



Laboratorium für
Nano- und Quantenengineering



Leibniz
Universität
Hannover

Laboratorium für Nano- und Quantenengineering: Jahresbericht 2007



Seite | Inhalt

- 2 | Grußworte
- 3 | Ziel des LNQE
- 4 | Forschungsbereiche
- 5 | Nanoelektronik
- 6 | Nanomaterialien
- 7 | Mechanik / Magnetik
- 8 | Quanten-, Bio- Nanoengineering
- 9 | Mitglieder des LNQE
- 16 | Forschungsbau LNQE
- 20 | News in 2007
- 25 | NanoDay 2007
- 28 | Kolloquien und LNQE on the Road in 2007
- 30 | Pressespiegel
- 32 | Projekte
- 67 | Kontakt

Grußworte

Sehr geehrte Leserin, sehr geehrter Leser,

Nanotechnologie ist eine der Schlüsseltechnologien des 21. Jahrhunderts. Sie beschreibt die Herstellung, Untersuchung und Anwendung von Strukturen und Materialien mit mindestens einer kritischen Dimension unterhalb 100 Nanometer. Entscheidend ist dabei, dass allein aus der Strukturgröße neue Funktionalitäten für neue Produkte und Anwendungen resultieren.

Ein wichtiges Kennzeichen für erfolgreiche Nanotechnologieforschung ist die interdisziplinäre Zusammensetzung der beteiligten Akteure. Die Nanotechnologen der Leibniz Universität Hannover haben sich im Laboratorium für Nano- und Quantenengineering (LNQE) zusammengeschlossen. In diesem Forschungszentrum arbeiten 25 Arbeitsgruppen aus den Natur- und Ingenieurwissenschaften. Das Engineering im Namen weist auf die Wichtigkeit der Ingenieure bei der Anwendung naturwissenschaftlicher Erkenntnisse hin. Das Quantenengineering verdeutlicht, dass Effekte auf Nanometerdimension nur quantenmechanisch richtig verstanden werden können und dass nur durch das gezielte Ausnutzen quantenmechanischer Effekte wirklich neue Funktionalitäten erwartet werden können. Die Kernbereiche des LNQE sind Nanoelektronik, Nanomaterialien, Mechanik/Magnetik und Quanten-, Bio- und Nanoengineering. Durch die Zusammenarbeit von Naturwissenschaftlern und Ingenieuren wird sowohl die Grundlagenforschung als auch deren mögliche Umsetzung in Anwendungen von Anfang an verfolgt.

Dieser Jahresbericht dokumentiert die Ereignisse des Jahres 2007 rund um das LNQE.

Hervorzuheben ist hierbei die Entwicklung beim LNQE Forschungsneubau. Die meisten Planungen sind abgeschlossen und der Bauauftrag ist Mitte 2007 erteilt worden. Die Finanzierung steht, wobei die Bundesförderung im Rahmen der neuen gemeinsamen Bund/Länder-Förderung von Forschungsbauten an Hochschulen durch einen erfolgreichen Antrag in einem hoch-kompetitiven Verfahren



Prof. Dr. Rolf Haug

beim Wissenschaftsrat gesichert werden konnte. Der Wissenschaftsrat bescheinigt dem LNQE in einer durchweg positiven Stellungnahme eine „hohe Qualität der Forschungsleistungen“ und schreibt: „Die hochschulbezogene und nationale Bedeutung des Vorhabens, der internationale Stellenwert der Forschung, die wissenschaftliche Ausgewiesenheit der beteiligten Forscher(-gruppen) sowie die Qualität und Kohärenz der Forschungsprogrammatische sind schlüssig und aussagekräftig dokumentiert.“ Baubeginn des Forschungsbaus auf dem Gelände Schneiderberg war im September 2007. Am 5. Oktober 2007 fand die feierliche Grundsteinlegung unter Beisein von Wissenschaftsminister Lutz Stratmann statt, der betonte: „Die Grundsteinlegung des Laboratoriums für Nano- und Quantenengineering ist für den Hochschul- und Wissenschaftsstandort Hannover eine der Bedeutendsten dieses Jahres“. Das neue Gebäude sollte im Frühjahr/Sommer 2009 bezugsfertig sein.

Mit freundlichen Grüßen

Prof. Dr. Rolf Haug
- Sprecher des Vorstandes -

Ziele des Laboratoriums für Nano- und Quantenengineering

Die Synthese und Kontrolle von Materialien auf Größenskalen im Mikro- bis Nanobereich liefert den Zugang zu völlig neuartigen Material- und Systemeigenschaften. Auf diesen Skalen treten Quanteneffekte in Erscheinung, in denen ein noch weitgehend unausgeschöpftes Potenzial an revolutionären, neuartigen Funktionalitäten liegt. Die kontrollierte Manipulation und Beherrschung solcher Materialien und Funktionalitäten erfordert neuartige Werkzeuge. Die Forschung von Naturwissenschaftlern und Ingenieuren fließt bei diesen Strukturgrößen zusammen und setzt so synergetisch Ressourcen frei. Hieraus entwickeln sich völlig neue, nanotechnologische Bauelemente.

Für die dazu erforderliche interdisziplinäre Forschung findet sich im Laboratorium für Nano- und Quantenengineering eine Basis. Hierzu wird in einer breiten Anstrengung das Know-how verschiedener Fachgebiete fokussiert und gebündelt, um aufbauend auf zielgerichteter Grundlagenforschung neue Anwendungsfelder zu erschließen und die Nanotechnologie wirtschaftlich zu nutzen.

Zweck des LNQE ist die selbstlose Förderung der angewandten Forschung auf dem Gebiet mesoskopischer Systeme im Mikro- und Nanobereich. In diesem Rahmen führt die Einrichtung Forschungsvorhaben in interdisziplinärer Zusammenarbeit durch. Deren Ergebnisse macht die Einrichtung der interessierten Öffentlichkeit in geeigneter Form zugänglich.

Aufgabe der Einrichtung ist die Grundlagenforschung in mesoskopischen Größenskalen und deren Umsetzung in praktische Anwendung, insbesondere in den Schwerpunktfachgebieten Nanomaterialien, Mechanik/Magnetik, Nanoelektronik, Optik, Quantensysteme sowie Ausbildung und Nachwuchsförderung auf diesen Gebieten.

Hierbei hat die Einrichtung insbesondere

- Forschungs- und Entwicklungsvorhaben durchzuführen, die sich auf die Erschließung neuer oder die Verbesserung bereits bekannter Anwendungsmöglichkeiten für Mikro- und Nanotechnik richten;
- Für die praktische Anwendung wissenschaftlicher Erkenntnisse zu sorgen und Kräfte der angewandten Forschung und der Praxis zusammenzuführen;
- Aus- und Fortbildungstätigkeit zu leisten und Hilfseinrichtungen für die wissenschaftliche Arbeit und deren Auswertung in der angewandten Forschung zu betreiben;
- Die interdisziplinäre Zusammenarbeit der einzelnen Mitglieder zu fördern und zu verbessern, insbesondere durch die Einrichtung eines gemeinsamen Pools von Verfahrens- bzw. Diagnostiktechniken, der den einzelnen Mitgliedern zur Verfügung steht;
- Bei Erfüllung der ordnungsgemäßen Aufgaben der Einrichtung mit anderen Forschungseinrichtungen des In- und Auslands zusammenzuarbeiten.

Zur Verwirklichung seiner Zwecke und Aufgaben beabsichtigt das Laboratorium für Nano- und Quantenengineering ein eigenes Gebäude in Hannover mit Laboren, Geräten etc. und insbesondere Reinräumen zu errichten und betreiben.



Logo vom Laboratorium für Nano- und Quantenengineering (LNQE) im neuen, blauen Farbton der Leibniz Universität Hannover.



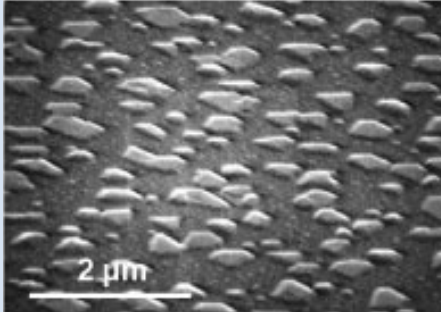
Workshop NanoDay des LNQE.



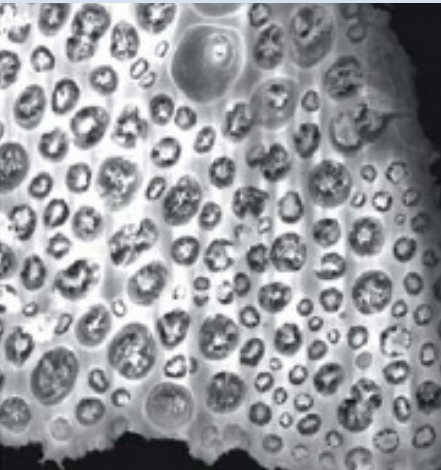
LNQE Forschungsneubau (Computergrafik).

Forschungsbereiche

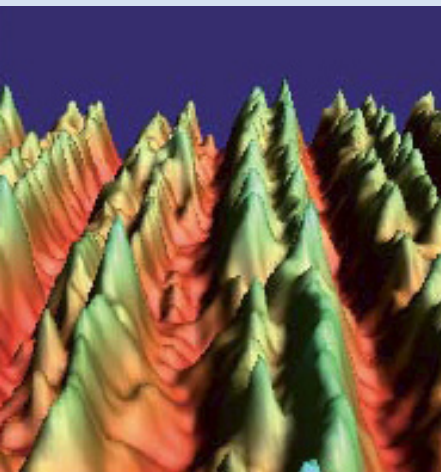
Die Forschung im LNQE ist fokussiert auf vier Kernbereiche der Nanotechnologie, wobei die Bereiche sich gegenseitig synergetisch unterstützen. Die Forschungsbereiche werden jeweils von einem Mitglied des Vorstandes geleitet. Jede Arbeitsgruppe im LNQE arbeitet mindestens in einem, meist in mehreren Forschungsbereichen mit. Die Forschung konzentriert sich auf Schlüsseltechnologien („Enabling Technologies“) mit starker Betonung auf die Umsetzung in Anwendungen:



MBE-Wachstum von Germanium auf Silizium (Quelle: Hofmann/MBE)



Biomimetalisation (Quelle: Behrens/ACI)



Oberflächenphysik mit atomarer Auflösung (Quelle: Pfnür/FKP)

Nanoelektronik - Fortführung der Mikroelektronik auf Nanoskala

- Erforschung neuer Materialien zum zukünftigen Einsatz in der Nanoelektronik.
- Erforschung neuartiger Funktionalitäten in neuen Bauelementestrukturen und Schaltungen.

Nanomaterialien – Kleinste Partikel in der Größe 1 nm – 100 nm

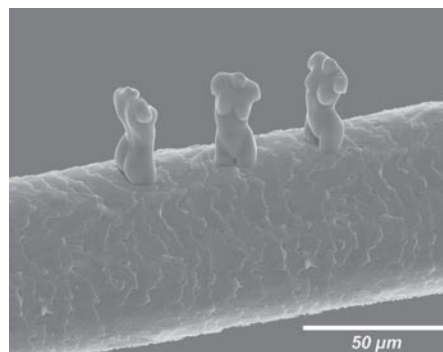
- Nanostrukturen mit maßgeschneiderten Eigenschaften für spezifische Anwendungen.
- Entwicklung unterschiedlichster Herstellungsmöglichkeiten.
- Systematische Analyse und Charakterisierung der Nanomaterialien, Entwicklung von DIN-Standards und Rückführung.

Quanten-, Bio- und Nanoengineering – künstlich geschaffene Quantensysteme für neuartige Anwendungen

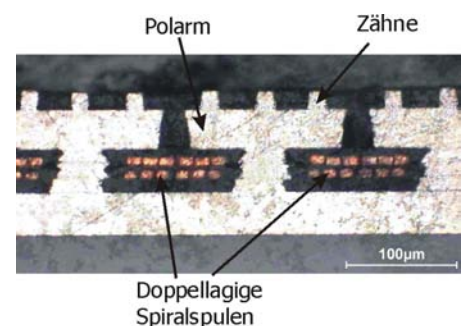
- Grundlegendes Verständnis quantenmechanischer Systeme.
- Entwicklung von innovativen Nanostrukturierungsverfahren.
- Anwendung in neuartigen Quantensensoren, in der Quantenmetrologie bis hin zur Quanteninformationsverarbeitung.

Mechanik/Magnetik – Verbindung der Nanowelt mit der makroskopischen Umgebung

- Aufbau- und Verbindungstechnik von Nanosystemen, Werkzeuge für Nanosysteme, Mikroaktuatorik.
- Mikro- und Nano-Magnetiken für Anwendungen als Sensoren und Aktoren.
- Nanotribologie.



Zwei-Photonen-Polymerisation (Quelle: Chichkov/LZH)



Teil eines Mikromotors (Quelle: Ponick/IAL, Gatzert/imt)

Nanoelektronik

Ansprechpartner: Prof. Dr. H.J. Osten

Die Entwicklung der Mikroelektronik war im letzten Jahrzehnt hauptsächlich durch die ständige Reduzierung der Strukturmaße (Skalierung) geprägt. Dabei blieben der Aufbau der Baugruppen sowie die verwendeten Materialien nahezu unverändert. Diese Entwicklung ist kurz vor ihrem Endpunkt, da eine weitere Verkleinerung der Strukturen auf physikalische Grenzen stößt. Wir durchleben somit einen grundlegenden Wechsel in der mikroelektronischen Entwicklung/Forschung. Innovationen auf allen Ebenen sind jetzt notwendig für die weitere Entwicklung der Mikroelektronik in Richtung einer Nanoelektronik. Dabei wird Silizium zumindest auch in den nächsten Jahren der hauptsächlich genutzte Halbleiter bleiben.

Mit der Fortführung des ursprünglichen Innovationsschwerpunktes Nanoelektronik als Zentrum für Nanoelektronik im Rahmen des LNQE wird sichergestellt, dass, basierend auf interdisziplinärer Forschung im Bereich der Herstellung und Elektronik kleinster Strukturen, Studierende in hochaktuellen Gebieten zukünftiger Arbeitsfelder fachübergreifend ausgebildet und so über ausgezeichnete Berufschancen verfügen werden. Im LNQE stehen folgende Aufgaben im Mittelpunkt der Forschungen zur Nanoelektronik:

Physikalische Effekte und Bauelemente

Teilweise basierend auf den Erkenntnissen der Materialentwicklung sollen physikalische Effekte (Leitfähigkeit, Tunneltransport, spinabhängiger Ladungstransport und Anregungen usw.) im Hinblick auf ihre Verwendbarkeit für neuartige Bauelemente untersucht werden, die die Quanteneigenschaften kleinster Strukturen auszunutzen gestatten. Viele dieser Arbeiten stehen in enger Beziehung zu den Forschungsaktivitäten des Bereiches „Quanten-, Bio- und Nanoeingeneering“.

Neue Materialien und neue Herstellungsverfahren

Die Voraussetzung für die Untersuchung neuartiger nanoelektronischer Prinzipien ist die Möglichkeit der Her-

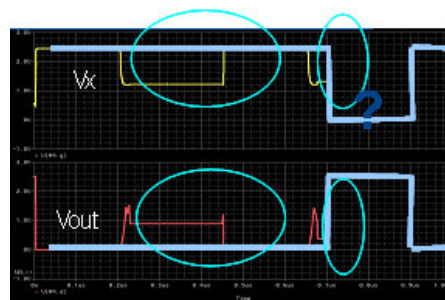
stellung entsprechend geeigneter und auf die angestrebte Funktionalität zugeschnittener Materialsysteme. Das beinhaltet die Fähigkeit des Materialengineering auf molekularem Niveau einschließlich der Manipulation von einzelnen Atomen auf Oberflächen genau so wie die Entwicklung und Kombination verschiedenster Materialien (wie z.B. neue anorganische oder organische Verbindungen auf Silizium-Substraten). Diese Herausforderungen sind nur durch interdisziplinäre Ansätze zu bewältigen. Eine enge Verbindung mit dem Forschungsbereich „Nanomaterialien“ ist eine Voraussetzung.

Quantenmechanische Modellierung und neue Schaltungskonzepte

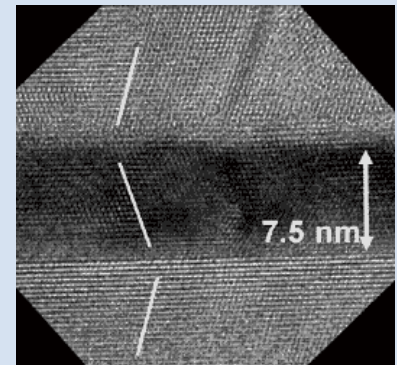
Die experimentellen Arbeiten unter Punkt B werden unterstützt durch Simulation und Modellierung. Gleichzeitig wird untersucht, wie sich höchste Integrationsdichten realisieren lassen, und wie sich elektronische Signale in neuartigen Schaltkreisen bei höchsten Integrationsdichten verhalten.

Chipsysteme und Entwurfsmethodik

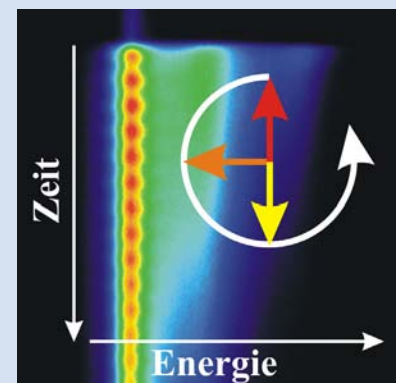
Mit den bisherigen Entwurfsmethoden und der bisherigen internen Gestaltung der Chips kann den Herausforderungen der Nanoelektronik nicht mehr begegnet werden. Der bisherige Schaltkreisentwurf muss sich zum zuverlässigen, anwendungsorientierten, vom System zum Layout durchgängigen und hochgradig automatisierten Entwurf entwickeln. Es werden dabei vollkommen neue Ansätze gesucht.



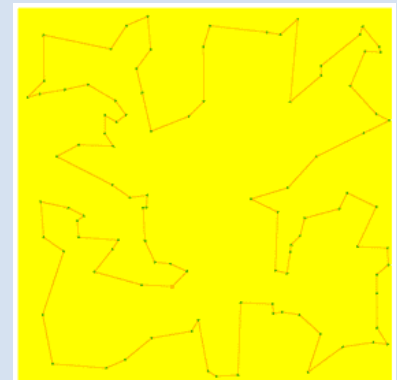
Simulation von Quantentransport in CMOS-Schaltungen
(Quelle: Mathis/TET)



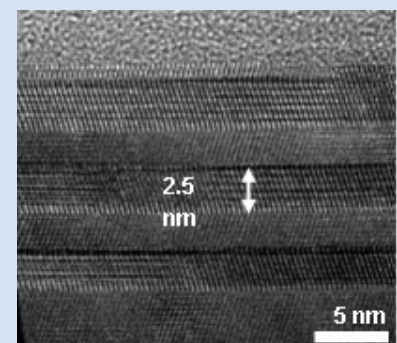
MBE-Wachstum neuer Materialien
(Quelle: Fissel/LFI, Osten/MBE)



Spintronik (Quelle: Oestreich/FKP)



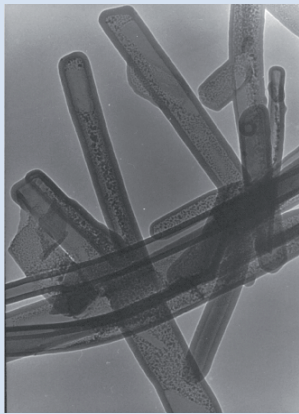
Neue Software-Tools für die Nanoelektronik - Hier zur Berechnung von Netztopologien von Interconnects
(Quelle: Barke/IMS)



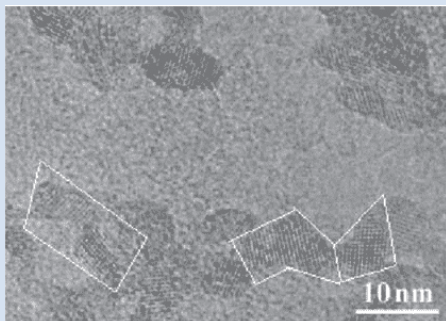
Polytypismus von Silizium
(Quelle: Fissel/LFI)

Nanomaterialien

Ansprechpartner: Prof. Dr. J. Caro



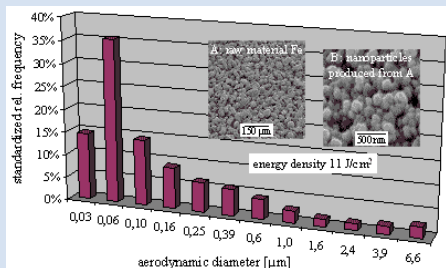
Silizium Nanotubes (Quelle: Caro/PCI)



TiO₂ Nanopartikel
(Quelle: Bahnemann/TCl)



Multi-Skalen Simulation mit Nanopartikeln (Quelle: Wriggers/ibnm)



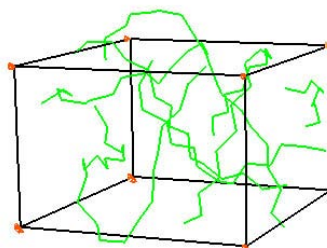
Laser basierte Erzeugung von Nanopartikeln (Quelle: Chichkov/LZH)

Die ständige Reduzierung der Strukturmaße mikroelektronischer Bauelemente führte zu immer feinskaligeren Strukturen. Einer weiteren Verkleinerung der unveränderten Baugruppenkonzepte auf der Basis der bislang für ihre Fertigung genutzten Materialien sind jedoch physikalische Grenzen gesetzt. Bei der Annäherung an prinzipielle Grenzen, die unter 100 nm liegen dürften, könnte für die Nanoelektronik durchaus ein radikaler Technologiewandel erforderlich sein.

Es werden daher verstärkt man-made Materialien mit maßgeschneiderten Eigenschaften gesucht. Dieses Material-Engineering auf molekularem Niveau umfasst kombinierte chemische und physikalische Arbeitstechniken der Materialsynthese und Deposition. Entsprechend dem Gesamtkonzept des LNQE, wonach in den nächsten Jahren Silizium der hauptsächlich genutzte Halbleiter bleiben wird, ergeben sich folgende Aufgaben die Entwicklung Si-kompatibler Nanomaterialien:

Nanomaterialien mit neue physikalischen Funktionen

Nano-Halbleiter- und -Metallpartikel lassen sich definiert herstellen und stabilisieren. Die neuen Funktionalitäten werden quantenelektronische Effekte mit neuen Materialien nutzen. Materialien für integrationsfähige Basisstrukturen im niedrigen nm-Bereich mit 0D- und 1D-Ladungsträger-Confinement wie Single-Electron-Transistoren, Quantendraht-Transistor, Nano-Leitungen, Nano-Röhren, bistabile Molekulare Schalter sind gefragt.



Computergestützte Materialentwicklung (Quelle: Rolfes/ISD)

Synthese von Nanostrukturen mit maßgeschneiderten elektronischen Eigenschaften

Die Verkleinerung der Strukturen und die Erhöhung der Arbeitsgeschwindigkeiten auf dem Chip erfordern neue Materialien für die Leiterbahnen, neue Isolierstoffe mit hohen bzw. niedrigen Dielektrizitätskonstanten, neue Si-adäquate Materialkombinationen.

Strukturierung von Nanomaterialien

Si-kompatible nanometrisch strukturierbare Materialien für neue Basisstrukturen mit neuen elektronischen Funktionen wie Nanocluster, FET-Konfigurationen werden benötigt. In Kombination mit den klassischen physikalischen Techniken werden neue Wege der Deposition und Nanostrukturierung geschaffen. Bei Strukturbreiten unter 100nm gelangt die optische Lithographie an ihr Ende, gefragt sind Verfahren der Post-optischen Lithographie, die auch noch zur Herstellung von Strukturen am Quantenlimit taugen.

Simulation auf der Nano-Ebene

Für eine gezielte Verbesserung der Struktureigenschaften ist bisher eine große Anzahl zeit- und kostenintensiver Versuche erforderlich. Die makroskopischen Eigenschaften des zu betrachtenden Systems sind durch den molekularen Aufbau festgelegt und können mittels molekularer Simulation ermittelt werden. Durch virtuelle Versuche kann so der Einfluss einer veränderten Struktur wie z.B. durch die Zugabe von Nanopartikeln auf das Strukturverhalten untersucht werden. Neben dem Ansatz der Molekulardynamik (MD) wird der Ansatz der Molekulardynamischen Finite Elemente Methode (MDFEM) entwickelt, um in einer Mehrskalenganalyse die Eigenschaften ausgehend vom Aufbau des Moleküls bis zu den Eigenschaften des Bauteils im numerischen Modell abbilden zu können.

Quanten-, Bio- und Nanoengineering

Ansprechpartner: Prof. Dr. R. J. Haug

Nanostrukturierte Systeme bekommen in der Physik, Optik und auch der Biologie eine immer größere Bedeutung. Bei vielen dieser Systeme spielen auf Grund der kleinen Dimensionen Quanteneffekte eine wichtige Rolle.

Themen der Arbeitsrichtung:

Bionanotechnologie

Nanolithographie mit Biomolekülen, Biochips, Grundlagen und Anwendungen von Nanobubbles, lipidbasierte Systeme, Biosensors, Drug Delivery Systems, Tissue Engineering.

Nanostrukturierung

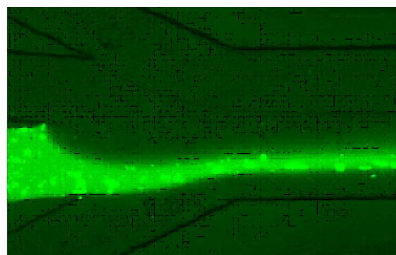
Oberflächen-Laserstrukturierung, 3D Two-Photon Lithographie, lasergestützte Erzeugung von Nanopartikeln, Oberflächenbearbeitung mit dem Rasterkraftmikroskop, Strukturierung mit dem Rastertunnelmikroskop, Elektronenstrahlolithographie.

Nanooptik

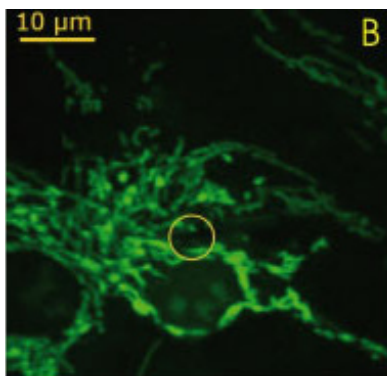
Anwendung von nanoskaligen Materialien in Dünnschichtszellularen, Herstellung und Charakterisierung von Photonischen Kristallen, Nanostrukturen und Bausteine für die Plasmonik, Kohärenzeffekte bei der Elektron-Loch-Spin-Kopplung, Anwendung von spinpolarisierten Ladungsträgern in Halbleiterlasern.

Quantensysteme

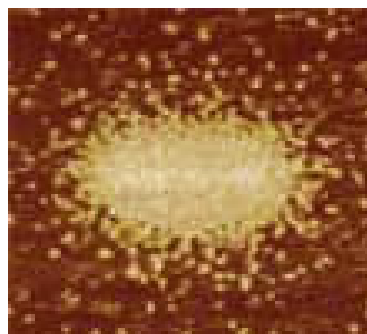
Quanteninterferenz und Quantentransport in niedrigdimensionalen Systemen, Quantensensoren auf der Basis von integrierten atomoptischen Systemen, atomare Systeme in Nanostrukturen, atomare Inertialsensoren, Einsatz von einfachen und gekoppelte Quantenpunktsysteme bei der Quanteninformationsverarbeitung, Spineffekte bei der Quanteninformationsverarbeitung.



