- und Zielsubbandes beeinflusst sowohl das optische Matrixelement, als auch die Lebensdauer des Ausgangssubbandes. Wegen der komplexen Natur der nichtstrahlenden Übergänge ist die optimale Wahl des Wellenfunktionsüberlapps nicht offensichtlich. Theoretische Betrachtungen haben zu entgegengesetzten Ergebnissen geführt [1], [2]. Bisher wurde Elektrolumineszenz sowohl von Intrawell-Übergängen zwischen den ersten beiden Subbändern eines breiten Quantenwells [3] als auch von Interwell-Übergängen zwischen den Grundsubbändern zweier aneinander grenzender Quantenwells [4] beobachtet. Jedoch fehlte ein systematischer Vergleich bis jetzt.

Wir präsentieren Intersubband-Elektrolumineszenz- und Magnetotransportmessungen an zwei verschiedenen  $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}/\text{GaAs}$  Quantenkaskadenstrukturen [5]. Die Emission der einen stammt von einem Intrawell-, die der anderen von einem Interwell-Übergang. Beide emittieren Strahlung mit Photonenenergien um 20 meV (4.8 THz). Bei der Interwellstruktur beobachten wir eine Starkesche Blauverschiebung der Emissionsenergie mit dem angelegten elektrischen Feld. Aber auch die Intrawellstruktur zeigt eine Linienverschiebung im elektrischen Feld. Die aus der Magnetointersubbandresonanzen [6] gewonnenen Übergangsenergien zeigen das gleiche Verhalten. Außerdem werden die Emissionslinien beider Proben mit wachsendem elektrischen Feld verschmälert. Wir können die Linienverschiebungen und die Linienverschmälerung mit numerischen Bandstrukturrechnungen vorhersagen.

Die Quanteneffizienz der spontanen Emission erreicht bei beiden Proben ihr Maximum bei einem elektrischen Feld, bei dem das aus den drei Subbändern einer Periode der Kaskadenstruktur gebildete Miniband flach ist. Aus der Effizienz der beiden Proben gewinnen wir eine Aussagen über die Lebensdauer des Ausgangszustandes. Beim Interwell-Übergang (kleiner Überlapp) ist die Lebensdauer etwa 23 mal größer als beim Intrawell-Übergang (großer Überlapp). Die spontane Emissionsrate ist etwa im selben Verhältnis kleiner, so dass beide Strukturen ungefähr die gleiche Effizienz aufweisen.

## Referenzen:

- [1] J. H. Smet, C. G. Fonstad, and Q. Hu, *J. Appl. Phys.* **79** (12), 9305 (1996).
- [2] K. Donovan, P. Harrison, and R. W. Kelsall, *Appl. Phys. Lett.* **75**, 1999 (1999).
- [3] M. Rochat, J. Faist, M. Beck, U. Oesterle, M. Illegems, *Appl. Phys. Lett.* **73**, 3724 (1998).
- [4] B. Xu, Q. Hu, and M. R. Melloch, *Appl. Phys. Lett.* **71**, 440 (1997).
- [5] J. Ulrich, R. Zobl, W. Schrenk, G. Strasser, K. Unterrainer, E. Gornik, *Appl. Phys. Lett.* **77**, 1928 (2000).
- [6] J. Ulrich, R. Zobl, K. Unterrainer, G. Strasser, E. Gornik, *Appl. Phys. Lett.* **76**, 19 (2000).

# Sublithographische Siliziumoxid-Strukturen für die Phasenshifttechnologie

H. Wanzenboeck<sup>1</sup>, S. Gergov<sup>1</sup>, U. Grabner<sup>2</sup>, P. Pongratz<sup>2</sup>, H. Störi<sup>3</sup>,  
H. Hutter<sup>4</sup>, B. Basnar<sup>1</sup>, J. Smoliner<sup>1</sup>, E. Bertagnolli<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institut für Festkörperelektronik, TU Wien

<sup>2</sup> Institut für Angewandte und Technische Physik, TU Wien

<sup>3</sup> Institut für Allgemeine Physik, TU Wien

<sup>4</sup> Institut für Analytische Chemie, TU Wien

Die Herstellung von Halbleiterbauelementen mittels optischer Lithographie bedient sich zur Erreichung der kleinen Strukturgrößen spezieller Methoden. In der State-of-the-Art-180 nm Technologie werden die klassischen Auflösungsgrenzen der optischen Lithographie unterschritten. Dies wird ermöglicht durch die Verwendung von kohärenten Lichtquellen und die Verwendung von Phasenshift-Masken. Die für Phasenshift-Masken typische Strukturierung des Quarzglas-Substrates selbst stellt eine wesentliche Fehlerquelle in der Maskenherstellung dar und verringern die Ausbeute deutlich. Eine Methode zur nachträglichen Reparatur von Phasenshift-Masken erlaubt eine signifikante Reduktion der Herstellkosten. Focused Ion Beam-Technologie stellt eine Methode zur lokalen Abscheidung von Siliziumoxid im Sub- $\mu\text{m}$ -Bereich sowie zur lokalen Entfernung von Material durch Sputtern dar. In dieser Arbeit wurden die Möglichkeiten einer Maskenreparatur mittels Focused Ion Beam untersucht.