Mikro- und Nanofluidik
(Quelle: Hardt/NMP)



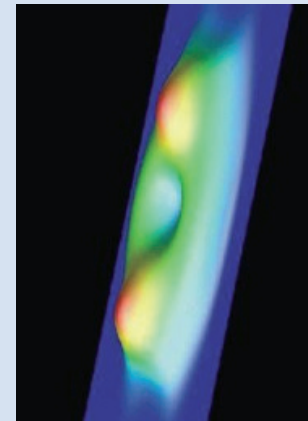
Zellchirurgie mit Femtosekunden-Laserpulsen
(Quelle: Ertmer/LZH)



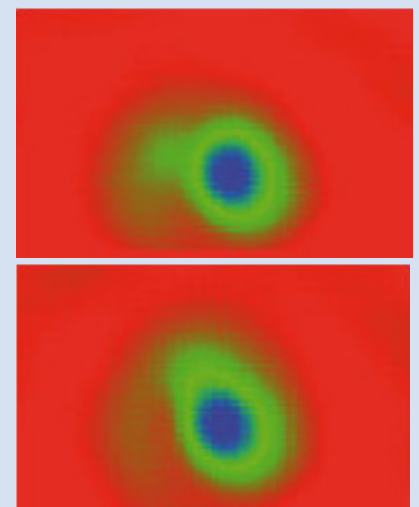
AFM-Nanolithographie mit löslichen Proteinen
(Quelle: Kolb/iffb)



Mit dem Rasterkraftmikroskop erzeugter Quantenpunkt
(Quelle: Haug/FKP)



Bose-Einstein Kondensat
(Quelle: Arlt, Ertmer/IQ)



Nanochemie (Quelle: Morgenstern/FKP)

Mechanik/Magnetik

Ansprechpartner: Prof. Dr. -Ing. H.-H. Gatzen

Mikro- und Nanotribologie

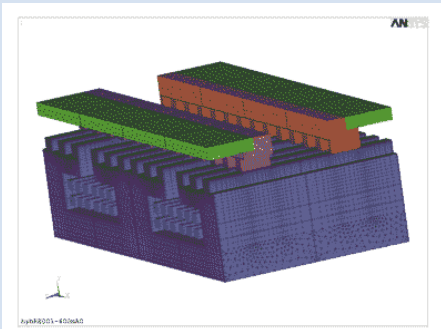
Dieser Bereich beschäftigt sich mit Adhäsionsphänomenen einschließlich dem Flüssigkeitskleben (stiction) bei Mikro- und Nanokontakten von Mikrobauteilen, Phänomenen der Mikro- und Nanoreibung von Oberflächen bei geringen Kontaktkräften und dem Mikro- und Nanoverschleiß. Im Vordergrund steht die optimale Gestaltung der Mikro- und Nanotopographie von Oberflächen, der Einsatz von Verschleißschutzschichten wie z.B. aus amorpher Kohlenstoff (diamond-licher carbon - DLC), sowie der Einsatz von molekularen Lagen von Schmiermitteln.

Aufbau und Verbindungstechnik von Nanosystemen / Unterstützung der Nanotechnik durch makroskopische Bauteile

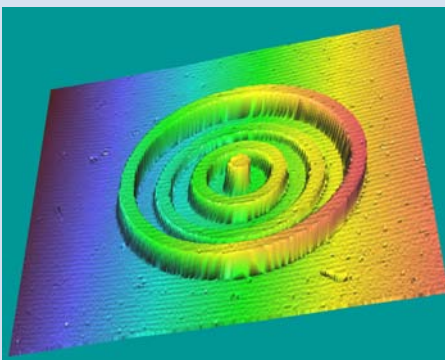
Dieser Bereich hat die Aufgabe, die Systemintegration von Nanobauteilen zu unterstützen. Die hierzu notwendigen Technologien werden bereitgestellt und, wenn notwendig, neu entwickelt. Dies schließt die Schaffung von Mikroaktoren ein, um Nanobauteile bei der Montage hochgenau zu positionieren.

Mikro- und Nanomagnetik

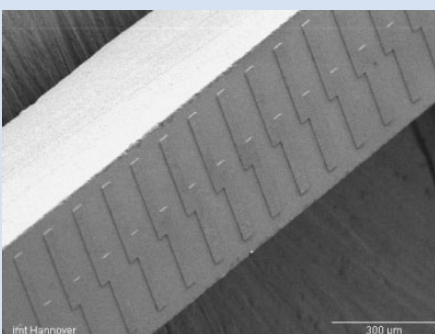
Das Aufgabengebiet umfasst die magnetische Sensorik und Aktorik. Im Bereich der Sensorik erfolgt die Erforschung von Bauteilen, welche magnetische Effekte nutzen. Diese können klassischer Natur sein (Induktion, Magnetoelastizität etc.) oder auch quantenmechanischer (giant-magneto-resistiver Effekt - GMR, tunnel-magneto-resistiver Effekt - TMR etc.), wobei bei letzteren elektronenspinabhängige Phänomene im Vordergrund stehen. Im Bereich der Aktorik werden elektromagnetische und elektrodynamische Effekte erforscht und zum Aufbau von Mikroaktoren und Mikrogeneratoren (energy scavenging) genutzt.



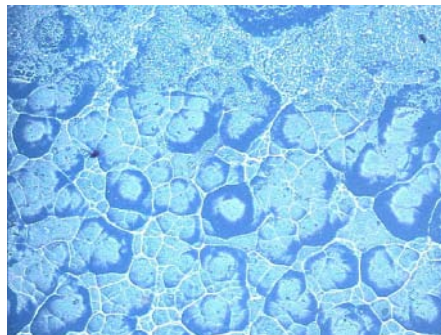
Simulation eines Mikro Linear Motors (Quelle: Ponick/IAL)



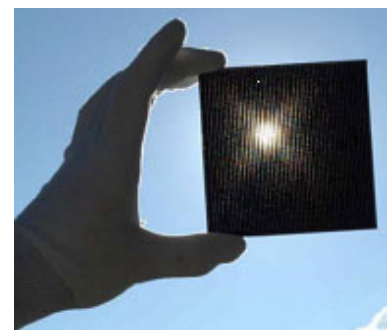
Heißprägen von Nanostrukturen (Quelle: Reithmeier/IMR)



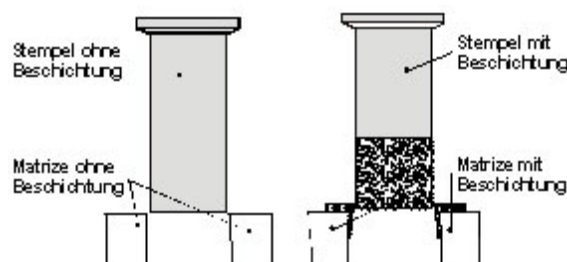
Dünnschicht Mikropositionierung für Sensoren (Quelle: Gatzen/imt)



Nanopartikel in Förderbändern (Quelle: Overmeyer/ITA)



Solarzellen (Quelle: Brendel/FKP, ISFH)



Neuartig beschichtetes Schneidwerkzeug (Quelle: Behrens/IFUM)

Vorstand des LNQE

Prof. Dr. Rolf J. Haug

(Sprecher des Vorstandes)
 Institut für Festkörperphysik
 Abteilung Nanostrukturen
 Leibniz Universität Hannover
 Appelstr. 2
 30167 Hannover
 Tel.: (0511) 762 2901
 Fax: (0511) 762 29043
 haug@nano.uni-hannover.de
 www.nano.uni-hannover.de

Schwerpunkte:

- Quanteneffekte
- Nanostrukturierung
- Niederdimensionale Systeme
- Nanoelektronik
- Quanten Hall Effekt
- Quantenpunkte



Prof. Dr. Jürgen Caro

Institut für Physikalische Chemie und
 Elektrochemie
 Leibniz Universität Hannover
 Callinstr. 3-3a
 30167 Hannover
 Tel.: (0511) 762 3175
 Fax: (0511) 762 19121
 juergen.caro@pci.uni-hannover.de
 www.pci.uni-hannover.de/~lgpcb/

Schwerpunkte:

- Katalyse
- Membranen
- Poröse Materialien
- Wirt/Gast-Komposite
- Brennstoffzellen
- Farbstoff-Solarzellen
- Elektronenmikroskopie



Prof. Dr.-Ing. Hans-Heinrich Gatzert

Institut für Mikrotechnologie
 Leibniz Universität Hannover
 An der Universität 2
 30823 Garbsen
 Tel.: (0511) 762 5103
 Fax: (0511) 762 2867
 gatzert@imt.uni-hannover.de
 www.imt.uni-hannover.de

Schwerpunkte:

- Mikro- und Nanosensorik
- Mikro- und Nanoaktoren
- Mikro- und Nanotribologie
- Mechanische Mikro- und Nanobearbeitung
- Mikromontage
- Management of Technology (MOT)
- Ausbildungskonzepte für Mikro- und Nanotechnik



Prof. Dr. H. Jörg Osten

Institut für Materialien und Bauelemente der Elektronik
 Fachgebiet Materialien der Mikro- und Nanoelektronik
 Leibniz Universität Hannover
 Appelstr. 11A
 30167 Hannover
 Tel.: (0511) 762 4211
 Fax: (0511) 762 4229
 osten@mbe.uni-hannover.de
 www.mbe.uni-hannover.de

Schwerpunkte:

- Neuartigen Materiallösungen für die Si-basierende Mikro- und Nanoelektronik
- Alternative Bauelemente-Konzepte, neue nanoelektronische Funktionalität
- Kristalline Selten-Erden-Oxide
- Wachstum von ultradünnen epitaktischen Heterostrukturen mit vergrabenen Metalloxiden in Silizium
- Engineering der Grenzflächen von 2D-Nanostrukturen
- Epitaxie neuartiger Halbleiterheterostrukturen auf der Basis unterschiedlicher Si-Strukturtypen



Mitglieder des LNQE



Prof. Dr. Jan Arlt
Institut für Quantenoptik
Leibniz Universität Hannover
Welfengarten 1
30167 Hannover
Tel.: (0511) 762 2238
Fax: (0511) 762 2211
arlt@iqo.uni-hannover.de
www.iqo.uni-hannover.de/ertmer/

Schwerpunkte:

- Bose-Einstein-Kondensation (BEK)
- Degenerierte Fermi-Gase
- Magneto-Optische Fallen
- Atomoptik mit BEK
- Kohärenzeigenschaften von BEK



Prof. Dr. Detlef W. Bahnemann
Institut für Technische Chemie
Leibniz Universität Hannover
Callinstr. 3
30167 Hannover
Tel.: (0511) 762 5560
Fax: (0511) 762 2774
Bahnemann@iftc.uni-hannover.de
www.tci.uni-hannover.de/photochemie.html

Schwerpunkte:

- Photokatalyse
- Selbstreinigende, superhydrophile und antibakterielle Oberflächen
- Metall- und Halbleiter-Nanopartikel
- Nanokristalline transparente Beschichtungen
- Funktionsprüfungen nach DIN, CEN und ISO



Prof. Dr.-Ing. Erich Barke
Institut für Mikroelektronische Systeme
Fachgebiet Entwurfsautomatisierung
Leibniz Universität Hannover
Appelstr. 4
30167 Hannover
Tel.: (0511) 762 19690
Fax: (0511) 762 19694
barke@ims.uni-hannover.de
www.ims.uni-hannover.de

Schwerpunkte:

- Rechnergestützter Entwurf mikroelektronischer Schaltungen und Systeme (Electronic Design Automation, EDA):
- Verfahren für den Analog- und Mixed-Signal-Entwurf
- Werkzeuge für den physikalischen Entwurf und seine Verifikation
- Methoden zum Entwurf robuster Schaltungen



Prof. Dr.-Ing. Bernd-Arno Behrens
Institut für Umformtechnik und Umformmaschinen
Leibniz Universität Hannover
An der Universität 2
30823 Garbsen
Tel.: (0511) 762 2164
Fax: (0511) 762 3007
behrens@ifum.uni-hannover.de
www.ifum.uni-hannover.de

Schwerpunkte:

- Blechumformung
- Massivumformung
- Umformmaschinen
- CA – Techniken
- Numerische Methoden

Prof. Dr. Peter Behrens

Institut für Anorganische Chemie
Leibniz Universität Hannover
Callinstr. 9
30167 Hannover
Tel.: (0511) 762 3660
Fax: (0511) 762 3006
peter.behrens@acb.uni-hannover.de
<http://ganymed.tci.uni-hannover.de/ams/Arbeitskreise/Behrens/index.html>

Schwerpunkte:

- Kontrollierte Synthese von Festkörpern, Materialien und Nanomaterialien
- Sol-Gel-Prozesse, kontrollierte Kristallisation, Solvothermalsynthesen
- Nanoporöse Materialien
- Biomaterialien
- Biomineralisation
- Modellierung von Festkörpern

**Prof. Dr.-Ing. Rolf Brendel**

Institut für Festkörperphysik
Abteilung Solarenergie
Leibniz Universität Hannover
Appelstr. 2
30167 Hannover
Fax: (0511) 762 2904
Rolf.Brendel@isfh.de
www.isfh.de

Schwerpunkte:

- Simulation von Solarzellen
- Si-Materialforschung
- Si-Dünnschichtzellen
- Si-Waferzellen
- Zellcharakterisierung
- Modultechnologie
- Selektive Schichten
- Sonnenkollektoren

**Prof. Dr. Boris Chichkov**

Laser Zentrum Hannover e. V.
Nanotechnology Division
Hollerithallee 8
30419 Hannover
Tel.: (0511) 2788 316
Fax: (0511) 2788 100
b.chichkov@lzh.de
www.lzh.de

Schwerpunkte:

- Nanotechnologie mit dem Laser
- Zwei-Photonen-Polymerisation
- Charakterisierung von Laserprozessmissionen
- Nichtlineare maskenlose Lithographie
- Laserbasierte Nanopartikel-Erzeugung
- EUV-Messtechnik

**Prof. Dr. Wolfgang Ertmer**

Institut für Quantenoptik
Leibniz Universität Hannover
Welfengarten 1
30167 Hannover
Tel.: (0511) 762 2231
Fax: (0511) 762 2211
ertmer@iqo.uni-hannover.de
www.iqo.uni-hannover.de/ertmer/

Schwerpunkte:

- Quantenengineering:
 - Optische Atomuhren
 - Bose-Einstein-Kondensate
 - Ultrakalte Bose-Fermi Mischungen
 - Rein-optische Atomlaser
 - Ultrakalte Neon-Atomen
- Quantensensoren:
 - Sagnac-Interferometrie
 - Atominterferometrie
 - Atomoptik mit Mikrostrukturen
- Fundamentale Physik im Weltraum
- Lasermedizin und Biophotonik





PD Dr. Andreas Fissel

Laboratorium für Informationstechnologie
Abteilung Halbleiter-Technologie und Bauelemente
Leibniz Universität Hannover
Schneiderberg 32
30167 Hannover
Tel.: (0511) 762 5041
Fax: (0511) 762 5052
fissel@lfi.uni-hannover.de
www.lfi.uni-hannover.de

Schwerpunkte:

- Epitaktische Metall-Isolator Resonant-Tunneling Strukturen für Bauelemente der Silizium-Nanoelektronik
- Epitaktische Gate-Dielektrika für die Si- und SiC-Elektronik
- Halbleiter-Isolator-Grenzflächen
- Epitaktische Nanocluster-Speicher-Strukturen
- Heterostrukturen auf der Basis verschiedener Kristallstrukturen des Siliziums



Prof. Dr. Steffen Hardt

Institut für Nano- und Mikroprozess-technik
Leibniz Universität Hannover
Callinstraße 36
30167 Hannover
Tel.: (0511) 762 2278
Fax: (0511) 762 2167
hardt@nmp.uni-hannover.de
www.nmp.uni-hannover.de

Schwerpunkte:

- Mikro- und Nanofluidik
- Optofluidik
- Mikroverfahrenstechnik
- Lab-on-a-Chip-Technologie
- Wärme- und Stofftransport auf der Mikro- und Nanometerskala.



Prof. Dr. Karl R. Hofmann

Institut für Materialien und Bauelemente der Elektronik
Fachgebiet Bauelemente der Mikro- und Nanoelektronik
Leibniz Universität Hannover
Appelstr. 11A
30167 Hannover
Tel.: (0511) 762 4220
Fax: (0511) 762 4229
hofmann@mbe.uni-hannover.de
www.mbe.uni-hannover.de

Schwerpunkte:

- MOSFETs mit hochbeweglichen epitaktischen Germanium-Kanälen auf Siliziumsubstraten
- Resonante Tunnelbauelemente
- Nanocluster MOS-Speicher
- Gatedielektrika hoher Dielektrizitätskonstante
- Degradationsphänomene in Gate- und Tunnelisolatoren
- Full-band Monte-Carlo Transportsimulation



Prof. Dr. Hans-Albert Kolb

Institut für Biophysik
Leibniz Universität Hannover
Herrenhäuser Str. 2
30419 Hannover
Tel.: (0511) 762 2612
Fax: (0511) 762 5916
kolb@biophysik.uni-hannover.de
www.biophysik.uni-hannover.de

Schwerpunkte:

- Biophysik
- Niederfrequente Elektromagnetische Strahlung
- Rasterkraftmikroskopie insbesondere in Flüssigkeiten
- Wachstum von 3D-Kristallen transmembraner Proteine.
- Nanolithographie mit löslichen Proteinen in wässriger Lösung

Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Mathis

Institut für Theoretische Elektrotechnik
Leibniz Universität Hannover
Appelstr. 9A
30167 Hannover
Tel.: (0511) 762 3201
Fax: (0511) 762 3204
mathis@tet.uni-hannover.de
www.tet.uni-hannover.de

Schwerpunkte:

- Modellierung und Simulation von:
 - Nanostrukturierten Bauelementen und Schaltungen
 - Atomkraftmikroskopie (EFM, MFM)
 - Nano-elektromechanischen Systemen (NEMS)

**Prof. Dr. Karina Morgenstern**

Institut für Festkörperphysik
Abteilung Oberflächen
Leibniz Universität Hannover
Appelstraße 2
30167 Hannover
Tel.: (0511) 762 4821
Fax: (0511) 762 4877
morgenstern@fkp.uni-hannover.de
www.fkp.uni-hannover.de/de/agmorgenstern/

Schwerpunkte:

- Elementare Anregungen auf lokaler Skala
- STM
- Einzelmolekülchemie
- Dynamik von Nanostrukturen

**Prof. Dr. Michael Oestreich**

Institut für Festkörperphysik
Abteilung Nanostrukturen
Leibniz Universität Hannover
Appelstraße 2
30167 Hannover
Tel.: (0511) 762 3493
Fax: (0511) 762 2904
oest@nano.uni-hannover.de
www.nano.uni-hannover.de/oest/

Schwerpunkte:

- Spinelektronik in Halbleitern
 - Spin-Rausch Spektroskopie
 - g-Faktor Spektroskopie
 - Optische Spin-Auswahlregeln
 - Reduktion der Laserschwelle
 - Spin-Dephasierung
- Dynamik von Biexitonen

**Prof. Dr.-Ing. Ludger Overmeyer**

Institut für Transport- und Automatisierungstechnik
Leibniz Universität Hannover
An der Universität 2
30823 Garbsen
Tel.: (0511) 762 2503
Fax: (0511) 762 4007
ludger.overmeyer@ita.uni-hannover.de
www.ita.uni-hannover.de

Schwerpunkte:

- Transporttechnik
 - Fördergurttechnologie
 - Flurförderer
 - Auto ID-Systeme im Materialfluss (z.B. RFID)
- Automatisierungstechnik
 - Automatisierungstechnik im Materialfluss
 - Spezialautomaten
 - Steuerungstechnik
- Aufbau- und Verbindungstechnik
 - Flip chip Prozesse
 - Dipensiertechnik





Prof. Dr. Herbert Pfnür

Institut für Festkörperphysik
Abteilung Oberflächen
Leibniz Universität Hannover
Appelstraße 2
30167 Hannover
Tel.: (0511) 762 4819
Fax: (0511) 762 4877
pfnuer@fkp.uni-hannover.de
www.fkp.uni-hannover.de/de/agpfnuer/

Schwerpunkte:

- Leitfähigkeit in reduzierten Dimensionen
- Molekulare Elektronik
- Funktionalisierte Isolatoren
- Nanostrukturierte Metall/Isolator-Systeme



Prof. Dr.-Ing. Bernd Ponick

Institut für Antriebssysteme und Leistungselektronik
Fachgebiet Elektrische Maschinen und Antriebssysteme
Leibniz Universität Hannover
Welfengarten 1
30167 Hannover
Tel.: (0511) 762 2571
Fax: (0511) 762 3040
ponick@ial.uni-hannover.de
www.ial.uni-hannover.de

Schwerpunkte:

- Klein- und Mikroaktoren:
 - Entwurf
 - Berechnung des stationären Betriebsverhaltens
 - Modellbildung
 - Simulation des dynamischen Verhaltens
- Energieeffizienz und Schadensforschung von Antriebssystemen
- Entwicklung von Spezialsoftware



Prof. Dr.-Ing. E. Reithmeier

Institut für Mess- und Regelungstechnik
Leibniz Universität Hannover
Nienburger Straße 17
30167 Hannover
Tel.: (0511) 762 3331
Fax: (0511) 762 3234
sekretariat@imr.uni-hannover.de
www.imr.uni-hannover.de

Schwerpunkte:

- Fertigungsmess- und Prüftechnik
- Optosensorik:
- Regelungstechnik:
- Akustik



Prof. Dr.-Ing. Raimund Rolfes

Institut für Statik und Dynamik
Leibniz Universität Hannover
Appelstr. 9A
30167 Hannover
Tel.: (0511) 762 3867
Fax: (0511) 762 2236
r.rolfes@isd.uni-hannover.de
www.isd.uni-hannover.de

Schwerpunkte:

- Multifunktionale, leichte und langlebige Strukturen
- Schwingungen und Verbunde
- Schadensfrüherkennung
- Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit dynamisch beanspruchter Strukturen
- Robuster und wirtschaftlicher Entwurf von Faserverbundstrukturen
- Einrichtung virtueller Versuchsstände
- Materialgesetze für Verbunde
- Molekulardynamische Finite Elemente Methode

Prof. Dr.-Ing. Peter Wriggers

Institut für Baumechanik und Numerische Mechanik
Leibniz Universität Hannover
Appelstr. 9A
30167 Hannover
Tel.: (0511) 762 2220
Fax: (0511) 762 5496
wriggers@ibnm.uni-hannover.de
www.ibnm.uni-hannover.de

Schwerpunkte:

- Biomechanik
- Konstitutive Modellierung von Materialien
- Kontaktmechanik
- Finite Elemente Algorithmen
- Mikromechanik
- Multiphysik
- Multi-Skalen-Analysen für Materialien und Grenzflächen
- Optimierung
- Symbolische Ansätze in FEM



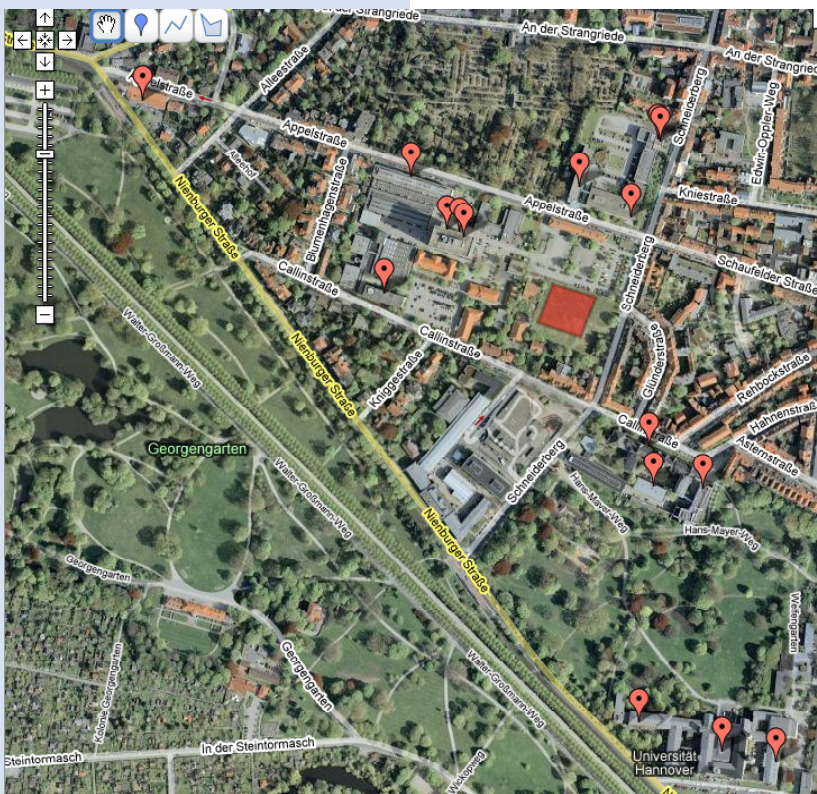
Forschungsbau LNQE



Computergrafik des geplanten LNQE-Forschungsneubaus. Die kompakte, rechteckige Bauweise erlaubt innen liegende Laserlabore und ist gleichzeitig besonders kostengünstig. (Quelle: KSP - Architekten)

Im Jahr 2006 wurde der LNQE Forschungsneubau geplant. Die Planungen liegen bei KSP - Engel und Zimmermann – Architekten (Braunschweig) für den Hochbau, Ing.-Büro Wolf + Weiskopf (Hannover) für den Reinraum, und weiteren Fachplanern. Die Projektleitung liegt beim Staatlichen Baumanagement Hannover.

Der LNQE-Neubau besteht aus hochwertigen Laboren (Chemielabore, Messlabore, Laserlabore), einem Forschungsreinraum für Nanotechnologie und Büroräumen für Ca. 44 wissenschaftliche Mitarbeiter. Von der Konzeption her sind Labore und Reinraum so ausgestattet (Klimatisierung, Luftreinheit etc.), dass sie Forschungsarbeiten ermöglichen, die in den Instituten der Arbeitsgruppen des LNQE bisher technisch nicht möglich sind und auch vielen konkurrierenden Gruppen weltweit in dieser Konstellation nicht zur Verfügung stehen. Die Hauptnutzflächen sind: 430 qm Forschungsreinraum, 430 qm Labore und 442 qm Büroräume.



Standort des neuen Forschungszentrums in der Mitte des Universitätsviertels von Hannover (Quadrat) mit den in der Nähe befindlichen LNQE Arbeitsgruppen. (Quelle: Google Maps)

Die prinzipielle Planung ist mit der Einreichung der Haushaltsunterlagen (HU-Bau) im Februar 2007 abgeschlossen worden und die Gesamtkosten des Bauprojektes mit 12,8 Mio. Euro ermittelt. Hiervon sind 1,6 Mio. Euro Ersteinrichtung. Der Bauauftrag wurde nach eingehender Prüfung am 21.06.2007 erteilt. Nach der Herrichtung und Erschließung des Baugrundstücks am Schneiderberg 38 in Hannover fand am 5.10.2007 die feierliche Grundsteinlegung unter Beisein von Wissenschaftsminister Lutz Stratmann statt. Ende 2007 wurde mit den ersten Bauarbeiten begonnen. Die Bauzeit beträgt voraussichtlich 18 Monate, so dass im Frühjahr/Sommer 2009 der Forschungsneubau bezogen werden kann.