Mit einem rasterndem  $\text{Ga}^+$ -Ionenstrahl wird lokal auf einer Probenoberfläche eine chemische Gasphasenabscheidung (CVD) von Siliziumoxid induziert. Die  $\text{Ga}^+$ -Ionen haben eine Energie von 50 kV und können zu einem Strahl bis zu 10 nm Durchmesser fokussiert werden. Der fokussierte Ionenstrahl induziert eine Zersetzung und Abscheidung von auf der Substratoberfläche adsorbierten Vorläufersubstanzen. Als Substrat dienen lithographische Masken, Quarz-Wafer oder Silizium-Wafer. Vorläufersubstanzen für die Siliziumabscheidung ist eine Gas Mischung aus Tetramethylcyclotetrasiloxan und Sauerstoff. Die abgeschiedenen Teststrukturen haben eine laterale Ausdehnung zwischen 200 nm und 100  $\mu\text{m}$  und Dicken im Sub- $\mu\text{m}$ -Bereich.

Zur Untersuchung der optimalen Prozessführung wurde eine Variation der komplexen Abscheideparameter wie Gaszusammensetzung, Rastergröße und Scangeschwindigkeit durchgeführt. Es besteht eine Korrelation zwischen den Prozessparametern und der chemischen Zusammensetzung des abgeschiedenen Materials. Die optischen Eigenschaften des abgeschiedenen Siliziumoxides wurden ebenso charakterisiert wie die Oberflächenrauigkeit der hergestellten Strukturen. Mittels TEM-Aufnahmen von Querschnitten von Siliziumoxid-Abscheidungen können Kantengeometrien sowie Interfaces zwischen Materialien detailliert untersucht werden.

Die durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass die Focused Ion Beam-Technology für die Maskenreparatur im Sub- $\mu\text{m}$ -Bereich gut geeignet ist. Die Gallium-Kontamination durch den Ionenstrahl bedingt jedoch eine wesentliche Degradation der optischen Eigenschaften des abgeschiedenen Siliziumoxids. Es wird gezeigt, dass durch geeignete Prozessführung der Galliumgehalt signifikant reduziert werden kann.



# Posterpräsentation Reinraum Linz



# Herstellung von AlGaAs-Punktkontakten für elektrische Messungen

T. Berer<sup>1</sup>, G. Pillwein<sup>1</sup>, G. Brunthaler<sup>1</sup> und G. Strasser<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Institut für Halbleiter- und Festkörperphysik, Johannes Kepler-Universität Linz

<sup>2</sup>Institut für Festkörperelektronik, TU Wien

Bei Strukturgrößen im Bereich von wenigen Nanometern gewinnen Quanteneffekte zunehmend an Bedeutung. Auch bei der fortschreitenden Miniaturisierung der Halbleiterbauelemente werden solche Effekte eine Rolle spielen. Ziel unserer Aktivitäten ist es, Nanostrukturen mit beliebiger Geometrie herzustellen und die auftretenden Quanteneffekte zu untersuchen.

Den Ausgangspunkt für die Herstellung der Punktkontakte bilden hochbewegliche zweidimensionale Elektronengas-Schichten in AlGaAs-Heterostrukturen. Für die elektrischen Messungen wird eine Hall-Geometrie in die leitende Schicht geätzt. Die Quantenstruktur in Form von dünnen „Drähten“ oder Punktkontakten wird durch Elektronenstrahlolithographie definiert und mittels reaktivem Ionenätzen hergestellt. Auch Strukturen mit Schottky-Gate werden verwendet.

Erste Messungen an den Quantenstrukturen zeigen, dass sie bei tiefen Temperaturen leitend sind und sich der Widerstand mit der angelegten Steuerspannung stark ändert. Weitere Messungen zur Phasenkohärenz an den Nanostrukturen sind geplant.

# Dehnungsmodulation in Si unterhalb von strukturierten Oxid-Streifen

A. Daniel, Y. Zhuang, J. Stangl, T. Roch, V. Holý, G. Bauer

Institut für Halbleiter- und Festkörperphysik, Johannes Kepler-Universität Linz

Mit der zunehmenden Miniaturisierung von elektronischen Bauelementen wird die inhomogene Spannungsverteilung unterhalb von strukturiertem  $\text{SiO}_2$  von zunehmender Bedeutung für den elektronischen Transport. Unter Verwendung einer Röntgenbeugungsmethode unter streifendem Einfall der Strahlung wurde ein Verfahren entwickelt, welches es gestattet, die inhomogenen Dehnungen im Silizium in den Grenzflächen nahen Regionen mit hoher lateraler Auflösung zu bestimmen. Durch Variation des Einfallswinkels wird eine Tiefenauflösung erreicht. Es werden Ergebnisse von Experimenten zur Dehnungsverteilung an oxidierten Si-Wafern gezeigt, auf denen in die Oxidschicht lateral periodische Streifen mit einer Breite von etwa 200 nm geätzt wurden.