Der tägliche Baufortschritt kann mit einer Webcam verfolgt werden: www.lnqe.uni-hannover.de/webcam.htm

Die Finanzierung des Neubaus erfolgt zu 50 % durch das Land Niedersachsen und zu 50 % durch den Bund. Der Bundesanteil wurde durch einen erfolgreichen Antrag beim Wissenschaftsrat im Rahmen der neuen Bund/Länderförderung von Forschungsbauten eingeworben.

Die Stellungnahme des Wissenschaftsrates im Wortlaut:

„Das beantragte Laboratorium Nano- und Quantenengineering (LNQE) ist durch eine sinnvolle und notwendige Verbindung von Natur- und Ingenieurwissenschaften charakterisiert. Auf dem hochaktuellen Gebiet der Nanotechnologie arbeiten an der Universität Hannover Wissenschaftler aus 25 Arbeitsgruppen anwendungsnah zusammen.

Die hohe Qualität der Forschungsleistungen wird unter anderem durch die sehr erfolgreiche Drittmittelinwerbung belegt; zudem ist es gelungen, einen sehr renommierten Sprecher zu gewinnen. Unter den Drittmittelinwerbungen sind der außergewöhnlich gute Erfolg bei der Förderung durch die DFG und der hohe Anteil von Drittmitteln aus der privaten Wirtschaft hervorzuheben, der die Anwendungsnähe und den Ansatz einer innovationsorientierten Verwertung der erzielten Forschungsergebnisse bezeugt.

Es ist zu erwarten, dass die Unterbringung der Arbeitsgruppen in dem geplanten Neubau zu einer Verstärkung der Zusammenarbeit und zu einer effizienteren Nutzung des umfangreichen, vorhandenen Geräteparks führen und damit der gewählte interdisziplinäre Ansatz qualitativ auf eine neue Stufe gehoben werden wird, indem bisher nicht durchführbare Forschungsarbeiten ermöglicht werden.

Mit dem Forschungsbau wird gleichzeitig der Schwerpunkt der Universität Hannover auf dem Gebiet der Nanotechnologie gestärkt. Das LNQE wird durch seine Interdisziplinarität und Anwendungsnähe deutschlandweit ausgewiesen sein.

Das strategisch angelegte Berufungskonzept, das die Interdisziplinarität im Schwerpunktbereich Nanotechnolo-

gie unterstützt hat, sollte künftig konsequent weiter verfolgt werden.

Die für die Begutachtung von Forschungsbauten vorgegebenen Kriterien sind in überzeugender Weise erfüllt. Die hochschulbezogene und nationale Bedeutung des Vorhabens, der internationale Stellenwert der Forschung, die wissenschaftliche Ausgewiesenheit der beteiligten Forscher(-gruppen) sowie die Qualität und Kohärenz der Forschungsprogramm- matik sind schlüssig und aussagekräftig dokumentiert. Die beantragten Kosten für das Vorhaben sind plausibel begründet. Da das Land Niedersachsen sich bereit erklärt hat, die Bedingung des Wissenschaftsrates zu erfüllen, den Landesanteil des Vorhabens von 6.400 T€ selbst zu finanzieren, wird das beantragte Vorhaben zur Aufnahme in das Kontingent zur Überleitung empfohlen. Nach Auskunft des Bundes stehen die Mittel für das Vorhaben im Rahmen des Kontingents zur Überleitung (Königsteiner Kontingent) zur Verfügung.“



Erfolgreicher Antrag zur Bundesförderung des LNQE Forschungsbaus.



Grundsteinlegung



Bauamtsleiter Reinhard.



Wissenschaftsminister Stratmann.



Universitätspräsident Barke.



LNQE-Vorstandssprecher Haug.





am 05.10.2007



Kupferhülse mit Tageszeitung, Euromünzen und Jahresbericht 2006 des LNQE.



Baugrundstücks am Schneiderberg 38 in Hannover

News in 2007

01.02.2007

Exzellenzinitiative und LNQE

Rege Beteiligung der LNQE-Arbeitsgruppen.

Laut DFG zielt die Exzellenzinitiative darauf ab, gleichermaßen Spitzenforschung und die Anhebung der Qualität des Hochschul- und Wissenschaftsstandortes Deutschland in der Breite zu fördern und damit den Wissenschaftsstandort Deutschland nachhaltig zu stärken, seine internationale Wettbewerbsfähigkeit zu verbessern und Spitzen im Universitäts- und Wissenschaftsbereich sichtbar zu machen. In der zweiten Runde dieses prestigeträchtigen Wettbewerbs ist die Leibniz Universität Hannover gleich bei zwei Exzellenzclustern zur Vollantragstellung aufgefordert worden. Dies sind:

„QUEST - Centre for Quantum Engineering and Space-Time Research“ (Koordinator: Prof. Wolfgang Ertmer)

In diesem Cluster wird schwerpunktmäßig die Forschung zum Quantenengineering sowie zur Raumzeit vorantreiben, um die zugrunde liegende Physik zu erforschen und andererseits innovative Methoden für neue Anwendungen sowohl der fundamentalen Physik als auch angewandter Felder wie Erdbeobachtung, Navigation und Geodäsie zu erschließen. Die Aktivitäten fokussieren sich auf Quantenengineering, Quantensensoren, Physik der Raumzeit und Zukunftstechnologie. In diesem Cluster sind aus dem LNQE folgende Arbeitsgruppen beteiligt: Jan Arlt (IQ), Boris Chichkov (LZH), Wolfgang Ertmer (IQ), Rolf Haug (IFKP) und Michael Oestreich (IFKP). Das LNQE-Office unterstützt tatkräftig die Antragstellung.

„Progress in Production“ (Koordinator: Prof. Berend Denkena)

Im Sinne des Produktionstechnischen Zentrums Hannover wird die gesamte Prozesskette von der Bauteilentstehung bis zur Qualitätskontrolle abgedeckt und optimiert. Es werden die erfolgreichen Erfahrungen aus den dort vorhandenen Sonderforschungsbereichen mit eingebracht und die dort erreichten Forschungsergebnisse zusammengeführt. Die verbindende Vision des Exzellenzclusters ist eine Hochleistungsprozesskette für Hochleistungsbauteile, die kundengerechte Produkte herstellt und gesellschaftsgerechte Arbeitsplätze bietet. Aus dem LNQE sind beteiligt: Bernd-Arno Behrens (IFUM), Ludger Overmeyer (ITA), Bernd Ponick (IAL), Raimund Rolfes (ISD) und Peter Wriggers (IBNM).

„rebirth - Regenerative Biology and Reconstructive Therapy“ (Koordinator: Prof. Axel Haverich)

An diesem bereits genehmigten Exzellenzcluster von der Medizinischen Hochschule Hannover und der Leibniz Universität Hannover sind die folgenden Arbeitsgruppen des LNQE beteiligt: Peter Behrens (ACI), Boris Chichkov (LZH), Wolfgang Ertmer (IQ) und Hans Heinrich Gatzert (IMT). Im Fokus des Clusters stehen die Organe Blut, Herz, Lunge und Leber, wobei die vom LNQE beteiligten Arbeitsgruppen die technologische Seite der Forschung wie z. B. die Rekonstruktion biologischer Funktionen der Organe abdecken. Mehr zu „rebirth“ unter: <http://www.rebirth-hannover.de>

Planungen des Forschungsneubaus kommen gut voran!

Jetzt geht es in die Ausführungsplanung.

Die so genannten „Haushaltsunterlagen Bau“ sind von der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover und der Projektleitung des Staatlichen Baumanagements Hannover unterzeichnet worden. Hiermit sind Planungen des LNQE-Forschungsneubaus einen weiteren, wichtigen Schritt vorangekommen. Mit der HU-Bau stehen der Grundriss und die Ausstattung der einzelnen Räume und Labore fest. Es handelt sich um Labore (430 qm für Chemielabore, Messlabore und Laserlabore), einen Forschungsreinraum für Nanotechnologie (410 qm) und Arbeitsräume für ca. 44 Personen.

Mit dem LNQE-Forschungsbau entsteht ein Nanotechnologie-Zentrum in der Mitte des Univiertels von Hannover. Der Neubau ist der erste Schritt zur Campus-Universität und somit von größter Bedeutung für die Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover.

Jetzt geht es in die Ausführungsplanung. Parallel laufen Genehmigungen und europaweite Ausschreibungen zum Bau.

Weiterer Zeitplan:

- Juni 2007: Beginn der Erschließung des Baugeländes.
- September 2007: Voraussichtlicher Baubeginn.
- Oktober 2007: Grundsteinlegung.
- Bauzeit: Ca. 18 Monate.

Viel Geld für neues Nanotechnologiezentrum in Hannover

Wissenschaftsrat empfiehlt Förderung des Laboratoriums für Nano- und Quantenengineering (LNQE).

Am 23. bis 25. Mai 2007 fand die Frühjahrssitzung des Wissenschaftsrates in Oldenburg statt und tagte u. a. über die neuen gemeinsamen Bund/Länder-Förderung von Forschungsbauten an Hochschulen (auf Basis des Art. 91 b Abs. 1 Nr. 3 GG). In diesem kompetitiven Verfahren wurden jetzt 8 Anträge von ursprünglichen 19 Anträgen empfohlen- Darunter das Laboratorium für Nano- und Quantenengineering (LNQE) in Hannover/Niedersachsen.

Das Laboratorium für Nano- und Quantenengineering (LNQE) ist ein Forschungszentrum der Leibniz Universität Hannover, das als interdisziplinärer Querschnittsbereich in der Universität auf dem Gebiet der Nanotechnologie forscht. Projekte der Nanotechnologie können fast immer nur in Zusammenarbeit verschiedener Fachrichtungen zum Erfolg geführt werden. Das LNQE umfasst 25 Arbeitsgruppen aus den Natur- und Ingenieursfakultäten, die bei nanotechnologischen Fragestellungen schon heute gemeinsam Projekte bearbeiten. Durch den Neubau wird eine Plattform für eine noch intensivere Zusammenarbeit geschaffen und Spitzenforschung auf dem Gebiet der Nanotechnologie ermöglicht.

Für die Leibniz Universität Hannover stellt die Nanotechnologie eine der wissenschaftlichen Kernexzellenzen dar. Mit den jetzt bewilligten Bundesmitteln wird ab September 2007 ein Nanotechnologiezentrum im Herzen der Landeshauptstadt von Niedersachsen mitfinanziert. Die Bausumme beträgt 12,8 Mio Euro. Mit dem Neubau wird ein entscheidender, struktureller Schritt in Richtung der internationalen Expertise und Kompetenz auf dem Gebiet Nanotechnologie unternommen. Der Neubau in der Mitte des Univeritätsviertels von Hannover ist der erste Schritt zur Campus-Universität und somit von größter Bedeutung für die Universität. Teil des Zukunftskonzepts der Universität ist es, quer zu den bestehenden Fachrichtungen so genannte Leibniz-Schulen einzurichten, die thematische Kerngebiete bearbeiten sollen, um interdisziplinäre Forschung auf internationalem Spitzenniveau zu ermöglichen. Durch das Forschungsge-

12.02.2007



Außenansicht des LNQE-Forschungsneubaus (zum Download als PDF).

30.05.2007

bäude erhält die Universität eine reale, räumliche Basis für diese neuartige Forschungsstruktur.

Zum gleichem Thema:

Pressemeldung des Niedersächsischen Ministeriums für Wissenschaft und Kultur: [link](#)

Pressemeldung des Wissenschaftsrates (13/2007): [link](#)
(siehe s. 55 der „Empfehlungen zur Förderung von Forschungsbauten (2007)“ (Drs. 7894-07))

05.07.2007

Bauftrag für LNQE-Forschungsbau ist erteilt

[Die letzte Hürde im Genehmigungsverfahren ist genommen.](#)

Nachdem am 13.06.2007 der Haushaltsausschuss von Niedersachsen grünes Licht gegeben hat, ist jetzt am 21.06.2007 der Bauauftrag für den Neubau eines Laboratoriums für Nano- und Quantenengineering vom Niedersächsischen Finanzministerium erteilt worden. Hiermit ist die letzte Stufe im Genehmigungsverfahren erfolgreich durchlaufen worden und die Gewerke des Baus werden jetzt in kürze europaweit ausgeschrieben.

Mit dem jetzt geplanten Neubau, der Labore (435 qm), einen Forschungsreerraum (409 qm) und die Arbeitsräume für die Forschung (509 qm) für ca. 44 Personen umfasst, werden neue, exzellente Möglichkeiten für die beteiligten Wissenschaftler eröffnet. Als Baubeginn wird der September 2007 angestrebt. Die Bauzeit beträgt voraussichtlich 18 Monate, so dass das Forschungszentrum im Frühjahr/Sommer 2009 bezogen werden kann.

01.10.07

NanoDay 2007

[Dritter NanoDay gibt Einblicke in die aktuelle Forschung des LNQE.](#)



Konferenzphoto am Nachmittag (hier klicken für Druckversion (A4, PDF)).

Am Donnerstag, den 27. September 2007 fand der NanoDay 2007 des Laboratoriums für Nano- und Quantenengineering (LNQE) in Hannover statt. Es war bereits der dritte NanoDay des LNQE. In 13 kurzen Vorträgen und einer Postersitzung mit 50 Postern wurde der breite Querschnitt der interdisziplinären Forschung auf dem Gebiet Nanotechnologie gezeigt. Erstmals wurde mit freundlicher Unterstützung des Freundeskreis der Universität Hannover e. V. ein Posterpreis für die drei besten Poster vergeben. Der NanoDay 2007 war mit ca. 200 Teilnehmern im Laufe des Tages ebenso gut besucht wie die vorherigen NanoDays.

Die Vorträge des NanoDay 2007 werden nach der Freigabe durch die Autoren auf der Website des LNQE als PDF zum Download bereit stehen.

Das LNQE bedankt sich bei allen Teilnehmern und Beitragenden für das gute Gelingen des NanoDay 2007. Wir sehen uns spätestens am NanoDay 2008!

Bauarbeiten des LNQE-Forschungsbaus haben begonnen

Feierliche Grundsteinlegung unter Beisein von Wissenschaftsminister Lutz Stratmann am 5. Oktober 2007.

Seit Anfang September 2007 rollen die Bagger, d. h. die Bauarbeiten des Neubaus Laboratorium für Nano- und Quantenengineering (LNQE) haben am Schneiderberg 38, 30167 Hannover begonnen. Die Bauzeit des 12,8 Mio. Euro teuren Baus beträgt voraussichtlich 18 Monate. Der tägliche Baufortschritt lässt sich mit der Webcam des LNQE verfolgen.

Die feierliche Grundsteinlegung war am 5. Oktober 2007. Die Grußworte hielten Dipl.-Ing. Matthias Reinhard (Leiter vom Staatlichen Baumanagement Hannover), Prof. Dr. Erich Barke (Präsident der Leibniz Universität Hannover), Lutz Stratmann (Nds. Minister für Wissenschaft und Kultur) und Prof. Dr. Rolf Haug (Vorstandssprecher des LNQE). Alle vier Redner betonten die große Bedeutung des Bauvorhabens für die Universität und für das Land Niedersachsen.

„Die Grundsteinlegung des Laboratoriums für Nano- und Quantenengineering ist für den Hochschul- und Wissenschaftsstandort Hannover eine der Bedeutendsten dieses Jahres“ so Minister Stratmann. Präsident Barke hob die Bedeutung des Neubaus für die Leibniz Universität Hannover hervor: „Durch das Forschungsgebäude erhält die Leibniz Universität Hannover eine reale, räumliche Basis für den Querschnittsbereich Nanotechnologie. Ganz im Sinne des neuen Leitbildes der Leibniz Universität Hannover werden gute Rahmenbedingungen für interdisziplinäre Strukturen als Basis für Exzellenz geschaffen. Mit dem neuen Gebäude gewinnt die Leibniz Universität Hannover an internationaler Wettbewerbsfähigkeit und Zukunftsfähigkeit.“ Prof. Haug bedankte sich ganz herzlich im Namen des gesamten LNQE bei allen Beteiligten für den Neubau.

Beim Vollzug der Grundsteinlegung wurde eine Kupferhülse eingemauert, die eine Tageszeitung, Euromünzen und den Jahresbericht 2006 des LNQE enthält.

Beim anschließenden Umtrunk, zu dem Bauamtsleiter Reinhard einlud, konnten sich alle Gäste bei Sekt und Erbsensuppe über Außenansichten und Baupläne des Neubaus durch das Architekturbüro KSP Engel und Zimmermann informieren.

Siehe auch: Pressemeldung des MWK

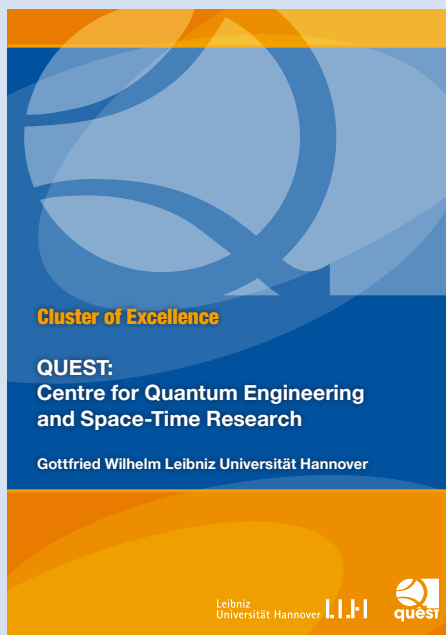
10.10.2007



23.10.2007

Neues Exzellenzcluster an der Leibniz Universität Hannover

Prof. Dr. Wolfgang Ertmer, Mitglied des LNQE, koordiniert QUEST - Zentrum für Quantenengineering und Raum-Zeit-Forschung.



Cover des Antrages QUEST.

Die zweite Runde in der Exzellenzinitiative ist entschieden: Am Freitag, den 19. Oktober 2007 hat der Bewilligungsausschuss die Finanzierung von 21 Graduiertenschulen, 20 Exzellenzclustern und sechs Zukunftskonzepten beschlossen. Darunter ist der Exzellenzcluster QUEST der Leibniz Universität Hannover!

QUEST (Centre for Quantum Engineering and Space-Time Research) wird schwerpunktmäßig die Forschung zum Quantenengineering sowie zur Raumzeit vorantreiben, die zugrunde liegende Physik erforschen und innovative Methoden für neue Anwendungen erschließen. Die Aktivitäten von QUEST werden vier Kernbereiche aktueller Forschung deutlich voranbringen: Quantenengineering, Quantensensoren, Physik der Raumzeit und Zukunftstechnologien. Der Exzellenzcluster QUEST vereinigt die Expertise der Leibniz Universität Hannover auf den Gebieten Quantenoptik, Physik der kondensierten Materie, Gravitationsphysik, einschließlich der zugeordneten theoretischen Physik, Geodäsie und Mathematik mit der Kompetenz exzellenter Partnerinstitutionen aus ihrer Umgebung, wie dem Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik, dem Gravitationswellendetektor GEO600, der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt Braunschweig, dem Laser Zentrum Hannover e.V., dem Zentrum für Angewandte Raumfahrttechnologie und Mikrogravitation sowie ausgezeichneten Industriepartnern. Fünf Arbeitsgruppen des LNQE sind in QUEST vertreten: Jan Arlt (IQ), Boris Chichkov (LZH), Wolfgang Ertmer (IQ), Rolf Haug (IFKP) und Michael Oestreich (IFKP). Das LNQE-Office hat bei der erfolgreichen Antragstellung intensiv mitgewirkt.

Mehr zu QUEST unter: www.quest.uni-hannover.de

12.12.2007

Mitgliederversammlung des LNQE 2007

Kurzübersicht über die Aktivitäten des LNQE des Jahres 2007.

Am Mittwoch, den 05.12.2007 fand die Mitgliederversammlung des LNQE 2007 statt. Die wichtigsten Punkte der Tagesordnung sollen hier kurz wiedergegeben werden:

- Bericht des Vorstandes: Prof. Rolf Haug (Sprecher des Vorstandes) informierte über die Ereignisse des Jahres 2007. Hauptpunkte:
 - LNQE-Gebäude und Wissenschaftsrats-Antrag
 - Evaluation LNQE
 - LNQE „on the Road“
 - NanoDay 2007
 - Studiengang „Nanotechnologie“
- Vorläufiger Finanzbericht/Festlegung des Mitgliedbeitrages 2008: Die Mitgliederversammlung hat den Mitgliedsbeitrag für 2008 auf 2000 Euro festgelegt.
- Geplante Drittmittelprojekte: Es wurden mehrere geplante Projekte vorgestellt:
 - Geplanter SFB NanoProd / Dr. Fritz Schulze Wischeler
 - Nano-Speicherung / Prof. Dr. Jürgen Caro
 - Nano-Engineering / Prof. Dr. -Ing. Hans-Heinrich Gatzert
 - NANOMA (Nanos in Matrix) / Prof. Dr. H. Jörg Osten
 Ab Januar wird zu Treffen eingeladen werden, um die Ideen weiter zu entwickeln und daraus größere, gemeinsame Anträge zu generieren.

Das Protokoll der Mitgliederversammlung steht im internen Bereich den Arbeitsgruppen des LNQE zum Download zur Verfügung.

NanoDay 2007

Am Donnerstag, den 27. September 2007 fand der NanoDay 2007 des Laboratoriums für Nano- und Quantenengineering (LNQE) in Hannover statt. Es war bereits der dritte NanoDay des LNQE dieses jährlichen Workshops. In 13 kurzen Vorträgen und einer Postersitzung mit 48 Postern wurde der breite Querschnitt der interdisziplinären Forschung auf dem Gebiet Nanotechnologie gezeigt.

Der NanoDay 2007 war mit Ca. 200 Teilnehmern im Laufe des Tages ebenso gut besucht wie die vorherigen NanoDays.

Erstmals wurde mit freundlicher Unterstützung des Freundeskreis der Universität Hannover e. V. ein Preis vergeben. Die Preisträger sind:

1. Preis: Falk Heinroth, „Microstructured templates produced using femtosecond laser pulses as templates for the deposition of nanoporous silicas“
2. Preis: Hauke Horn, „Spin Noise Spectroscopy“
3. Preis: Jian Xiong, „Impact of parasitic gate tunneling currents in nanoscaling analog circuits“

Herzlichen Glückwunsch!

Die gezeigten Beiträge verdeutlichen die wissenschaftliche Vielfalt der Forschung im LNQE.

Das Programm

(Die Vorträge gibt es als PDF auf der LNQE-Website zum downloaden)

„Kopplung von Wärme- und Impulstransfer in Gasen auf der Nanometerskala“

Steffen Hardt

Institut für Nano- und Mikroprozessortechnik

„Fertigung eines Nanosensors für Dehnungsmessung an Kohlefasern mittels fokussiertem Ionenstrahl (FIB)“

Alexander Belski, Hans-Heinrich Gatzert

Institut für Mikrotechnologie

„Single electron counting for atto-Ampere currents“

Frank Hohls, Rolf Haug

Institut für Festkörperphysik, Abteilung Nanostrukturen

„Vom Molekül zur Schicht - neue Wege zu selbstreinigenden Oberflächen“

Ralf Dillert

Institut für Technische Chemie, Photocatalysis and Nanotechnology

„Auslegung und Ansteuerung von Mikrolinearmotoren“

Karsten Wiedmann, Sven Demmig, Ralf Gehrking, Bernd Ponick, Axel Mertens

Institut für Antriebssysteme und Leistungselektronik

„Funktionalisierung von Implantatoberflächen durch nano- und mikroskalische Topographien am Beispiel des Cochlea-Implantates“

Ute Reich¹, E. Fadeeva³, G. Paasche¹, G. Reuter¹, J. Koch³, B. Chichkov³, P. Müller², T. Stöver¹, T. Lenarz¹

¹Klinik für Hals-, Nasen-, Ohrenheilkunde der Medizinischen Hochschule Hannover

²Helmholtz Zentrum für Infektionsforschung, Braunschweig

³Laserzentrum Hannover e.V.

„Heißsprägen von Nanostrukturen“

Maik Rahlves, Thomas Fahlbusch, Eduard Reithmeier

Institut für Mess- und Regelungstechnik

„Molekular-dynamische FEM-Simulation (MDFEM) von Kohlenstoffnanoröhren und Elastomerwerkstoffen unter Verwendung des Finite Elemente Programmes ABAQUS“

Lutz Nasdala^{1,2}, Raimund Rolfes²

¹Abaqus Deutschland GmbH

²Institut für Statik und Dynamik

„Farbstoffsolarzellen auf Zinkoxid-Basis“

Torsten Oekermann

Institut für Physikalische Chemie und Elektrochemie

Leibniz Universität Hannover | **Laboratorium für Nano- und Quantenengineering LNQE**

NanoDay 2007
Donnerstag 27.09.2007
 Leibniz Universität Hannover, Welfengarten 1
 30167 Hannover, Hauptgebäude (1101)
 Vorträge im Kleinen Physikhsaal (F342), Poster im Lichthof

Programm:

09:00 - 10:15: Begrüßung R. Haug
 09:15 - 10:30: Sitzung I
 K. Wiedmann: „Auslegung und Ansteuerung von Mikrolinearmotoren“
 Institut für Technische Chemie, Photocatalysis and Nanotechnology
 A. Belski, H. Gatzert: „Fertigung eines Nanosensors für Dehnungsmessung an Kohlefasern mittels fokussiertem Ionenstrahl“
 Institut für Mikroprozessortechnik
 R. Dillert: „Vom Molekül zur Schicht - neue Wege zu selbstreinigenden Oberflächen“
 Institut für Technische Chemie
 10:30 - 11:00: Kaffeepause
 11:00 - 12:15: Sitzung II
 U. Reich: „Funktionalisierung von Implantatoberflächen durch nano- und mikroskalische Topographien am Beispiel des Cochlea-Implantates“
 Institut für Hals-, Nasen-, Ohrenheilkunde der Medizinischen Hochschule Hannover
 K. Wiedmann: „Auslegung und Ansteuerung von Mikrolinearmotoren“
 Institut für Technische Chemie
 12:15 - 13:30: Mittagspause
 13:30 - 14:00: Sitzung III
 S. Demmig: „Auslegung und Ansteuerung von Mikrolinearmotoren“
 Institut für Antriebssysteme und Leistungselektronik
 P. Müller, T. Stöver, T. Lenarz, G. Paasche, G. Reuter, J. Koch, B. Chichkov, R. Gehrking, R. Gatzert, A. Belski, H. Gatzert: „Funktionalisierung von Implantatoberflächen durch nano- und mikroskalische Topographien am Beispiel des Cochlea-Implantates“
 Klinik für Hals-, Nasen-, Ohrenheilkunde der Medizinischen Hochschule Hannover
 K. Wiedmann: „Auslegung und Ansteuerung von Mikrolinearmotoren“
 Institut für Technische Chemie
 14:00 - 15:00: Kaffeepause
 15:00 - 16:15: Sitzung IV
 M. Rahlves: „Heißsprägen von Nanostrukturen“
 Institut für Mess- und Regelungstechnik
 L. Nasdala: „Molekular-dynamische FEM-Simulation (MDFEM) von Kohlenstoffnanoröhren und Elastomerwerkstoffen unter Verwendung des Finite Elemente Programmes ABAQUS“
 Abaqus Deutschland GmbH
 16:15 - 17:30: Sitzung V
 T. Oekermann: „Farbstoffsolarzellen auf Zinkoxid-Basis“
 Institut für Physikalische Chemie und Elektrochemie
 17:30: Ende der Vorträge

www.LNQE.uni-hannover.de/nanoday2007.htm | Gäste sind herzlich willkommen!