# Characterization of Si/Si<sub>1-x-y</sub>Ge<sub>x</sub>C<sub>y</sub> Heterostructures for Device Applications

D. Gruber, M. Mühlberger, F. Schäffler

Institut für Halbleiter- und Festkörperphysik, Johannes Kepler-Universität Linz

With the commercial introduction of the Si/SiGe heterobipolar transistor (HBT) into mainstream integration technologies, process compatibilities become an important issue. A basic problem is, for example, the transient enhanced diffusion (TED) of boron out of the SiGe base layer upon thermal activation of the poly-emitter implant. As a remedy, the use of a carbon co-doped base has been proposed, in which a carbon concentration of a few tenths of an atomic percent have been shown to very efficiently suppress TED. On the other hand, great effort has been dedicated in the past to reduce the carbon concentrations in Si ingots as far as possible, because of the propensity of C to form complexes and  $\beta$ -SiC precipitates. In contrast to substitutional C, some of these complexes are known to introduce electrically active states in the band gap. It is therefore important to characterize the microscopic configuration in which C is present after processing of SiGe:C HBTs.

We addressed this problem by a combination of Fourier Transform IR spectroscopy (FTIR), x-ray diffraction, and SIMS studies on MBE-grown HBT structures with implanted poly-Si emitter. With the FTIR technique, we are sensitive to substitutional/interstitial C and different forms of C-C configurations. By proper calibration of the active and reference sample thicknesses we achieve very high sensitivities regarding substitutional C,  $\beta$ -SiC precipitates and some carbon complexes. From this, together with the chemical information we get from SIMS, we find that both complexes, C-C and SiC precipitates play a role in the process.

# Außergewöhnliche magnetische Eigenschaften von sehr dünnen Eisenschichten

K. Himmelbauer, H. Sitter, H. Krenn

Institut für Halbleiter- und Festkörperphysik, Johannes Kepler-Universität Linz

Sehr dünne Eisenschichten auf Halbleiteroberflächen sind wegen ihrer besonderen elektronischen, katalytischen und magnetischen Eigenschaften von großem wissenschaftlichen und praktischem Interesse. Die Übergangsschicht zwischen Halbleiter und Eisen spielt dabei eine ganz wesentliche Rolle. Diese Übergangsschicht kann durch einen gezielten Herstellungsprozess beeinflusst werden, und damit in weiterer Folge die Eigenschaften der Eisenschicht maßgeschneidert werden.

In unserem Projekt wurden die Eisenschichten auf GaAs Substraten mit Hilfe eines Elektronenstrahlverdampfers aufgebracht. In diesem Fall kommt es aber meistens zu einer chemischen Reaktion zwischen GaAs und Fe. Um dies zu vermeiden, wurden die GaAs-Substrate mit einer ZnSe-Zwischenschicht abgedeckt, was mit der sogenannten Molekularstrahlepitaxie durchgeführt wurde, und erst dann mit Fe bedampft.

Die magnetischen Eigenschaften der so hergestellten Eisenschichten wurden mit sogenannten SQUID-Messungen untersucht. Dabei zeigte sich eine deutliche Abhängigkeit der magnetischen Eigenschaften von der Schichtdicke der Eisenschichten. Es konnten zwei verschiedene Sättigungszustände beobachtet werden, die auf die weiche und die harte Achse der magnetischen Ausrichtung zurückzuführen ist. Diese besondere Eigenschaft zeigt sich nicht nur bei tiefen Temperaturen, sondern bleibt bis zur Raumtemperatur erhalten. Diese zwei Sättigungszustände treten schon bei recht kleinen Magnetfeldern von 50 und 750 Gauß auf, und würden es erlauben, Bauelemente herzustellen, die nicht wie üblich eine binäre, sondern eine ternäre Logik zulassen.

# Zerstörungsfreie optische Messverfahren für die Materialcharakterisierung während der Herstellung von dünnen Halbleiterschichten

K. Hingerl\*, R. Balderas, D. Stifter\* and A. Bonanni\*

Institut für Halbleiter- und Festkörperphysik, Johannes Kepler-Universität Linz

\*auch bei Profactor GmbH, A-4400 Steyr, Austria

Durch die zunehmende Komplexität optoelektronischer Bauelemente, die mit Dünnschichttechnik hergestellt werden, entsteht der Wunsch, *in-situ*-Messverfahren zur Kontrolle und Regelung einzusetzen. Hierbei ist ein starker Trend in Richtung optischer Methoden feststellbar, da diese als einzige mit Molekularstrahlepitaxieanlagen und Metallorganischen-Chemischen Epitaxie-Reaktoren (MOCVD) kompatibel sind.

Als wesentlichste Meßmethoden, die auf Polarisationsoptik beruhen, sind hierbei spektroskopische Ellipsometrie und Reflexionsanisotropie zu nennen. Ellipsometrie wurde schon lange zur Charakterisierung von dünnen (Oxid-) Schichten auf Silizium eingesetzt, Reflexionsanisotropie hingegen ist eine sehr oberflächensensitive neuartige Messmethode. Durch die Erweiterung auf den infraroten und ultravioletten Spektralbereich gelingt es, mit spektroskopischer Ellipsometrie *insbesondere bei gerade wachsenden Halbleiterbauelementen* die technologisch interessanten Parameter wie Wachstumsrate, stöchiometrische Zusammensetzung bei ternären Halbleitern und Rauheit von Grenzflächen zu bestimmen. Durch einen Regelkreis kann dann eine Kontrolle des Herstellungsprozesses erreicht werden.

Mit Reflexionsanisotropie bestimmt man die durch die Oberfläche hervorgerufene Symmetriebrechung. Volumshalbleiter mit Diamant- bzw. Zinkblendestruktur sind invariant unter einer Drehung um  $90^\circ$  ( $C_4$ ). Bei der Bildung von Oberflächenrekonstruktionen bzw. Dimeren an der Oberfläche entsteht jedoch eine Vorzugsrichtung. Es wird vorgestellt, wie man trotz optischer Eindringtiefen von etwa 100 nm diese Strukturen spektroskopisch messen und interpretieren kann und welchen Einfluss die Oberfläche auf das darunter liegende Volumen hat.

# **Erbium in SiO<sub>x</sub>-Umgebung: Möglichkeiten zur Verbesserung der Emission bei 1,54 µm**

**G. Kocher<sup>1</sup>, H. Przybylinska<sup>1,2</sup>, M. Stepikhova<sup>1,3</sup>, L. Palmeshofer<sup>1</sup> and W. Jantsch<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> **Institut f. Halbleiter- und Festkörperphysik, Johannes Kepler-Universität Linz**

<sup>2</sup> **Institute of Physics, Polish Academy of Sciences, Warsaw, Poland**

<sup>3</sup> **Institute Physics of Microstructures RAS, 603600 Nizhny Novgorod, Russia**

Die einzige Möglichkeit, aufgrund von intra-atomaren Übergängen von Erbium in Silizium-Dioden bei Raumtemperatur Elektrolumineszenz bei 1,54 µm zu beobachten, ist die Anregung von SiO<sub>2</sub>:Er Komplexen durch heisse Elektronen, die in einer in Rückwärtsrichtung betriebenen Diode injiziert werden. Der Einbau von Erbium in SiO<sub>x</sub>-Komplexen erfolgt durch Implantation von Er und O und anschließendem Ausheilen bei Temperaturen über 950 °C. Die Ausheilung ist notwendig zur Formation von SiO<sub>2</sub>:Er-Präzipitaten, was in Emissionsspektren als Übergang von einem Spektrum charakteristischer scharfer Linien zu einem wenig strukturierten, breiten Band (Breite ca. 20 nm) beobachtet werden kann.

Stoßionisation von Erbium und damit Elektrolumineszenz kann in Tunnel- oder Lawinendioden erfolgen. Tunnelioden sind am einfachsten realisierbar, allerdings steht in solchen Strukturen nur ein sehr kleines Volumen zur Anregung zur Verfügung, da die Raumladungszone sehr klein ist (nicht mehr als 100 nm [1]). Eine Nutzung des Lawinenprozesses würde dieses Anregungsvolumen stark vergrößern.

Um eine solche Struktur herzustellen, muss man den Dotiergradienten sehr genau einstellen und benötigt daher sehr genaue Kenntnisse über die elektrische Aktivität und die Verteilung der implantierten Dotieratome.

Wir präsentieren Daten aus SIMS- und Hall-Effekt-Messungen, die signifikante Abweichungen von TRIM-Simulationen der Implantationsprofile und der bisher angenommenen elektrischen Aktivität von Erbium in einer solchen Umgebung zeigen. Weiters zeigen wir optimierte Parameter für Design und Realisation von bei Raumtemperatur arbeitenden Dioden.

## **Referenz:**

[1] S. M. Sze, Physics of Semiconductor Devices, 2<sup>nd</sup> ed., Wiley, N.Y., 1981, p 74 ff.