„Laserbasierte Generierung von bioaktiven Nanokompositen für medizinische Implantate“

Anne Hahn, Stephan Barcikowski, Niko Bärsch, Ramin Sattari, Jurij Jakob, Boris Chichkov
 Laser Zentrum Hannover e.V., Nanotechnology Department

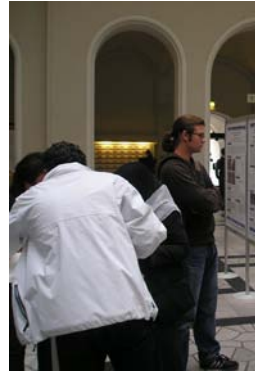
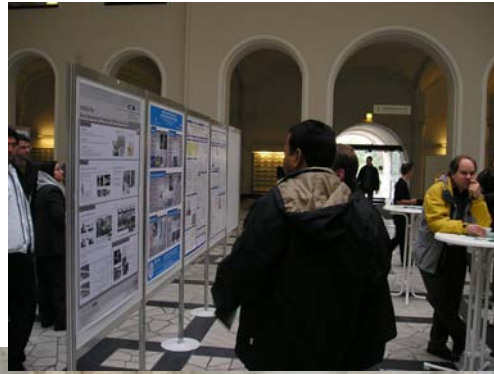
„Zukunftskonzepte für den Flash-Speicher: vom Multi-Nanoclusterspeicher zum Einzelnanocluster-Bauelement“

Robby Peibst, T. Dürkop, E. Bugiel, K.R. Hofmann
 Institut für Materialien und Bauelemente der Elektronik, Fachgebiet Bauelemente

„Transportbänder mit optimierten Eigenschaften durch die Dotierung mit nanoskaligen Füllstoffen“

Andreas Stock, Sascha Falkenberg, Tobias Wennekamp, Ludger Overmeyer
 Institut für Transport- und Automatisierungstechnik

Begrüßung durch R. Haug

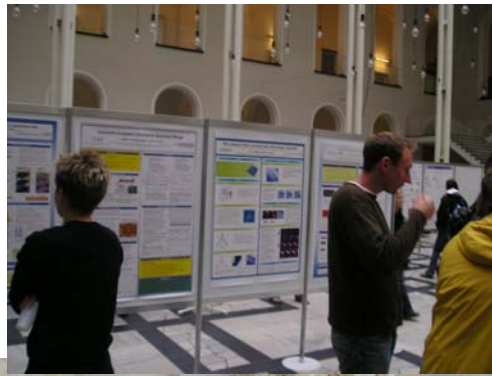
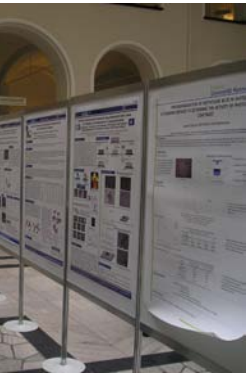


NanoDay



13 Vorträge mit je 20 Minuten Länge von den Arbeitsgruppen des LNQE

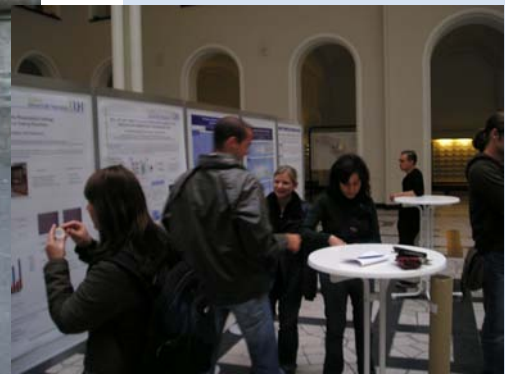




Postersitzung mit 48 Postern im Lichthof des Hauptgebäudes der Universität



Konferenzfoto am Nachmittag



Posterpreis (mit freundlicher Unterstützung des Freundeskreis der Universität Hannover e. V.)

Kolloquien in 2007

31.01.2007

„Spin transport in (Ga,Mn)As nanostructures“

G. Schmidt*, C. Gould, L.W. Molenkamp
Physikalisches Institut (EP3), Universität Würzburg,
Am Hubland, 97074 Würzburg, Germany

28.11.2007

„Nanonasen für Handys und Sonnenbrillen für Gebäude: Nanophotonische Komponenten für die Sensorik, Informations- und Medizintechnik“

Prof. Hartmut Hillmer
Institut für Nanotechnologie und Analytik (INA)
Universität Kassel, Heinrich-Plett-Strasse 40, 34128 Kassel



LNQE on the Road in 2007

Ziel der Veranstaltung ist, wissenschaftliche Kontakte und Kooperationsmöglichkeiten insbesondere interdisziplinärer Art aufzubauen und zu verfestigen. Hierfür war das LNQE zu Gast bei den verschiedenen Gruppen des LNQE jeweils eines Fachs. Der Ablauf bestand aus kurzen Übersichtsvorträgen, Institutsführungen und einem gemütlichen Beisammensein mit Diskussionen.



11.04.2007

Besuch des LNQE in der Chemie

Ort: Dr. Oetker Hörsaal, Callinstr. 3a

Vortrag Prof. Holger Butenschön: Organische Chemie
Vortrag Prof. Peter Behrens: Anorganische Chemie
Vortrag Prof. Detlef Bahnemann: Technische Chemie
Vortrag Prof. Jürgen Caro: Physikalische Chemie



09.05.2007

Besuch des LNQE in der Festkörperphysik

Ort: Hörsaal 031 im Laboratorium für Informationstechnologie, Schneiderberg 32

Vortrag Prof. Rolf Haug
Vortrag Prof. Karina Morgenstern
Vortrag Prof. Michael Oestreich
Vortrag Prof. Herbert Pfnür



Besuch des LNQE im Institut für Solarenergieforschung Hameln-Emmerthal (ISFH)

Ort: ISFH, Am Ohrberg 1,31860 Emmerthal

Vortrag Prof. Rolf Brendel
Vortrag Nils-Peter Harder
Vortrag Heiko Plagwitz
Vortrag Jan Schmidt

06.06.2007



Besuch des LNQE in der Elektrotechnik

Ort: Hörsaal 031 im Laboratorium für Informationstechnologie, Schneiderberg 32

Vortrag Prof. Jörg Osten
Vortrag Prof. Bernd Ponick
Vortrag Prof. Wolfgang Mathis
Vortrag Prof. Karl Hofmann
Vortrag PD Andreas Fissel

27.06.2007

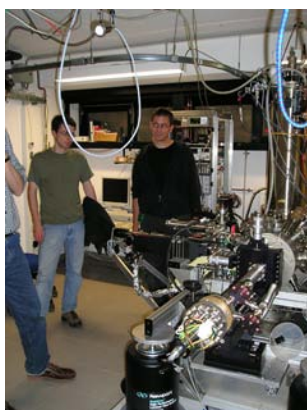


Besuch des LNQE im Maschinenbau

Ort: Produktionstechnisches Zentrum, An der Universität 2, D-30823 Garbsen

Vortrag Prof. Bernd-Arno Behrens
Vortrag Jörg Seewig
Vortrag Prof. Hans-Heinrich Gatzert
Vortrag Prof. Steffen Hardt
Vortrag Andreas Stock

11.07.2007



Leibniz
Universität Hannover

L I I I

Laboratorium für
Nano- und Quantenengineering

LNQE

FREIHEIT, ABENTEUER, NANOTECHNOLOGIE

LNQE

ON THE ROAD

- Kurzvorträge, Institutsführungen, Brainstorming & Get-Together -



Pressespiegel

(Artikel sind verlinkt)

- | | |
|---------------|---|
| 29.01.2007 | „Leibniz-Uni: Baupläne für 78 Millionen Euro“
Neue Presse |
| 15.03.2007 | „Neues Nano-Zentrum“
Hannoversche Allgemeine Zeitung |
| 15.03.2007 | „Brache am Schneiderberg wird bebaut“
Stadt-Anzeiger-Nord |
| 26.05.2007 | „Grünes Licht für Uni-Neubau“
Hannoversche Allgemeine Zeitung |
| 26.05.2007 | „Millionen für Uni und TiHo“
Neue Presse |
| 12.07.2007 | „Uni-Bau soll Passivhaus sein“
Hannoversche Allgemeine Zeitung |
| 19.07.2007 | „Nordstadt / Schneiderberg - Uni-Bau soll Passivhaus sein“
Hannoversche Allgemeine Zeitung Stadtanzeiger Nord |
| August 2007 | „Neues Zentrum für Nanotechnologie kommt“
Uni Intern |
| 18.09.2007 | Immobilienmarktbericht 2007 der Region Hannover |
| 27.09.2007 | „Großbaustelle für die Wissenschaft“
Hannoversche Allgemeine Zeitung |
| 05.10.2007 | „Neues Laboratorium für Nano- und Quantenengineering“
Niedersächsisches Ministerium für Wissenschaft und Kultur |
| 06.10.2007 | „Fortschritte für die Forschung“
Hannoversche Allgemeine Zeitung |
| 11.10.2007 | „Zwölf Millionen Euro für die Technologie der Zukunft“
Neue Presse |
| 17.10.2007 | „Millionen für die Wissenschaft“
Hannoversche Wirtschaftszeitung |
| November 2007 | „Grundstein gelegt“
Uni Scene |

„Aufregende Zeiten für die Nanotechnologen in Hannover“

Uni Intern

November 2007

„Grüne kritisieren Labor“

Hannoversche Allgemeine Zeitung

13.11.2007

„Grüne kritisieren Laborbau“

Hannoversche Allgemeine Zeitung Stadtanzeiger Nord

15.11.2007

„35 Bauvorhaben geplant“

Neue Presse

17.11.2007

„Die Wunschliste der Uni ist lang“

Hannoversche Allgemeine Zeitung

26.11.2007

„10 Millionen: VW-Stiftung unterstützt die Forschung“

Neue Presse

28.11.2007

Projekte in 2007

Im Folgenden finden Sie eine Auswahl von Projekten, die die inhaltliche Ausrichtung des LNQE veranschaulichen soll.

Integration of functional epitaxial oxides into silicon: From high-K application to nanostructures

H.J. Osten^{1,*}, M. Czernohorsky¹, R. Dargis², A. Laha¹, D. Kühne², E. Bugiel¹, A. Fissel²

¹ Institute of Electronic Materials and Devices, Leibniz University of Hannover, Appelstr. 11A, D-30167 Hannover, Germany

² Information Technology Laboratory, Leibniz University of Hannover, Schneiderberg 32, D-30167 Hannover, Germany

* Tel: +49-511-7624211, email: osten@mbe.uni-hannover.de

1. Introduction

There are several attempts to increase the material variety that is compatible with Si technologies. The ability to integrate crystalline dielectric barrier layers into silicon structures can open the way for a variety of novel applications ranging from high-*K* replacements in future MOS devices to oxide/silicon/oxide heterostructures for nano-electronic application in future quantum-effect devices.

Here, we will focus on the epitaxial growth of gadolinium oxide (Gd_2O_3) in the cubic *bixbyite* structure which has a large band gap of about 6 eV and nearly symmetrical band offsets to Si, as well as a low lattice mismatch of about 0.5 %. First, we will demonstrate and discuss the epitaxial growth on different oriented Si substrates based on surface and interface considerations. Then, we report about a novel approach to fabricate single-crystalline nanostructures with

a Si layer buried in an oxide matrix on Si(111) without any additional surface modifications or surfactants.

2. Growth of crystalline lanthanide oxides

The films were grown in an integrated multi chamber ultrahigh vacuum system using solid source molecular beam epitaxy (MBE). On Si(100) substrate, the grown layers exhibit the known two types of (110)-oriented domains, with two orthogonal in-plane orientations [1]. On (111) oriented Si surface, *bixbyite* Gd_2O_3 grows epitaxially when the substrate temperature is above 600 °C. Here, the oxide exhibits an A/B twining relationship where B is related to the substrate orientation A by a 180 deg rotation around the Si(111) surface normal. On a Si(110) surface, grown layers exhibit pronounced faceting by the development of low-energy {111} facets. Figure 1 shows the X-ray (Θ - 2Θ scan) diffraction patterns of Gd_2O_3 thin films grown on different Si substrates [2].

3. Application as high-K replacement

Layers grown under best vacuum conditions often exhibit poor dielectric properties due to the formation of crystalline interfacial silicide inclusions [3]. Additional oxygen supply during growth improves the dielectric properties significantly (Fig. 2) [4]. Layers grown by an optimized MBE process (see Fig. 3) display a sufficiently high-*K* value to achieve equivalent oxide thickness values < 1 nm (Fig. 4), combined with ultra-low leakage current densities, good reliability, and high electrical breakdown voltage. This makes epitaxial Gd_2O_3 layers excellent alternative for replacing SiO_2 as a gate dielectric [5,6].

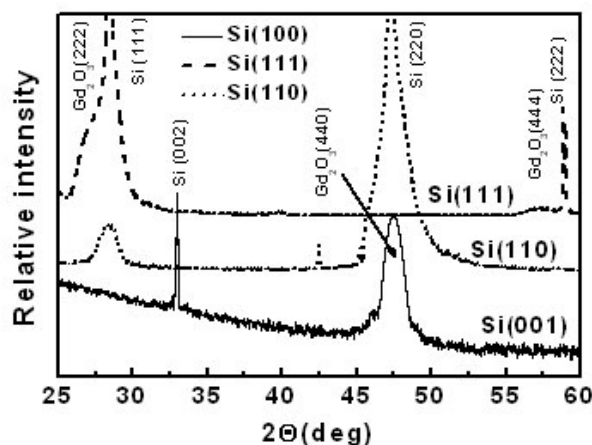


Figure 1: X-ray diffraction patterns of Gd_2O_3 thin films grown on silicon substrates with different orientations at a substrate temperature of 700 °C with oxygen partial pressure of $5.0 \cdot 10^{-7}$ mbar.

4. Application for novel quantum-effect devices

Quantum-effect devices based on silicon are promising for future nanoelectronic application. Here, double-barrier structures using epitaxial insulators as barriers and Si as quantum-well are particularly interesting. The fabrication of such an epitaxial insulator/Si/insulator heterostructure requires the growth of ultra-thin, atomically flat and defect-free insulator barriers on Si, and the growth of epitaxial Si quantum-well layers on the insulator. However, this can not be achieved straightforward because of the differences in the surface free energy between the insulator and silicon. We will present a new approach for nanostructure formation which is based on solid-phase epitaxy of the Si quantum-well combined with simultaneous vapor-phase epitaxy of the insulator on top of the quantum-well [7]. Ultra-thin single-crystalline Si buried in a single-crystalline insulator matrix with sharp interfaces was obtained by this approach on Si(111) (Figs. 5,6). Finally, the incorporation of crystalline Si islands into single-crystalline oxide layers will be demonstrated, what could be of interest for spin-electronics as well as future memory devices.

References

- [1] H. J. Osten, E. Bugiel, M. Czernohorsky, Z. Elassar, O. Kirfel, A. Fissel, Topics in Applied Physics, Vol. 106, pp. 101-114, Springer-Verlag 2007.
- [2] A. Laha, H.J. Osten, A. Fissel, Appl. Phys. Lett. 89 (2006) 143514.
- [3] A. Fissel, Z. Elassar, O. Kirfel, E. Bugiel, M. Czernohorsky, H.J. Osten. J. Appl. Phys. 99 (2006) 074105.
- [4] M. Czernohorsky, A. Fissel, E. Bugiel, O.Kirfel, H.J. Osten, Appl. Phys. Lett. 88, 152905 (2006).
- [5] A. Laha, A. Fissel, E. Bugiel, H.J. Osten, Appl. Phys. Lett. 88 (2006) 172107.
- [6] H.D.B. Gottlob, *et al.*: Proc. 36th European Solid-State Device Research Conference, 2006, pp. 150.
- [7] A. Fissel, D. Kühne, E. Bugiel, H.J. Osten, Appl. Phys. Lett. 88, 153105 (2006).

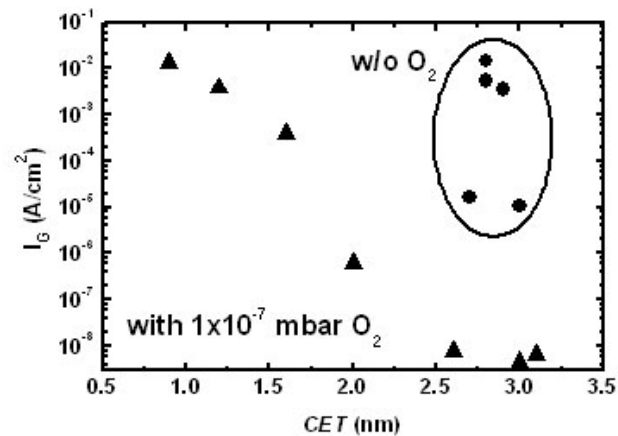


Figure 2: Leakage current densities measured at a gate voltage $|V_g - V_{FB}| = 1$ V towards accumulation as a function of the capacitance equivalent thickness (CET) for Gd_2O_3 samples grown at 570 °C with and without additional oxygen on p- and n-type Si(001).

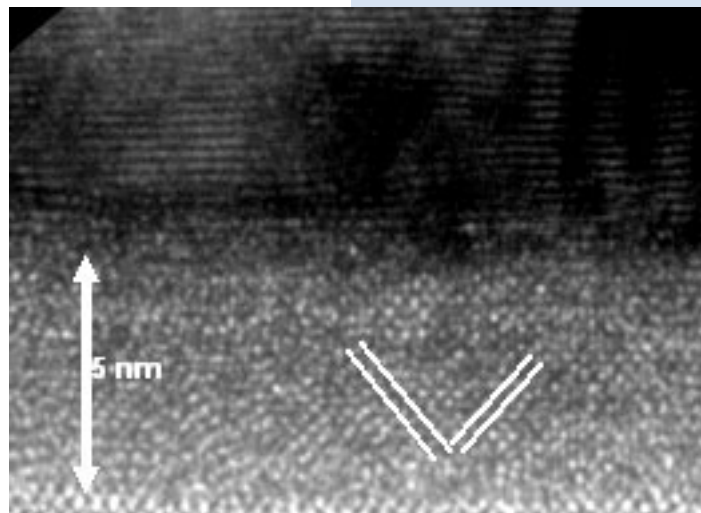


Figure 3: High-resolution cross-sectional TEM image of a Pt/ Gd_2O_3 /Si(001) stack with a crystalline high- K insulator in the as-grown state. No interfacial layer is visible.

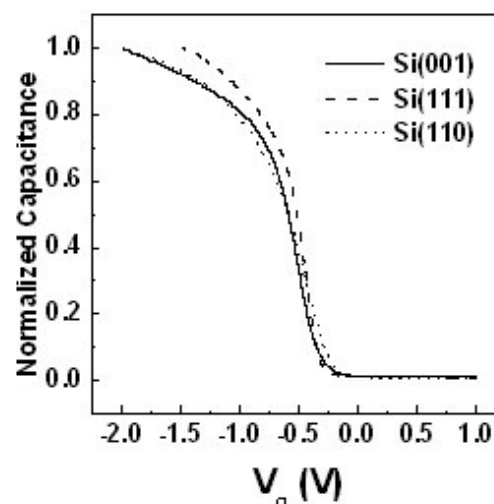


Figure 4: Normalized capacitance-voltage characteristics of epitaxial Gd_2O_3 thin films on different silicon substrates.

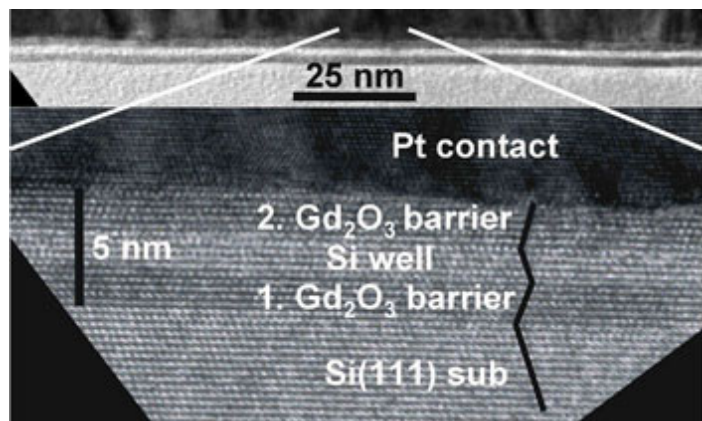


Figure 5: HRTEM micrographs of a $\text{Gd}_2\text{O}_3/\text{Si}/\text{Gd}_2\text{O}_3$ double-barrier structure grown on Si(111) by solid-vapor-phase epitaxy.

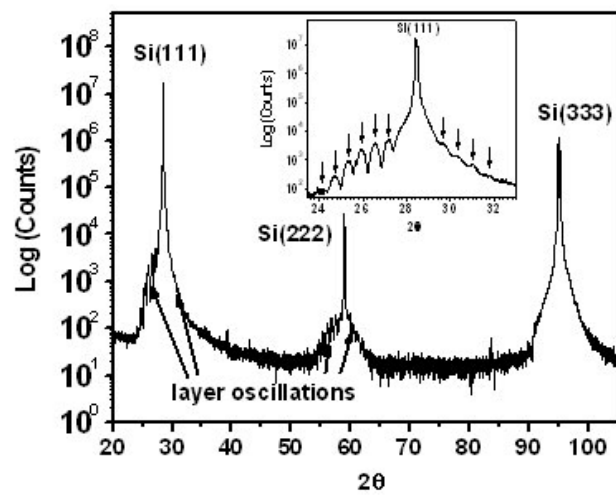


Figure 6: XRD Θ - 2Θ scan profile of a 1.8 nm Gd_2O_3 /12.3 nm Si/2.4 nm Gd_2O_3 double-barrier structure grown on Si(111). The inset shows the region around the Si(111) diffraction peak with thickness interference fringes (indicated by arrows).

Momentum Transfer to Nanoobjects between Parallel Plates at Constant Temperature

S. Hardt¹, S. Tiwari², and A. Klar^{2,3}

¹ Institut für Nano- und Mikroprozessertechnik, Leibniz Universität Hannover, D-30167 Hannover, Germany

² Fraunhofer ITWM, D-67663 Kaiserslautern, Germany

³ Fachbereich Mathematik, TU Kaiserslautern, D-67663 Kaiserslautern, Germany

Abstract

A small-scale, trapezoidal rigid body in the gas-filled gap between two parallel plates at different temperatures is considered. An analytical expression for the thermally induced force onto the body in the direction parallel to the plates valid for an infinite Knudsen number is derived. For this purpose diffuse reflection of the gas molecules at the solid walls is assumed. Simultaneously, Monte-Carlo simulations are performed allowing an extension of the analysis to Knudsen numbers of the order of one. The numerical and the analytical results show excellent agreement, indicating that a temperature gradient orthogonal to the plates can induce a significant force in parallel direction, a phenomenon without analogy in the macroworld. This force is only slightly reduced when a Knudsen number of one is considered. In addition to the diffuse-reflection boundary condition, a mixture of diffuse and specular reflection is studied. The practical relevance of the results is exemplified by considering a nanoscopic platelet of rigid material between two plates at different temperatures.

1. INTRODUCTION

On the scale below one micrometer internal gas flows at standard conditions exhibit rarefaction effects which are due to the fact that collisions of molecules with the boundary of the flow domain start to play an important role [1]. In such small-scale systems transport phenomena that are unknown from or unimportant in macroscopic devices can appear [2,3]. Corresponding effects need to be taken into account when designing nanomachines and devices, and may be exploited to create novel operation and actuation principles. One example is thermal creep, being the induc-

tion of a mass flow by a temperature gradient [4]. Another example is the thermophoretic force on a rigid body immersed in a gas of nonuniform temperature [5]. By contrast to these effects where a momentum transfer is induced parallel or antiparallel to the temperature gradient, in this article we wish to show how the motion of a small solid body *perpendicular* to a temperature gradient can be induced.

The situation we consider is an arrangement of parallel plates between which a rigid body of trapezoidal cross-section can move, as depicted in Fig. 1(a). The gap is filled with a gas and it is assumed that the surfaces of the plates are kept at constant, but generally different temperatures. The goal of our studies is to compute the force on the rigid body (the “nanoobject”) due to collisions with surrounding gas molecules. For a gas at zero Knudsen number (Kn), defined as the ratio of the molecular mean free path and the width of the gap, it can easily be shown that the force components parallel to the walls of the plates due to collisions with the right and the left wall of the rigid body exactly cancel,

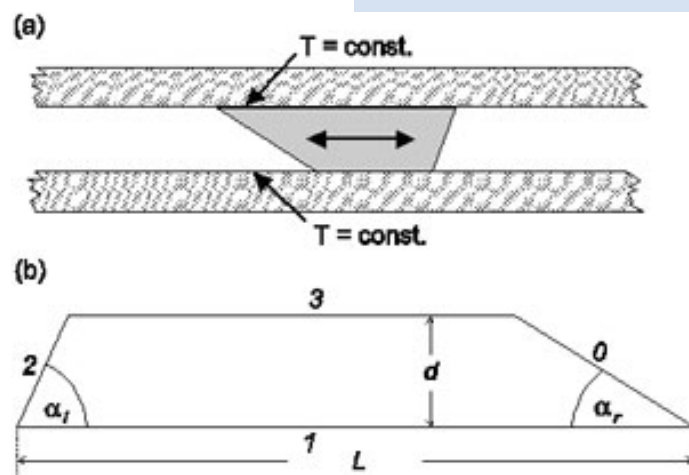


FIG. 1. Schematic of a nanoobject of trapezoidal shape moving between parallel plates kept at constant temperature (a) and sketch of the geometrical domain for which the force calculations have been performed (b).

such that the net force on the body is zero. The question whether or not this situation changes when the Knudsen number is larger than 1 is the main objective of this study. For this purpose the thermally-induced momentum transfer onto the nanoobject will first be calculated analytically for the case $\text{Kn} = \infty$, followed by a numerical treatment allowing to extend the studies into the range of Knudsen numbers around unity.

II. ANALYTICAL MODEL

For the force calculations it is assumed that infinitely many identical nanoobjects separated by a distance L (measured at the bottom plate) are arranged periodically within the gap. It is then sufficient to consider the geometrical domain between two successive bodies, as depicted in Fig. 1(b). The case of a single body in an infinitely long gap is recovered by taking the limit $L \rightarrow \infty$. The geometry of the domain is fully defined by the parameters L , d , α_r and α_p . For later convenience the walls of the trapezoidal domain are labeled with numbers 0, ..., 3, where 0 corresponds to the left and 2 to the right wall of the nanoobject. All analytical calculations reported in this letter have been performed in two spatial dimensions.