# In-line Prozesskontrolle mit einem kompakten Echtzeit-FTIR-Spektrometer

W. Märzinger<sup>1</sup> and H. Krenn<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Upper Austrian Research GmbH, Linz

<sup>2</sup> Institut f. Halbleiter- und Festkörperphysik, Johannes Kepler-Universität Linz

Die In-line-Überwachung von Prozessen in der Halbleitertechnologie (Epitaxie, PVD/CVD) wird nicht nur zur Überwachung von Prozessparametern wie Temperatur, Schichtdicke, Dotierung, sondern auch zur Garantierung enger Spezifikationen des gefertigten Produkts in der Qualitätskontrolle der Zukunft immer wichtiger werden. Die oftmals niedrigen Prozesstemperaturen ( $< 500\text{ °C}$ ) in der Schichtabscheidung erfordern z.B. für eine berührungslose Temperaturmessung die breitbandige Auswertung der Strahlung im mittleren Infrarot. Der weite Wellenlängenbereich von  $\lambda = 2.5 - 5.5\ \mu\text{m}$  kann aber auch dazu benützt werden, um das Temperaturprofil eines im RTP-Verfahren abgeschiedenen dünnen Films, seine Dotierung und Schichtdicke während des Prozesses zu bestimmen. Das vorgestellte FTIR-Spektrometer hat kleine geometrische Abmessungen (18×8×13 cm) und kann direkt an den Reaktor angeflanscht werden. Es wertet bis zu 80 Infrarot-Spektren (1024 Spektralkanäle) pro Sekunde durch eine spezielle auf einen SHARC-Signalprozessor implementierte Software aus. Als Beispiele werden eine kontaktlose Temperaturmessung an TiN/TiCN-Vielfachschichten und eine simultane Temperatur- und Schichtdickenmessung an PbTe-Filmen auf BaF<sub>2</sub>-Substraten vorgestellt.

# Molecular Beam Epitaxy of Self-Organized PbSe Quantum Dot Superlattices

R. T. Lechner, A. Raab, G. Springholz, M. Pinczolits, V. Holy, P. Mayer,  
G. Bauer, H. Kang,\* and L. Salamanca-Riba\*

Institut für Halbleiter- und Festkörperphysik, Johannes Kepler-Universität Linz

\* Department of Materials and Nuclear Engineering, University of Maryland,  
USA

Self-assembly of Stranski-Krastanow islands in lattice-mismatched heteroepitaxy has recently evolved as a novel tool for the fabrication of low dimensional semiconductor nanostructures. In self-assembled quantum dot *superlattices*, the elastic interactions between the growing dots on the surface and those buried within the previous layers often lead to the formation of long range correlations within the dot ensembles. This can lead to a lateral ordering and size homogenization as well, which is of crucial importance for device applications. In contrast to other material systems, in IV-VI semiconductor quantum dot superlattices grown along the (111) growth directions, dot correlations *inclined* to the growth direction are observed. This leads to a unique *fcc*-like *ABCABC...* dot stacking sequence and a nearly perfect lateral ordering within the growth plane, and to the formation of *trigonal* self-organized 3D lattices of dots [1]. As shown by our previous work, this special type of ordering can be explained by taking into account the elastic anisotropy of the various materials systems [2].

In the present work, we have investigated how finite size effects affect the self-organization processes during PbSe superlattice growth. For this purpose we have fabricated several series of superlattice samples with (1) a variation of the thickness of the  $\text{Pb}_{1-x}\text{Eu}_x\text{Te}$  spacer layers between the dots, and (2) with a variation of the PbSe dot sizes by adjustment of the PbSe thickness as well as the growth temperature. From cross sectional TEM as well as x-ray diffraction studies we find the occurrence of several different ordered dot phases due to abrupt changes in the type of vertical dot correlation at certain spacer thicknesses and dot sizes. For small spacer thicknesses and/or large dot sizes, the dots are vertical aligned with a weak hexagonal ordering in the lateral direction. For intermediate spacer thicknesses and/or medium sized dots, a well defined *fcc*-stacking is observed; and for large spacer thicknesses and/or small dot sizes, no dot correlations are observed. For the different 3D dot arrangements, a qualitatively different scaling behavior of the lateral dot spacings versus spacer layer thickness is observed. In addition, the different vertical correlations also result in a completely different evolution of dot sizes and shapes as a function of the number of superlattice periods. From finite element calculations it is shown that the different dot correlations are due to finite size effects, and the calculated spacer thicknesses for the transitions between the different dot phases are in good agreement with the experiments.

[1] G. Springholz, V. Holy, M. Pinczolits, and G. Bauer, *Science* **282**, 734 (1998).

[2] V. Holy, G. Springholz, M. Pinczolits and G. Bauer, *Phys. Rev. Lett.* **83**, 356 (1999).

# Conduction Electron Spin Resonance in MBE-Grown Si/SiGe Quantum Wells

N. Sandersfeld<sup>1</sup>, W. Jantsch<sup>1</sup>, Z. Wilamowski<sup>1,2</sup>, F. Schäffler<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institut f. Halbleiter- und Festkörperphysik, Johannes-Kepler-Universität Linz

<sup>2</sup> Institute of Physics, Polish Academy of Sciences, Warsaw, Poland

While electron spin is the most important parameter in magnetic storage devices, it has presently no relevance for commercial semiconductor devices. This is about to change, mainly due to the novel quantum computing concepts that emerged in recent years. If quantum computers can ever be realized in semiconductor materials with their superior miniaturization and integration technologies, spin will be of paramount importance. Because for such applications spin coherence times have to be as long as possible, the choice of semiconductors is limited to those that can be fabricated with a negligible amount of nuclear spins. Silicon is certainly the most prominent example to fulfill that condition.

Here we report on the spin and transport properties of the 2-dimensional electron gases (2DEG) in modulation-doped Si/SiGe quantum wells. In a standard microwave absorption experiment we measured the conduction electron spin resonance (CESR), and simultaneously the cyclotron resonance (CR) signal of the 2DEG. The latter yields a large background signal extending over a broad magnetic field range, whereas the former appears as a very narrow signal at a Landé  $g$ -factor of 2. In high-quality samples the CESR signal is as narrow as 30 mG. By measuring the ESR signal as a function of incident microwave power the spin relaxation time can be derived. We find a longitudinal spin relaxation time of up to 30  $\mu$ s, which is 6 – 7 orders of magnitude longer than the momentum relaxation times in these samples, and 3 – 4 orders of magnitude larger than the spin relaxation times in the quantum wells of III-V semiconductors.

A second prerequisite for quantum computing is the setting of a well-defined initial spin distribution. We show that this can be achieved in a rather simple gated structure which allows tuning of the  $g$ -factor. This way a spin-flip operation can be switched on and off in the microwave cavity of an ESR set-up by simply applying a gate voltage.

# Modulation Doped Si/Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub>-Field-Effect Transistors

**N. Sandersfeld, G.Lengauer, L.Palmetshofer, and F. Schäffler**

**Institut für Halbleiter- und Festkörperphysik, Johannes-Kepler-Universität Linz**

Modulation doped Si/Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub> samples show high electron mobilities because of the motion of the carriers along a crystalline heterointerface and the absence of ionized impurities in the conduction channel. We have developed a process sequence to implement n- and p-type MODFETs with 100 nm T-gates in the institute's cleanroom.

The modulation-doped layer sequences are grown by MBE and subsequently processed in a Schottky-gate, mesa-isolation process with six lithographic steps. The ohmic contacts are ion implanted and activated by low-temperature rapid thermal annealing. Reactive ion etching is employed for mesa separation of the devices. The submicron gates are defined by e-beam lithography and lift-off. To minimize the series resistance along the gate finger, which can severely limit the achievable switching speed due to the parasitic R-C time constant, a new process was developed that results in a T-shaped cross section of the gates. For this purpose e-beam exposure of a three-layer resist is employed. With an appropriate stack of PMMA and co-polymer resists of different sensitivity the T-shape of the gates is defined in a self-aligned fashion, i.e. only one exposure run is required. Devices with 100 nm gate length show excellent I-V characteristics with complete pinch-off.

# Stark verstimmte Resonanzen in IV-VI Mikroresonatoren und Mikrodisks: Modenaufspaltung und Lasertätigkeit

T. Schwarzl<sup>1</sup>, W. Heiß<sup>1</sup>, G. Springholz<sup>1</sup>, S. Gianordoli<sup>2</sup>, G. Strasser<sup>2</sup>, M. Aigle<sup>3</sup>,  
H. Pascher<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Institut f. Halbleiter- und Festkörperphysik, Johannes Kepler-Universität Linz

<sup>2</sup> Institut für Festkörperelektronik, TU Wien

<sup>3</sup> Experimentalphysik I, Universität Bayreuth, Deutschland

Mikroresonatoren, die aus hoch reflektierenden Bragg-Spiegeln bestehen, haben in den letzten Jahren viel Aufmerksamkeit erregt wegen ihrer einzigartigen physikalischen Eigenschaften und ihrem hohen Potential für praktische Anwendungen. Wir haben vor kurzem Mikroresonatoren aus IV-VI Halbleitermaterialien (Bleisalze) mit besonders hohen Qualitätsfaktoren [1] sowie vertikal emittierende Mikroresonator-Laser hergestellt [2], [3]. Eine herausragende Eigenschaft unserer Mikrostrukturen ist die Materialkombination von EuTe und PbEuTe für die Bragg-Spiegel, die einen Brechungsindex-Kontrast von über 80 % ergibt [1]. Dies ist ein wesentlich höherer Kontrast als bei anderen Bragg-Spiegeln. Damit sind nicht nur sehr wenige Spiegel-Schichten nötig, um hohe Reflektivität zu erreichen, man erhält auch ein sehr breites Spiegel-Stopband, das auch Resonanzen ermöglicht, die gegenüber der Stopbandmitte stark verstimmte sind. Für diese verstimmten Resonanzen (VRs) wird durch die Fresnel-Gleichungen eine winkelabhängige Aufspaltung zwischen der  $\sigma$ - und  $\pi$ -Polarisationsmode vorhergesagt. Die Aufspaltung ist proportional zum Energieunterschied zwischen der Position der VR und der Spiegelmitte. Befindet sich eine Resonanz genau in der Spiegelmitte, d. h. sie ist nicht verstimmt, so ergibt sich auch keine Polarisationsmoden-Aufspaltung. Wegen der geringeren Reflektivität an den Rändern des Stopbandes weisen die VRs einen geringeren Qualitätsfaktor auf als eine zentrale Mode. Dennoch haben wir optisch angeregte Lasertätigkeit an VRs beobachtet, was besonders wichtig ist für IV-VI-Halbleiterlaser wegen der starken Temperaturabhängigkeit der Energielücke der Bleisalze [3]. Zudem kann die Finesse der VRs erhöht werden durch laterale Strukturierung der Mikroresonatoren, was zu dreidimensional eingesperrten photonischen Zuständen führt. Wir untersuchten verschieden lange Mikroresonatoren mit zwei bis vier VRs zusätzlich zur zentralen Mode. Dabei wurde eine Modenaufspaltung von 2,23 meV für die am stärksten verstimmte Resonanz bei 230 meV beobachtet. Weiters zeigten wir vertikale Lasertätigkeit aus PbTe Quantentöpfen an einer VR bei 4,83  $\mu\text{m}$  bei Temperaturen zwischen 35 K und 85 K [3] trotz der niedrigen Bragg-Reflektivität von 96 %. Laterale Strukturierung der Resonatoren in kreisförmige „Mikrodisk“ führte zu einer Aufspaltung der VRs in zwei bis vier Moden mit höherem Qualitätsfaktor. Diese Aufspaltung wurde für Mikrodisk mit Durchmessern kleiner als 20  $\mu\text{m}$  beobachtet, und stammt von radialen als auch von „whispering-gallery“ Moden hoher Ordnung.