As a first step, we investigate the stationary-state configuration (in the sense of a statistical average) of an ensemble of gas molecules in the limit of free molecular flow. The molecular velocity distribution is then solely determined by the boundary conditions at the walls and the geometry of the domain. Before going back to the specific situation shown in Fig. 1 let

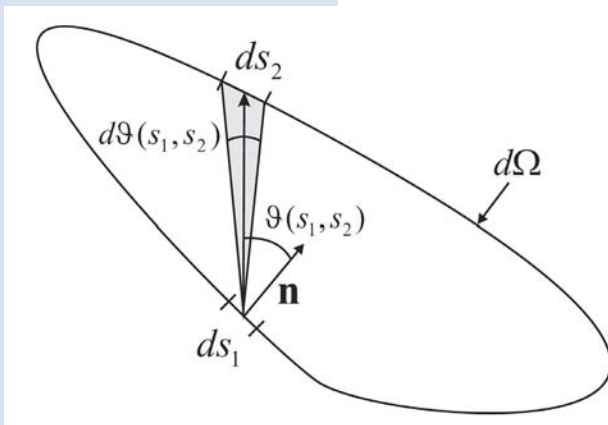


FIG. 2. Domain Ω with boundary $d\Omega$ in which gas molecules are moving.

us more generally consider a convex, simply connected two-dimensional domain Ω as depicted in Fig. 2. Inside the domain with boundary $d\Omega$ gas molecules can move freely. We introduce an arc-length parameter $s \in [0, s_{\max}]$ that measures the length of the boundary $d\Omega$. The number of molecules leaving an infinitesimal segment of the boundary ds_1 and impacting on another segment ds_2 is given by $\dot{n}_g(s_1, \vartheta) ds_1 ds_2$, where ϑ is the angle between the vector connecting s_1 and s_2 and the unit normal on ds_1 . Furthermore, we introduce the total number of molecules per arc-length emitted from a wall segment as

$$\dot{n}(s) = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \dot{n}_g(s_1, \vartheta) d\vartheta \quad (1)$$

Because of mass conservation for a stationary-state molecular distribution in the domain Ω , we require that the total number of molecules per unit time being emitted from each wall segment ds equals the sum of the molecules per unit time being emitted from all other wall segment and impacting on ds . Mathematically, this is expressed as

$$\dot{n}(s) = \int_0^{s_{\max}} \chi(s', s) \dot{n}(s') ds', \quad (2)$$

where $\chi(s', s) ds$ is the probability that a molecule emitted from s' impacts on ds . χ usually displays a complicated functional dependence on the geometry of the domain Ω and the angular dependence \dot{n}_g of the emission. Eq. (2) is a Fredholm integral equation of the second kind and can be solved numerically using an approximation for the integral and an iteration scheme.

In the following we simplify the problem by assuming that complete accommodation of molecules reflected from the walls of the domain takes place, which means that a molecule impacting on a wall loses the "memory" of its velocity before the collision and is reflected diffusively with a Maxwell distribution reflecting the local temperature at the wall. The corresponding boundary condition will be denoted as diffuse-reflection boundary condition (DRBC). Specifically, the angular distribution of the diffusively reflected molecules is given by

$$\dot{n}_g(s, \vartheta) = \frac{1}{2} \dot{n}(s) \cos \vartheta. \quad (3)$$

It should be pointed out that the DRBC is clearly not valid in general, especially at higher energies [6]. Experimental results, however, indicate that thermal and momentum accommodation coefficients of more than 0.95 can be reached in interactions of molecules with surfaces [7]. Thus, the DRBC should at least come close to a number of realistic situations. In order to capture a broader class of gas-surface interaction phenomena, some more complicated empirical models have been developed [8,9].

The DRBC greatly simplifies the solution of Eq. (2), as will be shown in the following. The principle of detailed balance expresses that in a steady-state situation a process and its reverse occur with the same probability. Translated to our problem it follows that

$$\dot{n}(s')\chi(s',s) = \dot{n}(s)\chi(s,s') \quad (4)$$

In addition, we exploit an analogy between free molecular gas dynamics and the problem of radiation heat transfer between surfaces. Within that analogy the quantity $\chi(s',s)ds$ takes the role of a view factor for radiation going from ds' to ds . If and only if the angular dependence of that radiation is given by Eq. (3), the reciprocity relation

$$\chi(s',s) = \chi(s,s') \quad (5)$$

is valid [10]. Thus, we arrive at the important identity $\dot{n}(s') = \dot{n}(s)$, concluding that the number of molecules emitted from $d\Omega$ per unit length and unit time is constant over the whole boundary.

We will now use these results to compute the forces on the walls of the nanoobject, areas 0 and 2 in Fig. 1(b), in the limit $L \rightarrow \infty$. In that limit the contribution of the interaction between walls 0 and 2 vanishes and only the interaction with molecules emitted from the horizontal walls has to be taken into account. Consider, without loss of generality, the momentum transfer on a segment ds of wall 0, as depicted in Fig. 3. Molecules impacting on ds with an angle $\alpha < \alpha_r$ ($\alpha < \alpha_r$) originate from wall 3 (wall 1). No matter whether ds' lies on wall 1 or on wall 3, the number of molecules per unit time emitted from ds' impacting on ds is given by

$$n_g(s',\vartheta)ds'd\vartheta = \frac{1}{2}\dot{n}(s')\cos\vartheta ds'd\vartheta \quad (6)$$

where $d\vartheta$ is the angle under which ds' appears viewed from ds' . Using the relations

$$rd\vartheta = \sin\alpha ds, \vartheta = \alpha_r - \alpha + \frac{\pi}{2}, rd\alpha = \sin(\alpha - \alpha_r)ds',$$

and $\dot{n}(s') = \dot{n}(s)$ it follows that

$$n_g(s',\vartheta)ds'd\vartheta = \frac{1}{2}\dot{n}(s)\sin\alpha dsd\alpha \quad (7)$$

In order to compute the force on wall 0, the velocity distribution of the molecules emitted from s' has to be taken into account. For diffuse reflexion this distribution is Maxwellian, giving that the number of molecules per unit time emitted from ds' impacting on ds with a velocity magnitude lying between u and $u + du$ is given by

$$\frac{4\beta^{3/2}}{\sqrt{\pi}}n_g(s',\vartheta)u^2e^{-\beta u^2}duds'd\vartheta$$

$$= \frac{2\beta^{3/2}}{\sqrt{\pi}}\dot{n}(s)u^2e^{-\beta u^2}duds\sin\alpha d\alpha \quad (8)$$

where Eq. (7) has been used and $\beta = (2RT)^{-1}$, with R being the quotient of Boltzmann's constant k and the molecular mass m . In this expression, one factor of u comes from the phase-space element in 2D, while the other factor is due to the fact that the molecular flux is computed by multiplying the density with velocity.

The force in x -direction exerted on ds by molecules originating from ds' with velocity magnitudes between u and $u + du$ is then given by

$$\hat{f}_x^{(0)}(s,s')duds'd\alpha = \frac{2m\beta^{3/2}}{\sqrt{\pi}} \cdot \dot{n}(s)u^3e^{-\beta u^2}\cos(\alpha_r - \alpha)\sin\alpha duds'd\alpha \quad (9)$$

The total force on ds follows by integration over the angle and velocity intervals

$$f_x^{(0)}(s)ds = \frac{2m}{\sqrt{\pi}}\dot{n}(s)ds$$

$$\left(\int_0^{\alpha_r} \int_0^\infty u^3 \beta^{3/2} \exp(-\beta u^2) \cos(\alpha_r - \alpha) \sin\alpha du d\alpha \right) \cdot (10)$$

$$+ \left(\int_{\alpha_r}^\pi \int_0^\infty u^3 \beta^{3/2} \exp(-\beta u^2) \cos(\alpha_r - \alpha) \sin\alpha du d\alpha \right)$$

where the angle integral has been split into two parts since in general the temperatures on walls 1 and 3 are different, i.e. $\beta = \beta(\alpha)$. Performing the integrations over u , α , and finally over s gives the total force in x -direction on wall 0 as

$$F_x^{(0)} = \frac{m}{2\sqrt{\pi}}\dot{n}d\left((\pi - \alpha_r)\sqrt{2RT_1} + \alpha_r\sqrt{2RT_3}\right), \quad (11)$$

where the fact that \dot{n} is constant has been used and T_1, T_3 are the temperatures on walls 1, 3.

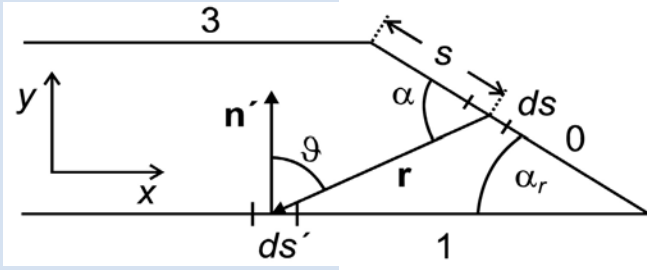


FIG. 3. Important geometric quantities for the momentum exchange between two surface segments ds and ds'

In order to compute the total force on the nanoobject, the contribution of molecules impacting on wall 2 has to be subtracted from this expression. In addition, also the recoil momenta of molecules leaving the two walls have to be taken into account. From their Maxwellian distribution together with the angular dependence of Eq. (3) it is easy to see that the recoil contributions from walls 0 and 2 to the mean force exactly cancel if the temperature in the nanoobject is only a function of y (cf. Fig. 3). This assumption should be fulfilled with good accuracy for a body between parallel plates at fixed temperature through which heat is conducted. Thus, the total force in x -direction on the nanoobject is given by

$$F_x = \frac{m}{2\sqrt{\pi}} \dot{n} d (\alpha_l - \alpha_r) (\sqrt{2RT_1} - \sqrt{2RT_3}) \quad (12)$$

The expression shows that work can only be generated between reservoirs of different temperature, in accordance with the second law of thermodynamics. In addition, the force on the nanoobject depends on its geometry through the angles α_r and α_l and vanishes if the angles are equal. We can conclude that while at vanishing Knudsen number no force is exerted, there is a considerable force in the free molecular regime that depends on the wall temperatures and on the geometry of the body. Usually, in realistic situations there will be small gaps between the walls 1 and 3 of the nanoobject and their respective counterparts, the lower and upper surface of the parallel plates. Provided that these gaps are small compared to the plate distance d , their influence on the force parallel to the plates is negligible. This is due to the facts that the wall collisions of gas molecules inside the gaps themselves do not induce a net momentum transfer in x -direction and that the angles under which the gaps appear viewed from most of the

points of the domain Ω are too small to influence the phase-space distribution of the molecules inside.

A natural scale to compare the force of Eq. (12) with is given by the force per unit length exerted on walls 1 and 3. This is simply the pressure force from the enclosed gas molecules which is easy to compute in the limit $L \rightarrow \infty$. Dividing F_x/d from Eq. (10) by this quantity yields a dimensionless pressure given by

$$P_x = \frac{\alpha_l - \alpha_r}{\pi} \frac{\sqrt{T_1} - \sqrt{T_3}}{\sqrt{T_1} + \sqrt{T_3}} \quad (13)$$

III. NUMERICAL MODEL

In order to check the analytical results and to extend the analysis to $\text{Kn} \approx 1$, a Monte-Carlo method (a variant of the DSMC method [11] developed by Babovsky, Neunzert and Struckmeier [12,13]) was applied to solve the Boltzmann equation in the computational domain depicted in Fig. 1.

The method is based on the time splitting of the Boltzmann equation. Introducing fractional steps one solves first the free transport equation (the collisionless Boltzmann equation) for one time step. During the free flow boundary and interface conditions are taken into account. In a second step (the collision step) the homogeneous Boltzmann equation without the transport term is solved. To simulate this equation by a particle method an explicit Euler step is performed. The result is then used in the next time step as the new initial condition for the free flow. To solve the homogeneous Boltzmann equation the key point is to find an efficient particle approximation of the product of distribution functions in the Boltzmann collision operator given only an approximation of the distribution function itself. To guarantee positivity of the distribution function during the collision step a restriction on the time step proportional to the mean free path is needed. That means that the method becomes exceedingly expensive for small Knudsen numbers, but is fast for the cases considered here. For more details about the solution procedure we refer to the above cited references.

In the present calculation the number

of time steps is $2 \cdot 10^6$. Sampling of the results is done over the last $8 \cdot 10^5$ time steps. The grid cells are quadratic and of size $0.1d$. In the case $\text{Kn} = \infty$ the same grid as for $\text{Kn} = 1$ is chosen. Initially the particles are generated according to the Maxwellian distribution with a temperature of 300 K and a vanishing mean velocity. For each test case between 40 and 80 particles per cell have been initialized.

It should be noted that, in contrast to the analytical approach presented above, the Monte-Carlo method is based on a 3D description. In relation to the wall reflection boundary condition of Eq. (3) this means that the angle ϑ takes the role of the azimuthal angle, while the reflected particles are equally distributed over the polar angle ϕ .

IV. RESULTS AND COMPARISON OF THE MODELS

The first set of numerical computations was performed with the DRBC, $\alpha_1 = 90^\circ$, wall temperatures $T_1 = 300$ K, $T_3 = 450$ K, a temperature profile on walls 0 and 2 linearly interpolating between the temperatures on walls 1 and 3, and a number of particles N_p of about 80,000. The angle α_1 was varied between 30° and 90° . Fig. 4 shows the negative dimensionless pressure as a function of $\Delta\alpha = \alpha_1 - \alpha_r$ for two different Knudsen numbers compared with the analytical result valid for $\text{Kn} = \infty$. The error bars were computed from an extrapolation towards $N_p = \infty$ based on three different sets of computations with particles numbers of about 40,000, 60,000 and 80,000.

The numerical data points on the left side of the figure obtained for $\text{Kn} = \infty$ show excellent agreement with the analytical results. Apparently the restriction to two spatial dimensions in the analytical model does not introduce any notable deviations from the three-dimensional case. Furthermore, the pressure on the nanoobject is somewhat reduced when a Knudsen number of 1 is considered. This is expected, since in this case only particles emitted within a distance of about d can reach the walls of the nanoobject. However, even at $\text{Kn} = 1$ the analytical result still remains a reasonable approximation to the force

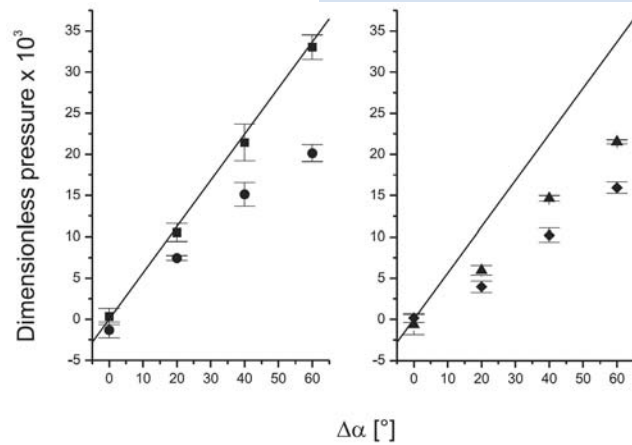


FIG. 4. Negative dimensionless pressure as a function of $\Delta\alpha = \alpha_1 - \alpha_r$. Line: analytical result (DRBC); Squares: $\text{Kn} = \infty$ (DRBC); Circles: $\text{Kn} = 1$ (DRBC); Triangles: $\text{Kn} = \infty$ (mixed BC); Diamonds: $\text{Kn} = 1$ (mixed BC). The symbols represent numerical results. For each data set the maximum values of the error bars are: $4.53 \cdot 10^{-3}$ ($\text{Kn} = \infty$, DRBC), $2.88 \cdot 10^{-3}$ ($\text{Kn} = 1$, DRBC), $2.42 \cdot 10^{-3}$ ($\text{Kn} = \infty$, mixed BC), $1.68 \cdot 10^{-3}$ ($\text{Kn} = 1$, mixed BC).

on the nanoobject. The fact that the dimensionless pressure vanishes at $\Delta\alpha = 0$ shows that the effect observed is related to breaking the reflection symmetry with respect to the x-axis.

As stated above, the DRBC can be expected to be valid approximately in a significant number of cases, but is clearly not the most general relationship of practical importance. In order to check how the wall boundary conditions influence the results, the DRBC was mixed with a specular reflection boundary condition in such a way that both types of reflections occur with an equal probability at all walls. In a specular reflection the momentum component of a particle tangential to the wall is conserved, whereas the normal component is inverted [7].

The results displayed in Fig. 4 show that the negative dimensionless pressure is significantly reduced if the mixed BC is used instead of the DRBC. About 60-70 % of the original values are reached. Naively, one would expect a pressure reduction to 50 %, since in the case of purely specular reflection at the walls and initialization of a particle ensemble with $T_{\text{ini}} = (T_1 + T_3)/2$ the Monte-Carlo simulation yields a vanishing force onto the nanoobject. However, there are subtle interaction effects between the two types of wall reflections which result in an augmentation of the exerted force. A qualitative explanation for this phenomenon can be given as follows. For the DRBC the contributions of the re-

coil momenta from particles reflected from the walls of the nanoobject (#0 and #2) exactly cancel. If, however, two subsequent wall collisions of different type come into play, this is no longer true. In this context it can either happen that a particle interacting specularly with the walls of the parallel plates is reflected diffusively from the walls of the nanoobject in the next step or vice versa. In the former case it is easy to show that the net recoil momentum onto the nanoobject exactly vanishes. In the latter case this no longer holds, as can be seen from considering a situation where all the reflections from walls 1 and 3 are diffuse, while all the reflections from walls 0 and 2 are specular. In this case the force onto the nanoobject originating from the recoil momenta can be derived in a straightforward manner as

$$F_x^{(recoil)} = \frac{m}{\sqrt{\pi}} \dot{n} d \left(\frac{\alpha_l - \alpha_r}{2} + \sin \alpha_r \cos \alpha_r - \sin \alpha_l \cos \alpha_l \right) (\sqrt{2RT_1} - \sqrt{2RT_3}) \quad (14)$$

For the geometry parameters considered here this force points into the same direction as the force of Eq. (12), thus showing that the interaction of diffuse and specular wall reflections yields an augmentation of the force obtained for the mixed BC beyond the naively expected value.

After these rather theoretical considerations it will be helpful to illuminate how the calculated effects can induce nanoscale transport phenomena significantly different from those observed on a macroscopic scale. For this purpose, consider a situation as depicted in Fig. 5. The figure shows a schematic of a rigid body with a linear extension bigger than the parallel-plate distance interacting with the gas molecules inside the gap. In 3D, such a body could be a microscopic or nanoscopic platelet, e. g. a multilayer

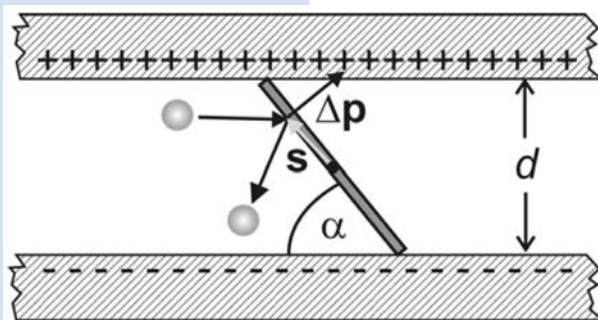


FIG. 5. Schematic of a platelet arranged with a tilted angle between two parallel plates and interacting with the gas molecules inside the gap.

graphene sheet [14]. Through forces attracting one side of the platelet to the upper, the other side to the lower surface, the platelet would arrange itself with a tilted angle inside the gap. Such a force could be of electrostatic origin if the platelet is polarizable and the upper and lower boundary carry different surface charges, as depicted in Fig. 5. In that context the question arises whether or not the collisions between the gas molecules and the platelet are such that the spatial orientation of the latter is lost or diminished. In general it is conceivable that via collisions with the gas molecules, not only a stochastic force, but also a stochastic torque is created. Each collision creates an angular momentum of $\Delta \mathbf{p} \times \mathbf{s}$ (cf. Fig 5), where \mathbf{s} is measured relative to the center of mass of the platelet. The average value of the torque is obtained by summing all angular momentum transfers and dividing by the corresponding time interval. In the limit $\text{Kn} \rightarrow 0$ it is easy to show that the time-averaged torque onto the platelet vanishes. In the limit $\text{Kn} \rightarrow \infty$ the torque can be computed based on a 2D model in a similar way as in the derivation leading to Eq. (12). For this purpose it is assumed that the in-plane extension of the platelet is much bigger than its thickness, such that the torque components originating from the segments of its boundary facing the parallel plates can be neglected. It follows that the z-component (with z being the coordinate orthogonal to x and y) of the torque on a segment ds of wall 0 (the left surface of the platelet) is given as

$$d\tau_z^{(0)} = \frac{m}{\sqrt{\pi}} \dot{n}(s) ds \left(\sqrt{2RT_3} \left(\frac{\alpha}{2} - \frac{1}{4} \sin 2\alpha \right) + \sqrt{2RT_1} \left(\frac{\pi}{2} - \frac{\alpha}{2} + \frac{1}{4} \sin 2\alpha \right) \right) \quad (15)$$

Making use of the fact that s is the coordinate relative to the center of mass of the platelet it follows by integration over s that the time-averaged torque on wall 0 vanishes. Similar arguments apply for wall 2, thus showing that the total torque on the platelet vanishes in the limit $\text{Kn} \rightarrow \infty$. This result is corroborated by Monte-Carlo simulations performed for Knudsen numbers of 0.1, 1, and 10, giving torque values compatible with zero.

We thus end up with the remarkable result that the heat transported

through a small-scale gap between two solid surfaces induces a net force on a platelet arranged with a tilted angle, whereas no net torque is produced. Translating the force into a dimensionless pressure as in Eq. (11), in the limit $\text{Kn} \rightarrow \infty$ it follows that

$$P_x = \left(1 - \frac{2\alpha}{\pi}\right) \frac{\sqrt{T_1} - \sqrt{T_3}}{\sqrt{T_1} + \sqrt{T_3}} \quad (16)$$

The absence of a torque means that on average the dynamics of the gas molecules does not interfere with external (e. g. electrostatic) forces giving the platelet a preferred orientation. However, it has to be taken into account that the force and torque values are just average values and that there are thermal fluctuations, the importance of which depend on the specific size of the system under consideration. Thermal fluctuations result in oscillations of the platelet around its equilibrium position. Specifically, this means that there are instances in which the platelet depicted in Fig. 5 loses contact with the two parallel surfaces. This observation has consequences for the motion induced by the force in x -direction. In general it is difficult to predict whether or not the force will be sufficient to induce a motion of the platelet, since this aspect is intimately related to the magnitude of the friction forces at the contact points to the parallel surfaces. With thermal fluctuations, however, for a certain fraction of time the platelet can move without wall contact. Therefore it can be predicted that a platelet of submicron scale arranged in the gas-filled gap between two parallel plates as shown in Fig. 5 will be set into motion through the heat transferred between the plates, given that there is a significant admixture of diffuse-reflection events in the wall boundary condition.

V. CONCLUSIONS

In summary, we have considered the problem of a trapezoidal body arranged between parallel plates at different temperature. From an analytical solution for the distribution of gas molecules between the plates in the limit $\text{Kn} = \infty$ an expression for the force onto the body depending on the wall temperatures and the geometry was derived. Re-expressing the result as a dimensionless pressure shows that heat transfer between the plates

results in a significant momentum transfer onto the nanoobject. A momentum transfer only occurs if the reflection symmetry with respect to the x -coordinate is broken, as becomes apparent from the angle dependence in Eq. (12). The analytical curve was corroborated by Monte-Carlo simulations, yielding excellent agreement. The numerical data show that the analytical result already provides a reasonable zeroth-order approximation to the force on the nanoobject for $\text{Kn} = 1$. Furthermore, if the wall boundary condition is modified and an equal probability of diffuse and specular reflection events is considered, the force is slightly reduced, but still significant. As a specific realization of practical importance, a small-scale platelet arranged with a tilted angle between two surfaces was considered. It was shown that the torque onto such a rigid body vanishes, whereas a force in the direction parallel to the plates is exerted. When including thermal fluctuations this leads to the conclusion that it should be possible to set the object into motion, thus suggesting a novel, thermally-induced transport process on the nanoscale.

Referenzen

- [1] C. Cercignani, *Rarified Gas Dynamics: From Basic Concepts to Actual Calculations* (Cambridge University Press, Cambridge, England, 2000).
- [2] F. Sharipov, "Onsager-Casimir reciprocity relations for open gaseous systems at arbitrary rarefaction: I. General theory for single gas" *Physica A* **203**, 437 (1994).
- [3] F. Sharipov, "Onsager-Casimir reciprocity relations for open gaseous systems at arbitrary rarefaction: II. Application of the theory for single gas" *Physica A* **203**, 457 (1994).
- [4] O. Reynolds, "On certain dimensional properties of matter in the gaseous state", *Phil. Trans. R. Soc. Lond.* **170**, 727 (1879).
- [5] L. Waldmann, "Über die Kraft eines inhomogenen Gases auf kleine suspendierte Kugeln" *Z. Naturforsch.* **A 14a**, 589 (1959)
- [6] J.A. Barker and D.J. Auerbach, "Gas-surface interactions and dynamics; Thermal energy atomic and molecular beam studies" *Surf. Sci. Rep.* **4**, 1 (1985).

- [7] G. Karniadakis, A. Beskok, and N. Aluru, *Microflows and Nanoflows*, Section 2.2.2 (Springer, New York, USA, 2005).
- [8] C. Cercignani and M. Lampis, "Kinetic models for gas-surface interactions", *Transp. Theory Stat. Phys.* **1**, 101 (1971).
- [9] R. G. Lord, "Some extensions to the Cercignani–Lampis gas–surface scattering kernel", *Phys. Fluids A* **3**, 706 (1991).
- [10] M. F. Modest, *Radiative Heat Transfer*, Chapter 4 (Academic Press, San Diego, USA, 2003).
- [11] G.A. Bird, *Molecular gas dynamics*, (Clarendon Press, Oxford, U.K., 1976).
- [12] H. Babovsky, "A convergence proof for Nanbu's Boltzmann simulation scheme", *Eur. J. Mech. B* **8**, 41 (1989).
- [13] H. Neunzert and J. Struckmeier in: *Acta Numerica 1995*, (Cambridge University Press, U.K., 1995).
- [14] A.K. Geim and K.S. Novoselov, "The rise of graphene", *Nature Materials* **6**, 183 (2007)

In Situ Study of the Reaction Sequence in the Sol–Gel Synthesis of a $(\text{Ba}_{0.5}\text{Sr}_{0.5})(\text{Co}_{0.8}\text{Fe}_{0.2})\text{O}_{3-\delta}$ Perovskite by X-Ray Diffraction and Transmission Electron Microscopy

Mirko Arnold¹, Haihui Wang^{1,2}, Julia Martynczuk¹, and Armin Feldhoff¹

¹Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry, Leibniz Universität Hannover, D-30167 Hannover, Germany

²College of Chemical and Energy Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China

Abstract

Examination of the complexing citric acid/EDTA synthesis of $(\text{Ba}_{0.5}\text{Sr}_{0.5})(\text{Co}_{0.8}\text{Fe}_{0.2})\text{O}_{3-\delta}$ is presented by in situ X-ray diffraction and transmission electron microscopy, which elucidate all intermediate phases and the formation of the perovskite structure for the first time.

I. Introduction

MIXED ionic-electronic conductors (MIECs) with a perovskite structure are of considerable interest for many industrial processes because they allow the supply or removal of oxygen to or from reaction mixtures with infinite selectivity and high oxygen fluxes. Thus, many applications of MIECs have already been reported, e.g. as cathode material in solid-oxide fuel cells as well as in the production of oxygen-enriched air and in the conversion of hydrocarbons to synthesis gas [1–3].

Particularly, membranes of the $(\text{Ba}_{0.5}\text{Sr}_{0.5})(\text{Co}_{0.8}\text{Fe}_{0.2})\text{O}_{3-\delta}$ (BSCF) type are regarded as state-of-the-art materials in view of their high oxygen permeation performance. Although many reports on this material are already available, a fundamental understanding of the synthesis process and thus the perovskite formation is still lacking. Additionally, investigation of this process is also believed to provide a clarification of the decomposition reaction that takes place in long-term oxygen permeation experiments in membranes of the BSCF material. Already in the year 2000, the decomposition of BSCF into BaCoO_2 and $\text{Sr}(\text{Co}_{0.6}\text{Fe}_{0.4})\text{O}_{3-\delta}$ was postulated but only due to X-ray diffraction (XRD) measurements of permeated membranes [4]. The appearance of similar additional reflections was described in 2005 in a temperature-programmed

XRD pattern of BSCF particularly when the temperature was set below 700°C for 12 h. But no phase attribution was given there [5].

Because a real understanding of the BSCF formation and decomposition does not exist, we present a detailed study of the synthesis process of BSCF by *in situ* XRD as well as by transmission electron microscopy (TEM) experiments.

II. Experimental Procedures

The synthesis of BSCF was conducted via a sol–gel route as reported by Shao *et al.* [4]. An aqueous solution containing stoichiometric amounts of the metal nitrates, citric acid, EDTA, and ammonia was stirred at 150°C until a purple-colored gel was obtained. The gel was precalcined at 600°C for 1 h in order to obtain the first crystalline products. XRD measurements were taken with steps of 20 and 25 K, respectively, in order to achieve a high resolution within the temperature dependence. Before each data acquisition, an equilibrium time of 1 h was set. Synthetic air was used as the atmosphere within the chamber. Moreover, an *ex situ* XRD study has been conducted in order to confirm *in situ* XRD measurements, to exclude changes in the unit cell dimensions simply due to heating, and as a reference to calculate unit cell parameters. TEM experiments were performed with a powder sample, which was preliminarily heated to 700°C for 1 h, quenched to room temperature, and then glued between silicon single crystals, polished, and finally Ar^+ sputtered to electron transparency.

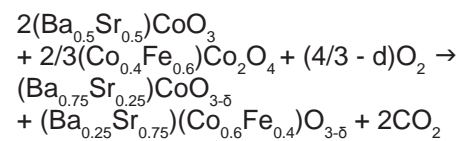
III. Results and Discussion

Figure 1 shows the temperature-dependent XRD pattern of the reaction mixture between 400 ° and 950°C. Up

to 600°C, the reaction mixture consists only of aragonite-type $(\text{Ba}_{0.5}\text{Sr}_{0.5})\text{CO}_3$ as well as $(\text{Co}_{0.4}\text{Fe}_{0.6})\text{Co}_2\text{O}_4$ with spinel modification [6,7]. At 600°C, two other phases start to form because additional reflections at 26.5°, 32.3°, and 42.5° emerge in the XRD pattern. These reflections are related to a cubic phase with a perovskite structure (perovskite I) and an additional second phase, which is attributed to $(\text{Ba}_{0.75}\text{Sr}_{0.25})\text{CoO}_{3-\delta}$ (hexagonal). In 1977, Taguchi *et al.* reported on a structure of BaCoO_3 that showed almost the same diffraction pattern as the hexagonal phase found here [8]. Therefore, the formation of a similar phase during the process reported here can be assumed. A detailed calculation of the cell dimensions shows a cell parameter for the initially formed

cubic perovskite phase (perovskite I) that is smaller than that expected for BSCF [9]. Therefore, we postulate a strontium-enriched perovskite phase, namely $(\text{Ba}_{0.25}\text{Sr}_{0.75})(\text{Co}_{0.6}\text{Fe}_{0.4})\text{O}_{3-\delta}$. Further proof for this supposition lies in the systematic shift of the reflections that are related to the hexagonal phase (hexagonal) toward greater angles, indicating a smaller unit cell based on $(\text{Ba}_{0.75}\text{Sr}_{0.25})\text{CoO}_{3-\delta}$. This has been proved by the synthesis of several compositions within the system $(\text{Ba}_{1-x}\text{Sr}_x)\text{CoO}_{3-\delta}$.

Thus, the reaction of the first crystalline phases can be described as follows:



On increasing the temperature, one observes a continuous increase of the cell parameter of the perovskite structure (perovskite I) until it reaches the maximum shift at 950°C. This can be concluded as the reflection related to the (110) plane that shifts toward lower angles (see Fig. 1). While the unit cell of the perovskite structure increases, a systematic change in the hexagonal structure occurs. From the XRD pattern, it can be seen that the reflection related to the (101) plane of the hexagonal phase shifts toward higher angles. A detailed examination of *ex situ* XRD measurements further indicates that this shift is not simply due to a further increase of the hexagonal unit cell as reflections related to planes (110) and (201) are shifted differently, which indicates the formation of a different structure. We believe that the change in the hexagonal phase (hexagonal) is due to the intake of strontium and iron ions caused by a gradient in the chemical potentials. This seems to be a logical step due to the incorporation of barium ions into the cubic phase and the cobalt-enriched hexagonal phase. *Ex situ* XRD patterns indicate a phase transformation toward a tetragonal unit cell (tetragonal), with cell parameters $a = 5.63 \text{ \AA}$ and $c = 4.01 \text{ \AA}$, which is in good agreement with the findings of Yoshiya *et al.* in 2004 [9]. They applied the first principles method to calculate the free energies within the system $\text{Ba}(\text{Co}_{1-y}\text{Fe}_y)\text{O}_{3-\delta}$. It

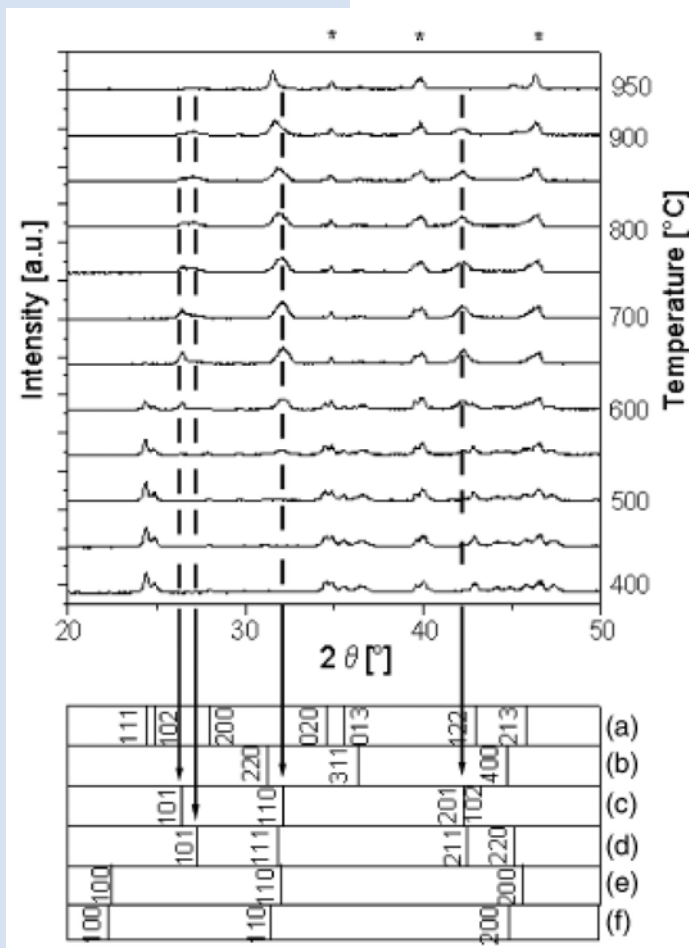


Fig. 1. *In situ* powder X-ray diffraction pattern at different temperatures of the synthesis process of $(\text{Ba}_{0.5}\text{Sr}_{0.5})(\text{Co}_{0.8}\text{Fe}_{0.2})\text{O}_{3.5}$. Reflections marked with an asterisk are related to the sample holder (Pt–Rh alloy).

- (a) $(\text{Ba}_{0.5}\text{Sr}_{0.5})\text{CO}_3$ (aragonite structure)
 (b) $(\text{Fe}_{0.6}\text{Co}_{0.4})\text{Co}_2\text{O}_4$ (spinel structure)
 (c) $(\text{Ba}_{0.75}\text{Sr}_{0.25})\text{CoO}_{3-\delta}$ (hexagonal) (h)
 (d) $(\text{Ba}_{0.6}\text{Sr}_{0.4})(\text{Co}_{0.8}\text{Fe}_{0.2})\text{O}_{3.5}$ (tetragonal) (t)
 (e) $(\text{Ba}_{0.25}\text{Sr}_{0.75})(\text{Co}_{0.6}\text{Fe}_{0.4})\text{O}_{3.5}$ (perovskite I) (c)
 (f) $(\text{Ba}_{0.5}\text{Sr}_{0.5})(\text{Co}_{0.8}\text{Fe}_{0.2})\text{O}_{3.5}$ (perovskite II) (c).

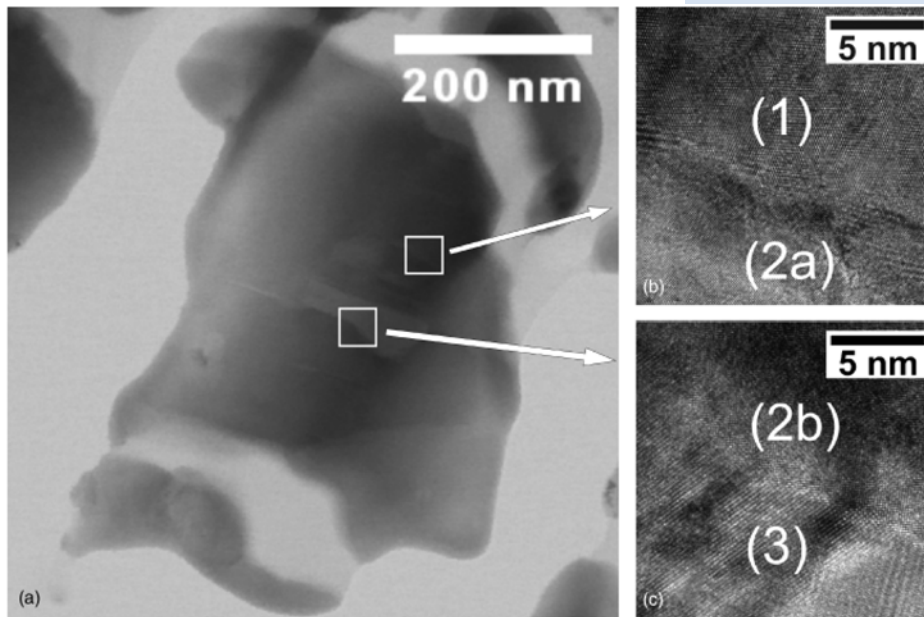


Fig. 2. STEM bright-field micrograph showing a particle containing the intermediate phases during the synthesis process (a). HRTEM micrograph of grain contact between hexagonal (1) and perovskite phases (2a) (b). HRTEM micrograph of grain contact between perovskite (2b) and tetragonal phase (3). The sample was heated for 1 h at 700°C, followed by quenching to room temperature.

has emerged that increasing the iron content lowers the transition temperature from the hexagonal to the above-mentioned tetragonal phase. This tetragonal phase can be regarded as a distorted cubic perovskite structure. The unit cell contains two formula units and reflects a nonideal arrangement of the BO_6 octahedra resulting in a tetragonal structure.

In order to support the XRD findings, TEM experiments were conducted to analyze the microstructural arrangement during the synthesis. Figure 2 shows an STEM bright-field micrograph and corresponding HRTEM micrographs of two grain contacts (Figs. 2(b) and (c)). Quantitative ener-

gy-dispersive X-ray analysis (EDXS) of the elemental distribution shows that the selected grain contacts are located between the cubic $(\text{Ba}_{0.25}\text{Sr}_{0.75})(\text{Co}_{0.6}\text{Fe}_{0.4})\text{O}_3$ and the hexagonal $(\text{Ba}_{0.75}\text{Sr}_{0.25})\text{CoO}_3$. The elemental distributions by EDXS of the cations are displayed in Fig. 3. Figures 4 and 5 present the grain contacts as in Figs. 2(b) and (c) but at higher magnifications. The related diffraction information was created via fast Fourier transformation of the HRTEM micrographs. The first grain contact (Fig. 4) is identified to be between a grain with a perovskite structure (perovskite I) and a grain with a hexagonal structure (hexagonal).

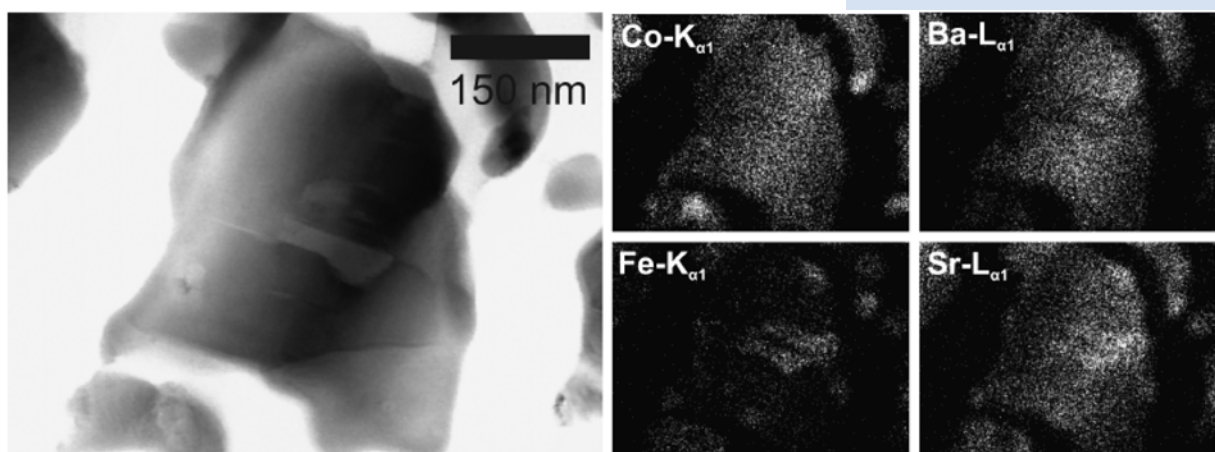


Fig. 3. STEM bright-field micrograph and elemental distributions by energy-dispersive X-ray analysis of the particle in Fig 2. The white contrast in the maps corresponds to high elemental concentrations. The sample was heated for 1 h at 700°C, followed by quenching to room temperature.

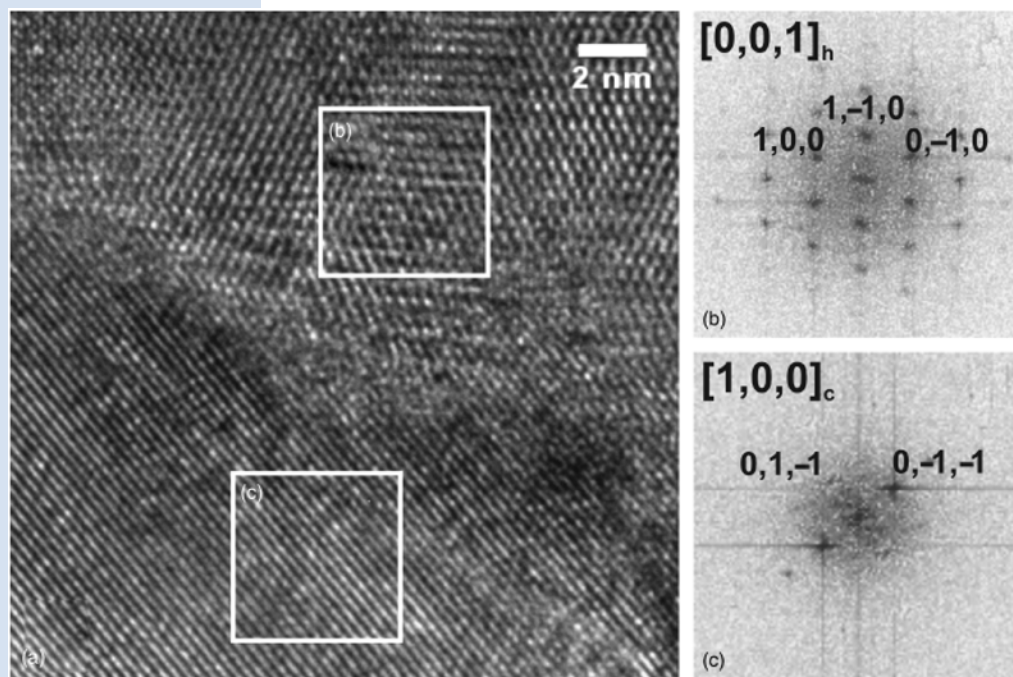


Fig. 4. HRTEM micrograph of the grain contact shown in Fig. 2(b) (a). Diffraction data via fast Fourier-transformation from selected areas (b, c).

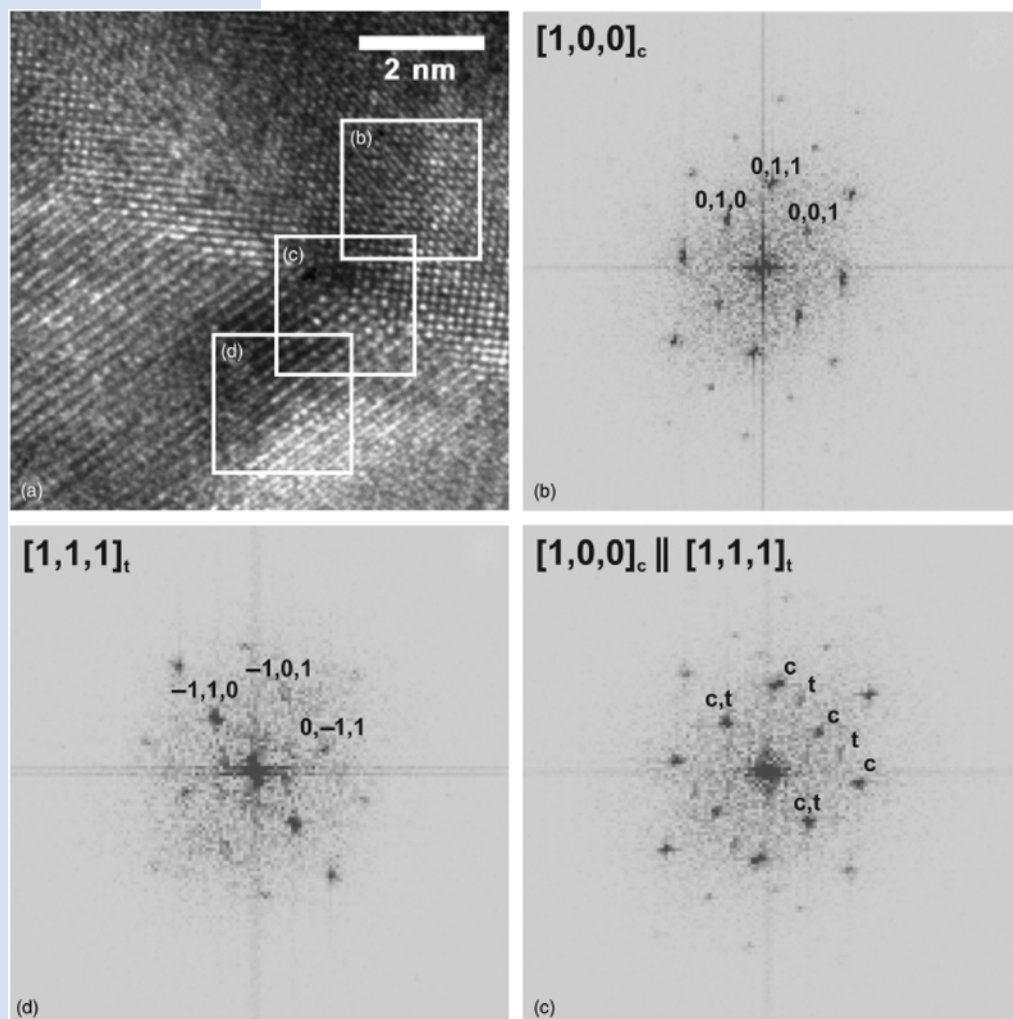


Fig. 5. HRTEM micrograph of grain contact shown in Fig. 2(c). Diffraction data taken via fast Fourier-transformation from selected areas (b–d).

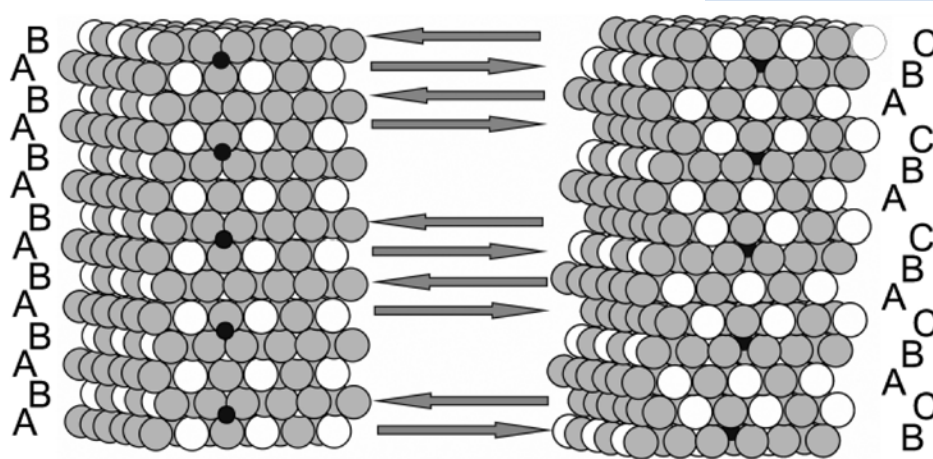
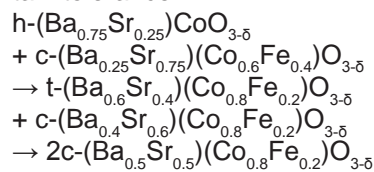


Fig. 6. Scheme of the relationship between hexagonal and cubic perovskite structures visualized by the stacking sequence of the hexagonal layers of barium and oxygen ions (gray ball, oxygen; white, barium; black, cobalt).

The combination of the diffraction information given by the HRTEM with the elemental distribution of these two grains underlines the XRD findings that indicated the coexistence of a perovskite phase with a comparable high strontium amount and a hexagonal structure with a high barium amount. The second contact (Fig. 5) even exhibits the contact zone between two grains with the above-mentioned stoichiometries. Contrary to the above-described contact between the perovskite and hexagonal phases, the contact in Fig. 5 is identified to separate a grain with tetragonal modification and a second grain with perovskite. As mentioned above, a phase transition of the hexagonal to a tetragonal modification is observed. Thus, this particular grain contact exhibits a contact zone between a former hexagonal phase in which the postulated phase transition to the tetragonal modification has taken place. A closer look at the diffraction data shows that these grains are not randomly oriented but have parallel zone axes as $[1,0,0]_c \parallel [1,1,1]_t$ and parallel planes as $(-1,1,0)_c \parallel (0,1,0)_t$. This finding gives rise to the assumption that a reaction has occurred between these two grains and is underlining the fact that during uptake of strontium and iron ions into the hexagonal structure, a phase transition to a tetragonal structure occurs.

When the temperature was increased further, reflections for perovskite I shifted to lower angles (larger unit cell), which is due to the further uptake of barium ions. Additionally, the reflection for plane (101) of the tetragonal

phase diminished, which was clearly due to an increase of symmetry, and ended up in a cubic perovskite structure. Thus, the first reaction is followed by transformation of the hexagonal into the tetragonal phase and the final formation of the perovskite; while the reaction process is a dynamic rather than a static process, the stoichiometry of the reactants vary within a certain tolerance.



It has to be emphasized that the formation of the final cubic BSCF perovskite (perovskite II) takes place in both the tetragonal (former hexagonal) lattice and the cubic perovskite system (perovskite I) with a smaller unit cell. If the BSCF structure would only grow at the expense of the cubic phase by incorporation of barium ions, one would expect a simple diminution of the hexagonal barium-rich phase. As shown, in fact, a phase transition of the hexagonal to a tetragonal structure occurs. The oxide with a hexagonal structure is strongly related to the cubic perovskite structure. Both the cubic perovskite as well as the hexagonal oxide can be understood as close-packed hexagonal layers of barium (strontium) and oxide ions that are stacked in the hexagonal close packing in the first and in the cubic close packing in the second. While the CoO_6 octahedra share faces in the first place, only corner-sharing $(\text{Co,Fe})\text{O}_6$ octahedra are eminent in the second place. Thus, it seems like-

ly that the final perovskite is formed in both the hexagonal—via the formation of the tetragonal unit cell—and in the cubic system by a simple substitution of strontium by barium in the lattice, leading to a larger unit cell.

Figure 6 schematically displays the relation between the hexagonal and the cubic perovskite structure. The stacking sequence in the hexagonal cell is **ABABABAB**—containing just face-sharing octahedra—while the stacking sequence in the perovskite structure is **ABCABCAB**—containing just corner-sharing octahedra. The existence of fairly distorted close-packed layers in the hexagonal structure is the reason for the occurrence of an intermediate tetragonal phase, which can be understood simply as a distorted perovskite structure explained above.

Obviously, the last reaction of the above-presented reaction sequence is a reversible process that becomes more favorable at temperatures significantly higher than 800°C. This explains the fast decomposition of BSCF below 800°C.

IV. Summary

The synthesis process of BSCF via the commonly applied sol–gel method has been studied in considerable detail. First crystalline intermediates have been identified as a mixed carbonate and a mixed spinel. Second, two mixed oxides are formed: one with a hexagonal structure and one with a cubic structure. Both structures are related to the structure of the cubic BSCF and it was shown that the cubic perovskite structure is finally formed at the expense of both the hexagonal phase—via a tetragonal phase—and the cubic structure.

References

- [1] Z. Shao and S. Haile, “A High Performance Cathode for the Next Generation Solid-Oxide Fuel Cells,” *Nature*, **431**, 170–3 (2004).
- [2] H. Wang, S. Werth, T. Schiestel, and J. Caro, “Perovskite Hollow-Fiber Membranes for the Production of Oxygen-Enriched Air,” *Angew. Chem. Int. Ed.*, **44**, 6906–8 (2005).
- [3] C. S. Chen, S. J. Feng, S. Ran, D. C. Zhu, W. Liu, and H. J. M. Bouwmeester, “Conversion of Methane to Syngas by a Membrane-Based Oxidation-Reforming Process,” *Angew. Chem. Int. Ed.*, **115**, 5196–8 (2003).
- [4] Z. Shao, W. Yang, Y. Cong, H. Dong, J. Tong, and G. Xiong, “Investigation of the Permeation Behavior and Stability of a $\text{Ba}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{Co}_{0.8}\text{Fe}_{0.2}\text{O}_{3-\delta}$ Oxygen Membrane,” *J. Membr. Sci.*, **172**, 177–88 (2000).
- [5] M. Rebeilleau-Dassonneville, S. Rosini, A. C. van Veen, D. Farrusseng, and C. Mirodatos, “Oxidative Activation of Ethane on Catalytic Modified Dense Ionic Oxygen Conducting Membranes,” *Catal. Today*, **104**, 131–7 (2005).
- [6] A. Feldhoff, J. Martynczuk, and H. Wang, “Advanced $\text{Ba}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{Zn}_{0.2}\text{Fe}_{0.8}\text{O}_{3-\delta}$ Perovskite-Type Ceramics as Oxygen Selective Membranes: Evaluation of the Synthesis Process,” *Prog. Solid St. Chem.*, **35**, 339 (2007).
- [7] J. Martynczuk, M. Arnold, H. Wang, J. Caro, and A. Feldhoff, “How $(\text{Ba}_{0.5}\text{Sr}_{0.5})(\text{Fe}_{0.8}\text{Zn}_{0.2})\text{O}_{3-\delta}$ and $(\text{Ba}_{0.5}\text{Sr}_{0.5})(\text{Co}_{0.8}\text{Fe}_{0.2})\text{O}_{3-\delta}$ Perovskites form via an EDTA/citric acid complexing method,” *Adv. Mater.*, *in press*, doi: 10.1002/adma.200700322.
- [8] H. Taguchi, Y. Takeda, F. Kanamura, M. Shimada, and M. Koizumi, “Barium Cobalt Trioxide,” *Acta Cryst.*, **B33**, 1299–301 (1977).
- [9] M. Yoshiya, C. A. J. Fisher, Y. Iwamoto, M. Asanuma, J. Ishii, and K. Yabuta, “Phase Stability of $\text{Ba}(\text{Co}_{1-y}\text{Fe}_y)\text{O}_{3-\delta}$ by First Principles Calculations,” *Solid State Ionics*, **172**, 159–63 (2004).