## Referenzen:

- [1] T. Schwarzl, W. Heiß, and G. Springholz, Appl. Phys. Lett., **75**, 1246 (1999).
- [2] T. Schwarzl et al., Electron. Lett., **36**, 322 (2000).
- [3] G. Springholz et al., Appl. Phys. Lett., **76**, 1807 (2000).

# ***In situ*-Kontrolle der Herstellung von Galliumnitrid-Schichten**

**H. Sitter, K. Hingerl, A. Bonanni, K. Himmelbauer, D. Stifter**

**Institut für Halbleiter- und Festkörperphysik, Johannes-Kepler-Universität Linz**

Im Rahmen eines EU-Projekts ist es gelungen, die entsprechenden finanziellen Mittel bereitzustellen, um eine „Metal-Organic-Vapor-Deposition“ (MOCVD) Anlage anschaffen zu können, mit deren Hilfe GaN-Schichten hergestellt werden sollen. Mit Unterstützung des BMWV und der Landesregierung von Oberösterreich wurde die notwendige Infrastruktur geschaffen, um diese aufwendige Herstellungsmethode betreiben zu können.

GaN und GaAlN Schichten werden in der Halbleiterindustrie hauptsächlich für optoelektronische und Hochfrequenz-Bauelemente eingesetzt. Es besteht daher von Seiten der Industrie sehr großen Interesse, den Herstellungsprozess sehr genau überwachen zu können, um den Ausschuss bei der Produktion zu minimieren. Unsere Aufgabe in diesem EU-Projekt liegt daher in der Entwicklung einer Untersuchungsmethode, mit der bei laufendem Wachstum, die bei einer Temperatur von rund 1000 °C erfolgt, die Schichtzusammensetzung und die Dicke, mit einer Auflösung von Nanometern, gemessen werden kann. Dafür wurde von uns ein spezieller Reaktor entworfen, der mit optischen Fenstern versehen ist, um während des Wachstums spektral aufgelöste Ellipsometrie und „Reflection Difference Spektroskopie“ messen zu können.

Das Interesse an dieser Methode ist von Seiten der Industrie sehr groß. Dies spiegelt sich auch in der Zahl der Firmen wieder, die mit im Konsortium des EU Projekts mitarbeiten. Darunter sind: Aixtron – Aachen, Phillips – Almelo, EPI – Cardiff und Thompson – Paris.

# Kristalline dünne Filme aus Para-Hexaphenyl hergestellt mit Hot Wall-Epitaxie

H. Sitter, A. Andreev

**Institut für Halbleiter- und Festkörperphysik, Johannes-Kepler-Universität Linz**

In Zusammenarbeit mit dem Institut für Physikalische Chemie, dem Forschungsinstitut für organische Solarzellen und dem Christian Doppler-Laboratorium für Plastik-Solarzellen, wurde die an unserem Institut entwickelte Hot Wall-Epitaxie zur Herstellung sehr dünner Schichten auf organische Materialien angewandt. Dabei konzentrierten wir uns auf kleine Moleküle von Farbstoffen, zum Beispiel Para-Hexaphenyl (PHP). Diese Moleküle bestehen aus sechs aneinandergereihten Sechseringen von Kohlenstoff, und zeigen daher eine bevorzugte Orientierung entlang ihrer langen Achse.