Design and Control of a Micro Linear Motor with Integrated Magnetic Guidance

S. Demmig, R. Gehring, K. Wiedmann, A. Mertens, and B. Ponick
Institute for Drive Systems and Power Electronics, Leibniz Universität Hannover, Welfengarten 1, 30167 Hannover, Germany, Mail: Demmig@ial.uni-hannover.de

Abstract

This paper reports on a micro linear stepping motor with an integrated magnetic guidance which is built up using micro fabrication techniques like sputtering, UV depth lithography and electroplating. The results of FEM simulations in order to design the motor and the necessary changes in the layout for the purpose of levitating the traveller without additional components are presented. Using the same windings for the thrust and the levitation force a special control strategy is described.

Keywords - Micromotors; Microactuators; Linear motors; Variable structure systems; Magnetic levitation

I. INTRODUCTION

Linear stepping motors that are fabricated using micro fabrication techniques like for example sputtering and galvanics offer the possibility to realise step sizes in the range of a few micrometres [1, 2, 3]. In order to improve the dynamic behaviour of such a motor and to make it more robust, a magnetic guidance has been implemented [4]. The guidance does not need additional parts, only the design of the active part and the control strategy have to be changed. The motor and a new control strategy are described within the following paper.

II. THE HORIZONTAL MOTOR

The micro linear motor that has been designed and built (fig 1) is a reluctance stepping motor. It is named 'horizontal motor', because the path of the main magnetic flux is parallel to the wafer [2]. The advantage of this type of motor is the compensation of the Maxwell normal forces between stator and traveller, which are common to any electromagnetic linear motor concept. The compensation of these forces is possible, because the flux crosses two air gaps before it

closes. This results in very low friction forces, which allow to integrate a tribological or a magnetic guidance. Based on this motor, a new design has been developed, which has six stator systems located in parallel, each shifted by 1/6 tooth pitch. The tooth pitch is 100 μm . Consequently the step size of the 6-phase motor is 16.7 μm in full step mode. Each system is composed of two rows of toothed poles with a novel double-layer three-dimensional meander winding wound around the poles. The two correlated pole rows are arranged symmetrically to the longitudinal axis in driving direction in order to eliminate a torque that could seize the traveller.

Altogether, the stator has 12 pole rows. Each pole row has 15 poles and each pole has 4 teeth. The traveller consists of soft magnetic flux guides with teeth having the same tooth pitch as the stator. The flux guides are placed between the stator pole rows. The overlap of the stator and the traveller is 10 poles per row. Figure 1 shows the fabricated and mounted horizontal motor.

III. SIMULATION ENVIRONMENT

In order to calculate the magnetic field in the active parts of the hori-

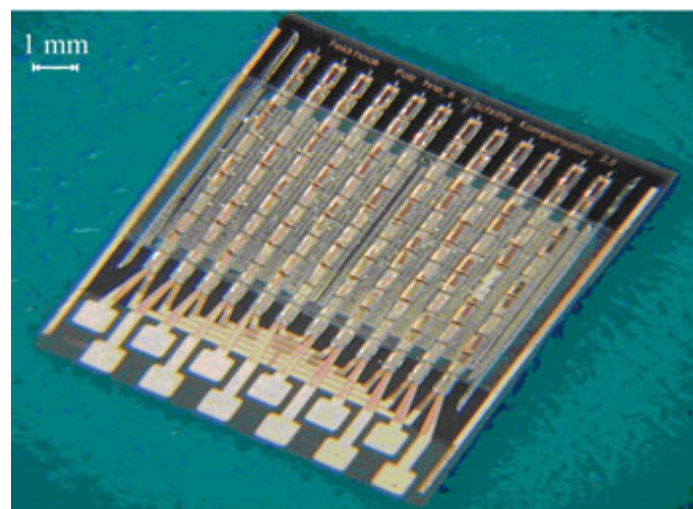


Figure 1: The fabricated horizontal motor.

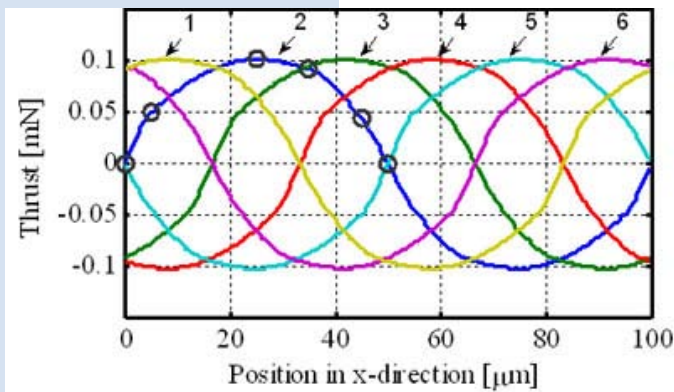


Figure 2: Simulated thrust over the position for each phase excited with 2 A.

zontal motor and for the analysis and processing of the results, a simulation environment was developed [5], which allows to perform automatic parameter studies.

In order to simulate a displacement of the centres of mass of stator and traveller, a three-dimensional FE model in ANSYS© was required to calculate the magnetic field.

Determining the magnetic flux density and the magnetic field strength in the air gap by FEM simulations allows to calculate the generated forces. In order to calculate the force-position characteristic for one phase, the traveller is shifted about half a tooth pitch in discrete steps (circles in fig. 2). The complete force-position characteristic over one tooth pitch for all phases (fig. 2) is generated by taking advantage of symmetrical properties using a developed MATLAB® tool. Furthermore,

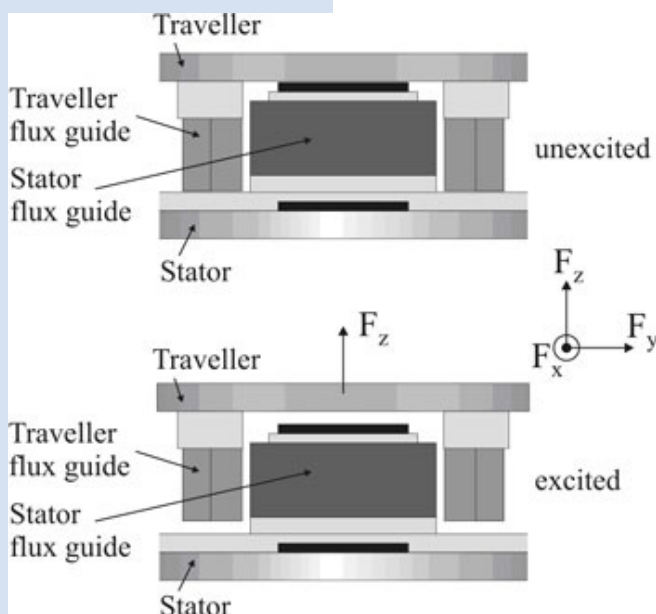


Figure 3: The principle of the integrated magnetic guidance.

re, the discrete calculation points are converted to polynomials, which are used to simulate the dynamic behaviour of the drive.

IV. INTEGRATED MAGNETIC GUIDANCE

Investigations show that the force due to gravity of the traveller can be compensated by shifting the traveller in z-direction. Therefore, the traveller will be placed in such a way that in unexcited condition the soft magnetic flux guides of traveller and stator are not overlapping completely, e.g. the flux guides of the traveller being a little deeper than those of the stator (fig. 3). Exciting the stator winding, the vertical displacement of the traveller causes vertical forces due to Maxwell forces which are acting in the opposite direction of the force of gravity of the traveller. These vertical forces can be used to levitate the traveller. In this way, an integrated magnetic guidance can be implemented without the need of additional components. Fig. 4 shows the levitation force and the thrust related to the forces with a displacement of 20 μm .

The resulting displacement depends on the weight and load of the traveller that has to be compensated and on the number of phases that are used. It has to be taken into account that the levitation force also depends on the x-position of the traveller (fig. 5).

V. CONTROL STRATEGY

The goal of the control strategy is to keep the traveller at a constant z-position, while the x-position can be controlled time optimised. Challenge of the control is that the present system is non linear and multi-variable. For this reason classical solutions of interacting control would fail. This is obvious when looking at fig. 5. It shows that every phase only can add a force in one direction. In order to keep the drive as simple as possible, only a position feedback in x-direction is used. A constant displacement in z-direction is very important because the z-position influences the thrust of the motor. If the traveller oscillates uncontrolled in vertical direction, the whole system can become instable.

Fig. 2 shows the characteristics of the thrust with a displacement of $20\ \mu\text{m}$ in z-direction and maximum excitation. These functions have to be multiplied with the adequate value of the function shown in fig. 4 in order to get the thrust against the displacement. The thrust for maximum excitation can be calculated for any displacement in z-direction between 0 and $20\ \mu\text{m}$. Independent from displacement and excitation, the shape of the different graphs shown in fig. 2 and 5 does not change.

The main idea of the control strategy is to use two phases shifted by half a tooth pitch with thrust nearly compensating each other in order to levitate the traveller. Looking at fig. 6 the sum of the thrust of these 'opposed phases' shifted by half a tooth pitch can be seen as a function of the position. The thrusts of the two phases do not compensate totally because of the difference of tooth-tooth position and tooth-slot position, but it is at least one order of magnitude smaller than the thrust of the other phases. The need of phases with thrust nearly compensating each other has to be taken into account designing the active part. Furthermore, the resulting levitation force being the sum of the levitation force of two phases shifted half a tooth pitch (fig. 7) is nearly constant. To generate the thrust, maximally two phases are excited. The remaining 'opposed phases' are used to guarantee the levitation. This results in a quasi non-interacting control system.

In order to get maximum thrust, only the phases with the biggest contribution to the thrust are used for the position control in x-direction. It depends on the necessary force, whether one or two phases are used in order to move the traveller. The mentioned 'opposed phases' which do not include the phases that are needed for the generation of the thrust are used to generate an additional levitation force. If only one phase applies the thrust, four 'opposed phases' instead of two are used. This reduces the current in each phase, reducing temperature rise due to copper loss.

For the proposed control strategy, it is important that the presented simulation results for the thrust and the levitation

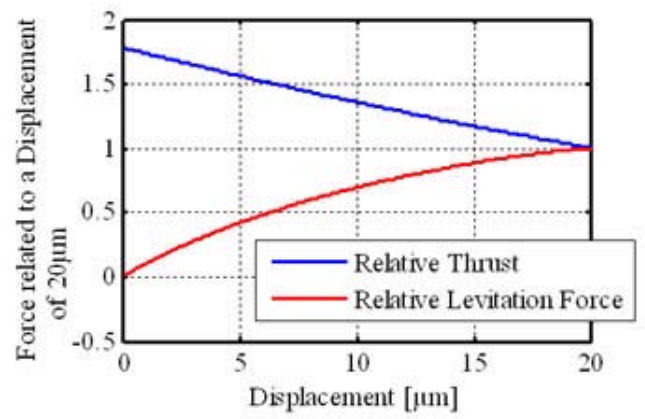


Figure 4.: Simulated thrust and simulated levitation force each related to the associated force having a displacement of $20\ \mu\text{m}$ over the displacement .

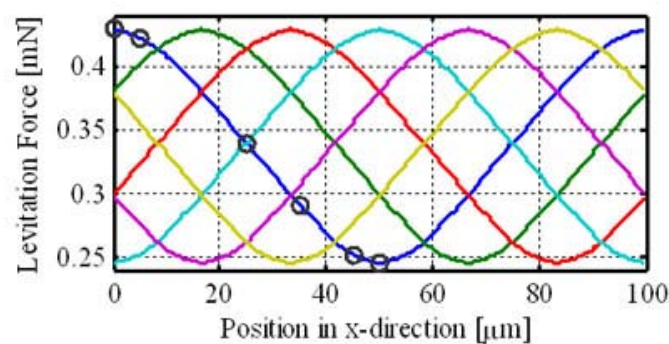


Figure 5: Simulated levitation force over the position for each phase excited with 2 A.

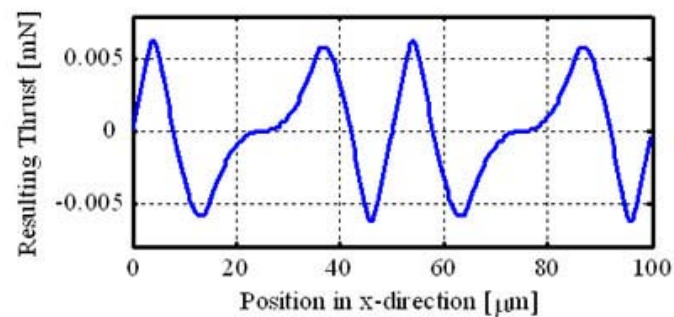


Figure 6: Difference of the thrust over the position, exciting two phases shifted half a tooth pitch.

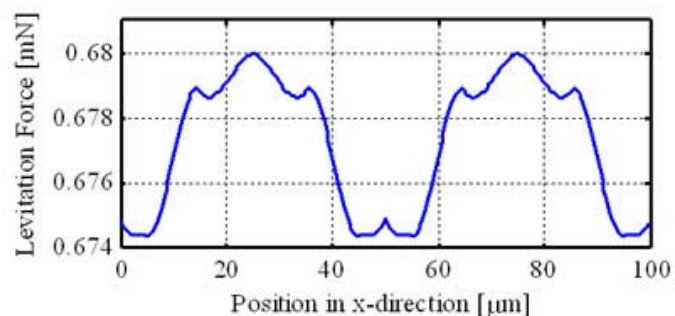


Figure 7: Difference of the levitation force over the position, exciting two phases shifted half a tooth pitch.

tation forces are as good as possible. Otherwise a nearly constant displacement of the traveller in z-direction cannot be guaranteed. In the worst case, this can cause the instability of the system, because no feedback of the z-position of the traveller is given.

VI. CONCLUSIONS

Micro linear motors with an integrated magnetic guidance that are built using micro fabrication techniques have been designed. In order to predict the forces in x- and z-direction a parameterised FEM model was developed. For this new type of motor, a control algorithm is presented that allows a separate control of the thrust and the levitation force.

ACKNOWLEDGEMENTS

This work was sponsored by the German Research Foundation (DFG) as part of their support for the collaborative research centre „Design and Manufacturing of Active Microsystems“.

REFERENCES

- [1] Gatzert, H.H; Stölting, H.-D.; Ponick, B.: „Alternatives for Micro-Machined Linear Actuators“, Proc. Actuator 2004, Bremen, pp. 317-320, 2004
- [2] Seidemann, V.; Edler, J.; Büttgenbach, S.; Stölting, H.-D.: „Linear Variable Reluctance (VR) Micro Motor with Horizontal Flux Guidance: Concept, Simulation, Fabrication and Test.“, Proc., Transducers '03, Boston, USA, 2003
- [3] Feldmann, M.; Seidemann, S.; Büttgenbach, S.: „Novel Variable Reluctance Micro Motors with Integrated High Aspect Ratio Micro Coils“, Proc. Actuator 2006, Bremen
- [4] Gehrking, R.; Demmig, S.; Feldmann, M.; Büttgenbach, S.; Ponick, B.: „A Micro Linear Motor with Integrated Passive Magnetic Guidance“, Proc., 32nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON 2006), Paris, France, 2006
- [5] Demmig, S.; Gehrking, R.; Mertens, A.; Ponick, B.: „Simulation of the magnetic and dynamical characteristics of micro linear motors.“, 11th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE 2005), Dresden, 11.-

Nanomaterialien: Laser erzeugt hochreine Partikel

Stephan Barcikowski und Niko Bärsch

Laser Zentrum Hannover e. V., Nanotechnology Department, Nanomaterials Group, Hannover

Kontakt: S.Barcikowski@lzh.de, N.Baersch@lzh.de

Nanococktails aus der Laser-Bar

Quelle: *GIT Labor-Fachzeitschrift* 11/2007

Basierend auf der Anzahl der Patente in Europa gilt die Nanotechnologie als Zukunftsmotor für die Energie-, Umwelt-, Informations- und Medizintechnik. Die Eigenschaften von Strukturen im Nanometerbereich unterscheiden sich von denen der „Großen“ und bieten so neue Potentiale in verschiedensten Anwendungsgebieten. Beispielsweise sorgen schon jetzt Keramiknanopartikel unsichtbar für kratzfeste Autolacke, Partikel aus Silber schützen vor Biofilmbildung und Infektionen. Gold-Nanopartikel und magnetische Nanopartikel werden bereits in der medizinischen Diagnose und Therapie vom Schwangerschaftstest bis hin zur Krebsbekämpfung eingesetzt. Laut einer Studie der DG-Bank im Auftrag der BASF betrug 2001 der Weltmarkt für Nanopartikel und Nanomaterialien, welche $\frac{1}{4}$ des Nanotechnologiemarktes darstellen, bereits 15.000.000.000 €.

Es gibt viele Möglichkeiten, Nanopartikel entstehen zu lassen. Eine übliche Methode ist es Nanopartikel auf chemischem Weg in der Gasphase oder Flüssigkeit herzustellen, was aber zu Verklumpungen (Agglomeraten) oder Verunreinigungen durch Hilfsstoffe (Precursor und Additive) führen kann. Gerade für anspruchsvolle Anwendungen in der Kunststoff- und Medizintechnik werden jedoch hochreine und stabile Partikel benötigt. Darüber hinaus verlangen die Anwender oftmals nach dem Design von Nanopartikeln aus neuen Materialien, Legierungen oder auch nach Mischungen aus Nanopartikeln für den Einbau und die Kombination von Nanoeffekten in ihren Produkten. Aber wie stellt man solche Nanomaterialien schnell und hochrein her?

Am Laser Zentrum Hannover e. V. (LZH) wird das gepulste Laser-

strahlabtragen in Flüssigkeit eingesetzt, um Nanopartikel zu generieren. Hierbei wird ein Verfahren verwendet, das mittels ultrakurzer Laserpulse die Nanopartikel direkt aus einer Substratoberfläche „sprengt“. Dieses Substrat befindet sich in einer geeigneten Flüssigkeit wie Wasser, Lösungsmittel oder einem Monomer, die das wertvolle und empfindliche Nanomaterial zugleich stabilisiert. Eine Erwärmung des Ausgangsmaterials durch den Laserabtragsprozess wird durch den Einsatz dieser ultrakurzen Pulse vermieden. Somit bleibt die Qualität der Nanopartikel erhalten. Das Besondere an diesem Verfahren ist, dass nahezu jegliche Feststoffe auf diese Weise „zerkleinert“ werden können und somit jede denkbare „Mixtur“ für die Kombination von Eigenschaften hergestellt werden kann. Anders ausgedrückt, kann man mit diesem Verfahren nach Rezept beliebige „Nanococktails“ mixen. Das ist besonders wichtig für die Umsetzung von Nano-Multifunktionen (z. B. verschleißfest und antibakteriell). In weiteren Verfahrensschritten können diese Nanococktails verarbeitet oder in Kunststoffe eingebettet werden. Dadurch dass die Nanopartikel schon bei ihrer Entstehung in



der Flüssigkeit stabil vorliegen, liegen sie bei der Einbettung in Kunststoffe ebenfalls gleichmäßig verteilt im entsprechenden Volumen vor.

Dieses laserbasierte Verfahren – auch „Rapid Nanomaterial Manufacturing“ genannt – erlaubt die Produktion stabiler Nanopartikel sowie deren verlustfreie Einbettung (vollständige Dispersion) in einen gewünschten Kunststoff. Da das Verfahren ohne chemische Hilfsstoffe auskommt, ist das entstehende Produkt besonders rein und damit frei von eventuellen unkontrollierbaren Effekten, schwankender Qualität oder Nebenwirkungen. Somit ermöglicht dieses Verfahren eine Bereitstellung von neuen Materialien für eine Vielfalt von Anwendungsfeldern mit maßgeschneiderten Eigenschaften.

Ein Bett im Kunststoff

Quelle: „medizin & technik“, November 2007

Nanopartikel lassen sich durch Laserstrahlen herstellen. Die Vorteile gegenüber herkömmlichen Verfahren: Verunreinigungen entfallen, die Partikel lassen sich in Kunststoffe einbetten, und Materialmischungen sind ohne Aufwand möglich.

Ein neuer Ansatz aus der Lasertechnik eröffnet der Nanotechnologie ganz neue Möglichkeiten: Mit bestimmten, insbesondere kurz gepulsten Lasern lassen sich beliebige Materialien sehr präzise abtragen. Diese Technik wird

seit vielen Jahren zur Strukturierung von Bauteilen für die Mikrotechnik genutzt. Das dabei entfernte Material ist aber besonders interessant, denn es ist fast ausschließlich nanopartikulär und zugleich hochrein. Diese Tatsache wurde erst in den letzten Jahren deutlich – und sie wird am Laser Zentrum Hannover (LZH) inzwischen genutzt, um neuartige Kolloide zu erzeugen.

Durch Laserabtrag in Flüssigkeiten sind Nanopartikel herstellbar, die aus beliebigen Materialien bestehen – seien es Metalle, Keramiken, Legierungen oder Materialkombinationen. Eine Erwärmung des Substrats und der Flüssigkeit wird durch die ultrakurzen Pulse vermieden. Geeignete flüssige Medien stabilisieren die Partikel, vermeiden Agglomerationen und bieten die Möglichkeit, den Partikeln mit chemischen Gruppen zusätzliche Funktionalisierungen zu verleihen. Das erschließt ihnen den Einsatz in vielen biotechnologischen Anwendungen.

Ein Effekt der Nano-Welt: Lasererzeugte Kolloide aus Silber, Gold, Titan und Kupfer (von links nach rechts) in Aceton haben aufgrund der so genannten Plasmonenresonanz ein stoffspezifisches Absorptionsmaximum. Beispielsweise lassen Gold-Nanopartikel Aceton oder Wasser rot erscheinen, da grünes Licht durch Oberflächenschwingungen an den Partikeln absorbiert wird (Bilder: LZH).

Interessant ist das Verfahren, weil es sich für viele Materialien eignet und deren Kombination ermöglicht. So können unter anderem Multifunktionalitäten erzeugt werden – etwa Nanomaterial, das sowohl verschleißfest ist als auch antibakteriell wirkt.

Auch bisher gab es eine Reihe von Möglichkeiten, Nanopartikel entstehen zu lassen.

- Ein üblicher Ansatz ist die Synthese auf chemischem Weg. Die chemische Gasphasensynthese ermöglicht zum Beispiel die Erzeugung freier Nanopartikel im Tonnenmaßstab, ist jedoch vorwiegend für Metalloxide qualifiziert und führt leicht zu Verklum-



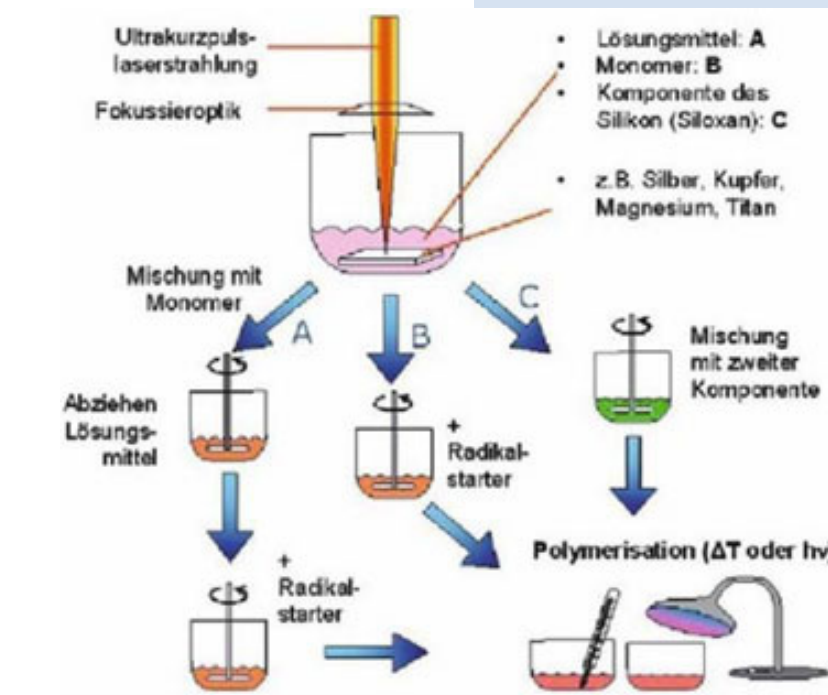
pungen des Nanopulvers.

- Das Sol-Gel-Verfahren ist das am häufigsten eingesetzte nasschemische Verfahren zur Erzeugung von Kolloiden. Es erfordert jedoch eine anschließende Aufreinigung, und es ist zu aufwändig, das Verfahren für jedes Material anzupassen.
- Auch mechanische Zerkleinerungsprozesse werden zur Herstellung von Nanopartikeln genutzt, indem polykristallines Pulver über mehrere Stunden in Mühlen aus gehärtetem Stahl oder Wolframkarbid gemahlen wird. Die Defizite sind hier vor allem in Verunreinigungen durch Mahlkörper-Abrieb und Schmierstoffe zu sehen sowie in einer beschränkten Materialauswahl.

Insbesondere Verunreinigungen galten bisher als starkes Argument dagegen, beispielsweise Implantate mit Nanolacken zu beschichten, obwohl das aus medizinischer Sicht sinnvoll sein kann. Dieser Ansatz ist auch nach wie vor unerwünscht, da Lacke abplatzen können.

Schema des „Rapid Nanomaterial Manufacturing“: Auf die laserbasierte Erzeugung von Nanopartikel-Dispersionen folgt die radikalische oder thermische Polymerisation zu einem Feststoff. Analog dazu existieren kontinuierliche Prozessvarianten des Verfahrens.

Die Gruppe Nanomaterialien am LZH verfolgt daher einen anderen Ansatz, um die Vorteile der Nanotechnologie für die Medizin nutzbar zu machen: Die freie Wahl der Trägerflüssigkeit bei der lasergestützten Erzeugung von Nanopartikeln ermöglicht es, die Partikel auch in Lösemitteln und sogar Monomeren zu erzeugen. So lassen sich Kunststoffe polymerisieren, in denen die lasererzeugten Nanopartikel von Anfang an enthalten sind. Mit diesem „Rapid Nanomaterial Ma-



nufacturing“ genannten Verfahren werden aus den Nanopartikel-Dispersionen gießfähige Biomaterialien, in denen die gewünschten Partikel sehr gleichmäßig eingebettet sind. Implantate, die aus solchen Kunststoffen bestehen oder damit ummantelt sind, enthalten die Nanopartikel fest und sicher umschlossen, erlauben aber dennoch die medizinisch relevante Freisetzung von Metallionen aus Partikeln nahe der Bauteiloberfläche.