Die Hot Wall Epitaxie ist ein Wachstumsverfahren, welches möglichst nahe am thermodynamischen Gleichgewicht arbeitet. Damit ist es möglich, die Van der Waals-gebundenen PHP-Moleküle in eine geordnete Struktur zu bringen, die durch das Substrat, in unserem Fall Glimmer, vorgegeben wird. Die Moleküle ordnen sich dabei in Reihen, wobei sie mit der Längsseite aneinander liegen, und arrangieren sich parallel zur Substratoberfläche. Diese Strukturanalyse wurde aus umfangreichen Untersuchungen mit Röntgenbeugung, Elektronenbeugung und optischen Untersuchungen gewonnen, die alle in Übereinstimmung die gleiche Anisotropie der Struktur zeigen.

Besonders auffallend ist die polarisationsabhängige Absorptions- und Lumineszenzeigenschaft der PHP-Filme. Diese Anisotropie sollte sich auch in der Emission von Licht zeigen, wenn derartige Schichten als aktives Material in Leuchtdioden verwendet werden. Damit könnte ein blau leuchtendes Display hergestellt werden, bei dem kein Polarisationsfilter mehr notwendig ist, um einen Kontrast zu erzielen.

# **Nanotomographie an SiGe-Strukturen**

**J. Stangl, A. Daniel, V. Holy, G. Bauer**

**Institut für Halbleiter- und Festkörperphysik, Johannes Kepler-Universität Linz**

**I. Kegel, T. H. Metzger**

**Sektion Physik, Universität München**

Es wurde ein Verfahren entwickelt, mit dem es möglich ist, den Gehalt und die Dehnungsverteilung in etwa 7 nm hohen und 100 nm breiten SiGe-Nanostrukturen auf Silizium-Epitaxieschichten als Funktion der Höhe über dem Substrat mit einer Höhenauflösung von etwa 1 nm zu bestimmen. Die Methode beruht auf Röntgenstreuung und -beugung unter streifendem Einfall (grazing incidence small angle scattering: GISAXS, grazing incidence diffraction: GID) und Beugungs-Messungen unter streifendem Einfall bei großen Ausfallswinkeln. Basierend auf finiten Elemente-Rechnungen zur Verteilung der Zusammensetzung und der Dehnungen wird die gestreute Intensität simuliert und durch Vergleich mit den experimentellen Ergebnissen die chemische Zusammensetzung als Funktion der Höhe bestimmt.

# Nano-Scale Dislocation Patterning in PbTe on PbSe (100) Heteroepitaxy Studied by Scanning Tunneling Microscopy

K. Wiesauer and G. Springholz\*

Institut für Halbleiterphysik, Johannes Kepler Universität Linz

Strain relaxation is a critical process in lattice-mismatched heteroepitaxy. For highly mismatched heteroepitaxial systems, two different strain relaxation mechanisms exist, namely (1) the spontaneous formation of strain-induced coherent 3D islands on the surface, or (2) by misfit dislocation formation at the layer/substrate interface. For the latter, recent work has shown that the formation of interfacial dislocations strongly modifies surface morphology of the epitaxial layers. In the present work, we have studied the strain relaxation of PbTe layers grown by molecular beam epitaxy on 5.2% lattice-mismatched (100) oriented PbSe substrates using UHV scanning tunneling microscopy (STM). In contrast to (111) oriented growth, we find that in this case a 2D growth mode persists throughout the heteroepitaxial growth process without Stranski-Krastanow island formation. From systematic STM studies of layers with varying layer thicknesses, strain relaxation is found to occur purely by misfit dislocation formation starting at a critical layer thickness of only 0.8 monolayers. The misfit dislocations are of pure edge character and they appear as dark lines along the fourfold  $\langle 011 \rangle$  directions in large scale STM images. These dark lines represent the local surface depressions due to the dislocation strain fields.

Atomically resolved STM images show that the dislocation Burgers vector is of  $1/2 \langle 0-11 \rangle$  type parallel to the heterointerface. Thus, misfit dislocations cannot be formed by glide but only by climb processes. In addition, STM images of the very early relaxation stage show that the misfit dislocation half loops are injected laterally from monolayer step edges on the surface. As the PbTe layer thickness increases, the dislocation density rapidly increases and a nearly perfect quadratic grid of misfit dislocations is formed. This is evidenced by the appearance of satellite peaks in the FFT power spectra of the STM images. The remarkable regularity of this dislocation network is explained by the repulsive force between the dislocations. At a layer thickness of 10 monolayers, an average dislocation spacing of about 10 nm is observed, indicating that more than 90% of the misfit strain is relaxed. A comparison of the evolution of strain relaxation determined by STM measurements and calculated by the equilibrium model of Matthews and Blakeslee shows a surprisingly good agreement, despite the high activation energies usually associated with climb process. This indicates that the dislocation nucleation barrier is strongly reduced by the edge injection mechanism.

\*) Phone: (+43)-732-2468-9602,  
Fax: (+43)-732-2468-8650,  
e-mail: g.springholz@hlphys.uni-linz.ac.at





Gesellschaft für Mikroelektronik  
p.Adr. Institut für Industrielle Elektronik und Materialwissenschaften  
Technische Universität Wien  
Gusshausstraße 27–29/366  
1040 Wien