Im Rahmen eines laufenden Projektes werden Cochlea-Implantatelektroden, die hörgeschädigten Neugeborenen durch Nerven-Anregung Höreindrücke verschaffen, mit derartigen Kunststoffen ummantelt, die bestimmte Konzentrationen verschiedener metallischer Nanopartikel enthalten. Es ist bekannt, dass eine Anpassung der Partikelsorten eine selektive Wirkung auf das Anwachsen bestimmter Zellgewebe entfaltet. So lässt die Oberfläche des Cochlea-Implantates bei einem geeigneten Zusammenspiel der Partikel Hörnervzellen wachsen und unterdrückt zugleich wucherndes Gewebe.

Modeling of quantum mechanical effects in nanoscale MOSFET and its influence on the circuits simulation

J. Xiong and W. Mathis

Institute of Theoretical electrical engineering, Appelstr. 9A, 30167 Hannover

Email: xiong@tet.uni-hannover.de, mathis@tet.uni-hannover.de

1. INTRODUCTION

Since MOSFET channel lengths approach the nanoscale, various quantities including the channel length will approach and then fall below the carrier phase coherence length and thermal de Broglie wavelength. Due to the wave nature of carriers, many additional quantum mechanical effects such like charge quantization [1], gate tunneling currents [2] and scattering effects [3] as well, become dominant and cannot be neglected. These effects could have parasitic influences on the functionality of the classical circuits based on the long channel MOSFET. On the other side, these quantum mechanical effects could be utilized for manufacturing new electronic elements such like resonant tunnelling diode. For the precise description of this new generation of devices as well the design of modern circuits, a new simulator becomes more and more necessary. It should be able to describe those quantum mechanical phenomena (especially confinement and tunneling) as well as phase randomizing scattering. The computational efficiency is necessary to permit use for engineering design and to explore numerous design options. Our research is characterized by developing a new simulator based on full quantum mechanical transport model for modelling of new induced quan-

tum mechanical effects in nanoscale semiconductor devices, especially in nanoscale MOS transistors. Then the simulated results will be implemented in the circuit simulation to check out the quantum mechanical robustness of the classical functionality of both analogy and digital circuits designed by the modern nanotechnology.

2. NANO DEVICE SIMULATOR (NADES)

Two approaches for modelling these quantum mechanical effects are available: One way is to add quantum corrections to the classical drift-diffusion or hydro-dynamic equation, such as the Transfer-Matrix-Method and Wigner function. In another way, full quantum mechanical transport models such as non-equilibrium Green's function are employed. Notice the fact that 45 nm MOSFET will be soon applied in the modern industrial electronic products and the MOS transistors with channel lengths as small as 10 nm are also being actively studied both theoretically and experimentally [4]. A full quantum mechanical transport model is needed for the modelling of nanoscale MOSFETs. The quantum transport modeling is usually defined by a self-consistent process between the calculation of the electron density using the NEGF formalism and the calculation of the space charge effects using the Poisson's equation. The self-consistent process is outlined by the following Figure 1 [5].

The non-equilibrium Green's function (NEGF) approach, based on effective mass band structure, provides a sound basis for the calculation of the quantum transport characteristics in the ballistic region. As a start point for better understanding the quantum transport process in nanoscale MOSFET, an 1D quantum ballistic transport simulator NADES (**N**ano **D**evice **S**imulator) is being developed based on self consistent process of Schrödinger- and Poisson-equation.

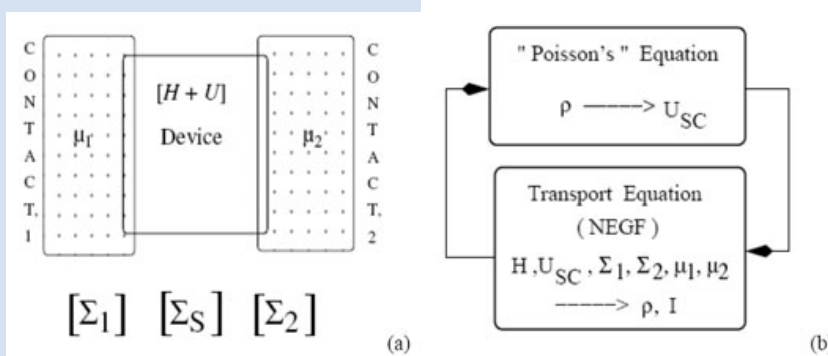


Figure 1: (a) A quantum device with two contacts with different Fermi levels μ_1 and μ_2 . $[\Sigma_1]$ and $[\Sigma_2]$ are respectively the self-energy matrices associated to the contact with the reservoir 1 and 2. A self-energy matrix $[\Sigma_S]$ can account for the scattering with the surrounding (b) Self-consistent process [5].

In 1D problem, the NEGF formalism is equivalent to solving the Schrödinger equation. Therefore, the first step is to choose the representation of the Hamiltonian of the system. It is assumed that the overall Hamiltonian H can be separated into a longitudinal part H_L and a transverse part H_T . For devices with a large (effectively infinite) cross-section, it is common to ignore the transverse confining potential and use periodic boundary conditions in that direction since the real boundary conditions are believed to have minimal effect on the observed properties. The transverse eigenstates are given by plan waves and the 3D problem can be simplified to 1D transport problem in this way. For the longitudinal Hamiltonian we use a discrete lattice in real space. The finite difference approximation is used to find the matrix representation for H_L . To get a good description of the Si band structure, the empirical tight-binding Hamiltonian including nearest neighbor coupling has been employed for its ability to provide a straight forward method for incorporating band structure effects into atomic level quantum transport simulation.

For transport calculations of the above discussed system, the device is divided into 3 regions, i.e. left lead, device and right lead regions. Carriers are assumed to be in equilibrium in the left and right leads. In the NEGF formalism, the transmission function for coherent transport and the spectral function are described by the retarded Green Function in the device region. For the considered 1D transport, the boundary self energy terms can be used. Since the spectral function and transmission function only depend on the longitudinal energy, therefore the NEGF carrier density and current formulate can be expressed by including all above considerations.

In this way, the simulator can also be used for modeling other 1-D devices like single barrier or double barrier structure, which helps to understand the 1D quantum transport in nanoscale MOSFETs or in resonant tunneling diodes. The simulated results for single barrier structure are shown in the following pictures.

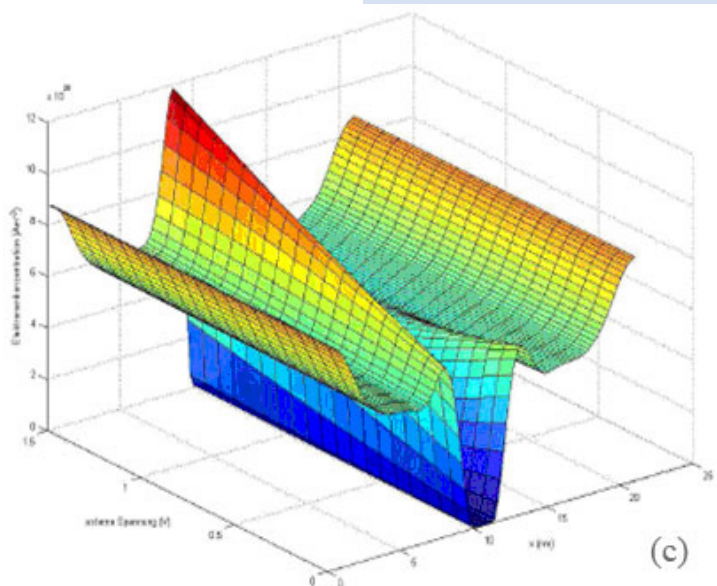
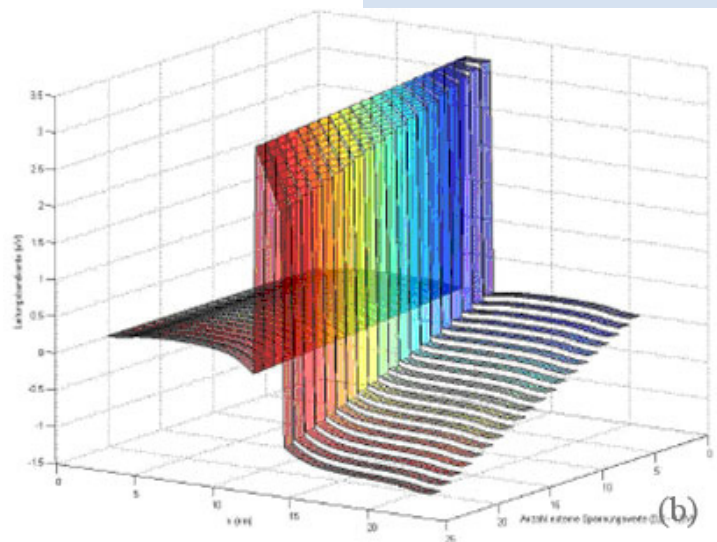
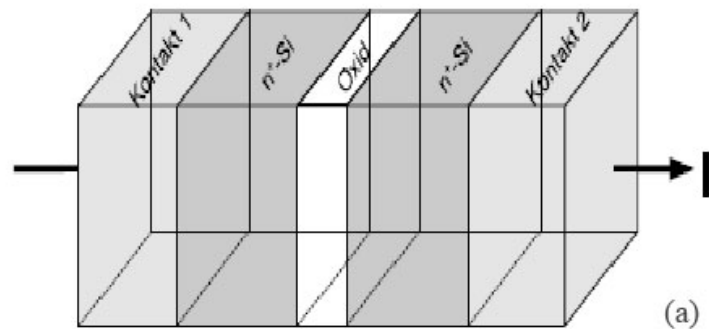


Figure 2: (a) Single barrier structure; (b) The simulated conduction band edges; (c) Electron density distribution along the structure.

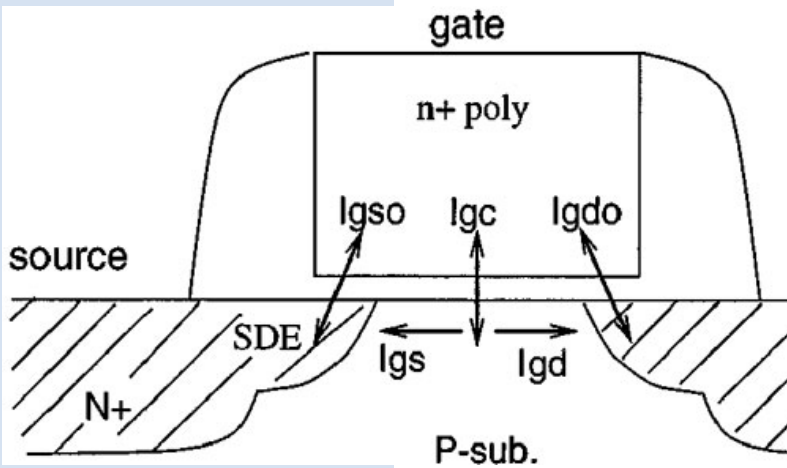


Figure 3: The illustration of gate direct tunneling components of a very short-channel.

The NEGF formalism is also readily extendible to two- and three-dimensions or to the use of molecular orbital. Moreover, the additional physics (such as scattering) can also be included as needed based upon the NEGF formalism.

3. THE INFLUENCE OF PARASITIC EFFECTS OF GATE TUNNELING CURRENTS ON THE CIRCUIT SIMULATION

For MOSFETs with dimensions below 100 nm, the concurrent gate oxide thickness of 1.2-1.5 nm will be required. That results in extra gate tunneling currents due to the finite (non-zero) probability of an electron directly tunnelling through the insulating SiO₂ layer. The gate tunnelling current, which is schematically illustrated in Figure 3, is a strong exponential function of T_{ox} as well as the voltage potential across the gate oxide. A difference in T_{ox} of just 2 Å can lead to an order of magnitude change in gate tunnelling current, making it the most sensitive device performance parameter with respect to any physical dimensions [2]. It becomes the primary concern for CMOS scaling.

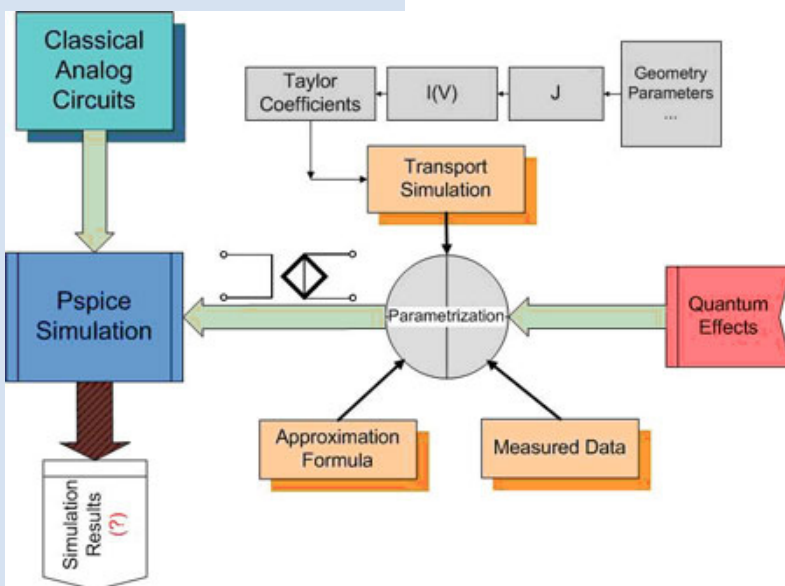


Figure 4: Schematic process of modelling the influence of gate tunnelling currents in circuit simulation.

These gate tunneling currents can lead to loss of inversion charge, gate capacitance and transconductance. Moreover, the gate current causes significant off-state leakage current, which may result in faulty circuit operation, since the previous design

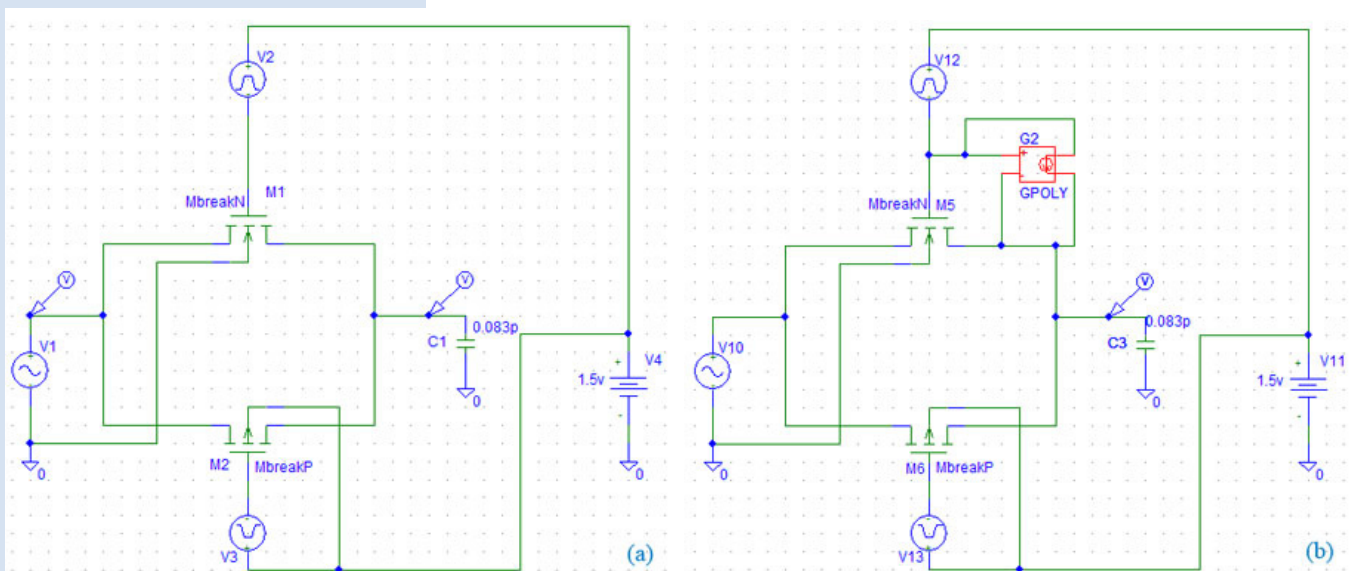


Figure 5: Pspice layout of Sample and Hold circuit without gate tunneling current (a) and with tunnelling current (b).

may assume that no appreciable gate current is there. After modelling of the additional gate tunneling currents, the results have to be implemented in CMOS circuit simulation. The simulation results will show whether the circuits, which include the nanoscale MOSFETs, have the quantum mechanical robustness extension or the functionality of the circuits will be dramatically changed, or even cannot work anymore. It is already measured that the gate tunneling currents provide a nonlinear character versus the gate voltage, therefore one reasonable way to implement the gate tunneling current into circuit simulation is to simply add an additional nonlinear polynomial voltage-controlled current source between the gate and source (drain) nodes. Before that, one has to get the current-voltage characteristic curve from measured data, from approximation formula or directly from the transport simulation. The polynomial coefficients could be then attained by fitting the curve with polynomial approximation. The schematic process is described in Figure 4.

As an example a simple Sample and Hold circuit (see Figure 5) is simulated with and without gate tunnelling current. The polynomial coefficients of the nonlinear voltage controlled current source are obtained by fitting the experimentally measured I_g-V_g curve [6].

It shows the gate tunneling current increases exponentially if the oxide thickness decreases 2-3 Å. The influence of this gate tunneling current is obviously shown in the simulation results (Figure 6).

It can be found that the gate tunnelling currents can have obvious impact on the functionality. If the oxide thickness is extremely scaled down, the impact can even be very dramatically and may lead to the faulty circuit operation.

Another example is the simulation of a bootstrap circuit (Figure 7a). A bootstrap circuit is a dynamic circuit technique that obtains a full rail-to-rail output swing and reduces propagation time delays. It is often used in CMOS circuits to avoid significant heat loss. The simulation result (Figure 7b) has

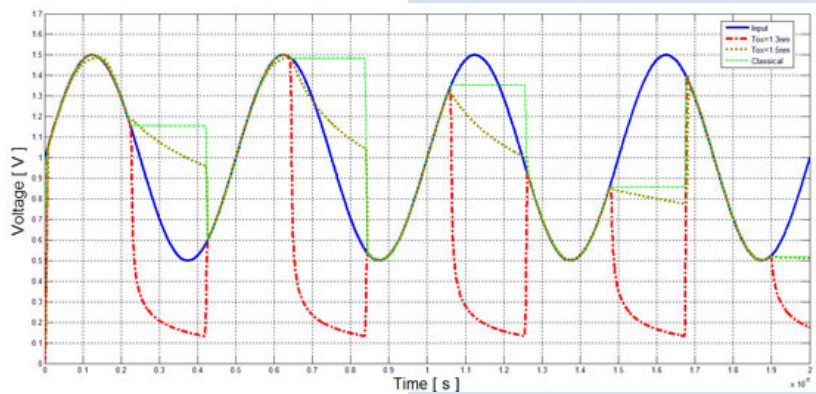


Figure 6: The simulation results of the sample and Hold circuit with or without the influence of gate tunnelling current.

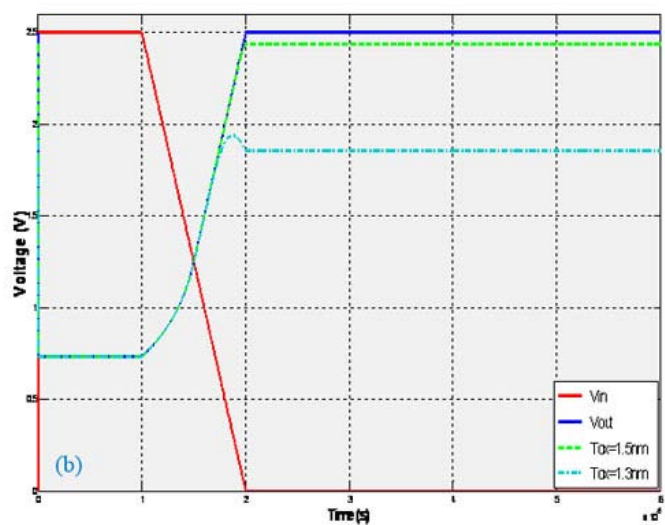
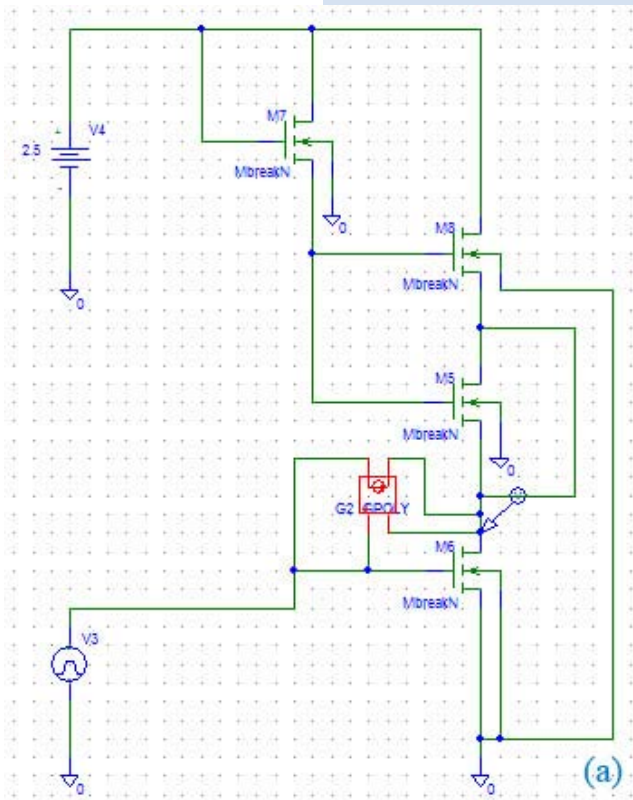


Figure 7: The simulation of the bootstrapping circuit with the influence of gate tunneling current (a) and the simulation result with corresponding gate oxide thickness (b)

shown that the presence of additional gate tunneling current results in the reduction of the output voltage. A way to overcome this problem is to use high-k dielectric to replace the leaky gate oxides in MOSFET, which is now a hot research topic of continuous device scaling.

REFERENCES:

- [1] Stern F and Howard W E, Properties of semiconductor surface inversion layers in the electric quantum limit Phys. Rev. 163 816-35, 1967
- [2] H. S. Momose, M. Ono, T. Yoshitomo, T. Ohguro, S. Nakamura, M. Saito, and H. Iwai, „1.5-nm direct-tunneling gate oxide Si MOSFETs,“ IEEE Trans. Electron Devices, vol. 43, pp. 1233-1242, Aug. 1996.
- [3] M. Lundstrom, „Elementary scattering theory of the Si MOSFET,“ IEEE Electron. Dev. Lett., vol. 18, pp. 361-363, July 1997.
- [4] M. Lundstrom, R. W. Dutton, D. K. Ferry, and K. Hess, Special Issue on Computational Electronics: New Challenges and Directions, edited by (2000). IEEE Transactions on Electron Devices
- [5] S. Datta, „Electronic transport in mesoscopic systems“, Cambridge University Press, UK, 1997
- [6] C.H. Choi, „Impact of Gate Direct Tunneling Current on Circuit Performance: A Simulation Study“, IEEE Transactions on Electron Devices, vol. 48, No. 12, Dec. 2001

Full counting statistic of single electron tunneling

C. Fricke¹, F. Hohls¹, W. Wegscheider², and R. J. Haug¹

¹ Institut für Festkörperphysik, Leibniz Universität Hannover, D30167 Hannover, Germany

² Angewandte und Experimentelle Physik, Universität Regensburg, D93040 Regensburg, Germany

Abstract

We explore the full counting statistics of single electron tunneling through a quantum dot using a one-dimensional channel (quantum point contact) as a non-invasive high bandwidth charge detector. The distribution of counted tunneling events is measured as a function of gate and source-drain-voltage for several consecutive electron numbers on the quantum dot. For bias voltages at which excited states become accessible we find a bimodal characteristic of the counting distribution. The bimodal distribution arises from a slow switching between different electron configurations on the dot. To characterize the switching process we analyze the time dependence of the number of electrons passing the dot in a given time.

Article

The analysis of the shot noise of a quantum dot current [1-4] provides additional information on the transport dynamics not accessible by measurements of the average (DC) current alone. But this type of measurement seems to be limited to the first two or three moments of current through the quantum dot. The use of a nearby quantum point contact as a non-invasive and highly sensitive charge detector [5-8] considerably extended the experimental research on quantum dots. By the means of this technique time resolved measurements of single electron tunneling became feasible [9,10]. This allows to measure the full counting statistics for tunneling through a quantum dot [11-13] and the analysis of conditional counting effects [14,15].

We have accomplished a measurement of single electron counting with large bandwidth. Our device is based on a GaAs/AlGaAs heterostructure containing a two-dimensional electron system (2DES) 34 nm below the surface. We use an atomic force mi-

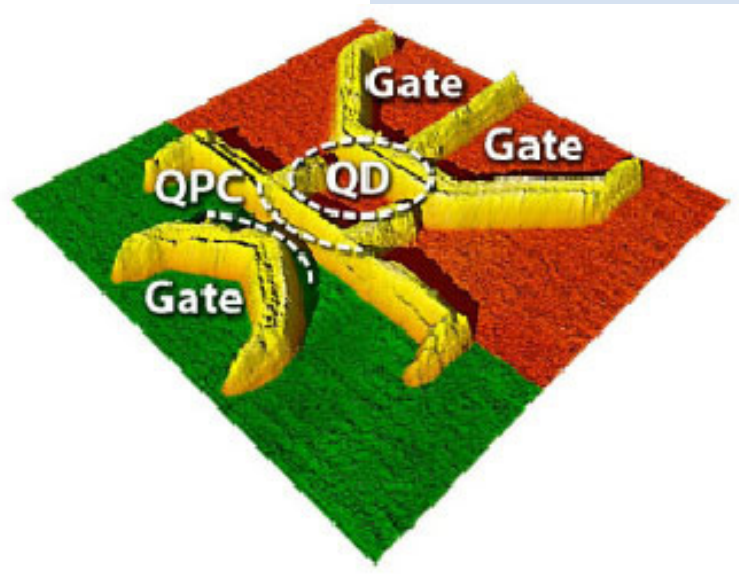


Fig. 1: AFM image of the device and gate configuration.

croscope (AFM) to define the quantum dot (QD) and the quantum point contact (QPC) structure by local anodic oxidation (LAO) on the surface [16,17]; the 2DES below the oxidized surface is depleted and insulating areas can be written.

An AFM image of our device is presented in Fig. 1. The bright walls depict the insulating lines written by the AFM. The QPC (left area) is separated from the QD structure (right area) by an insulating line. The QPC can be tuned using the in-plane gate G3. The QD is coupled to source and drain via two tunneling barriers, which can be separately controlled with gates G1

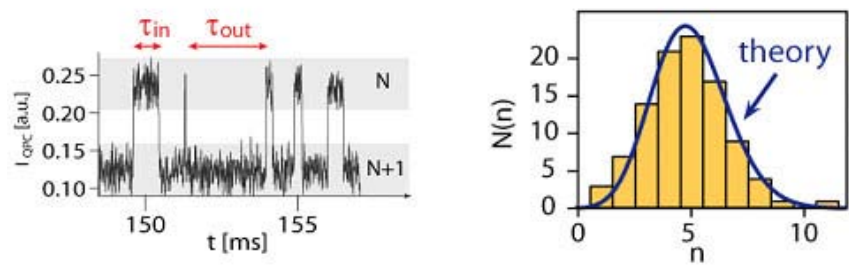


Fig. 2 Time trace of the QPC current and a typical counting distribution (measurement: bars; theory: line).

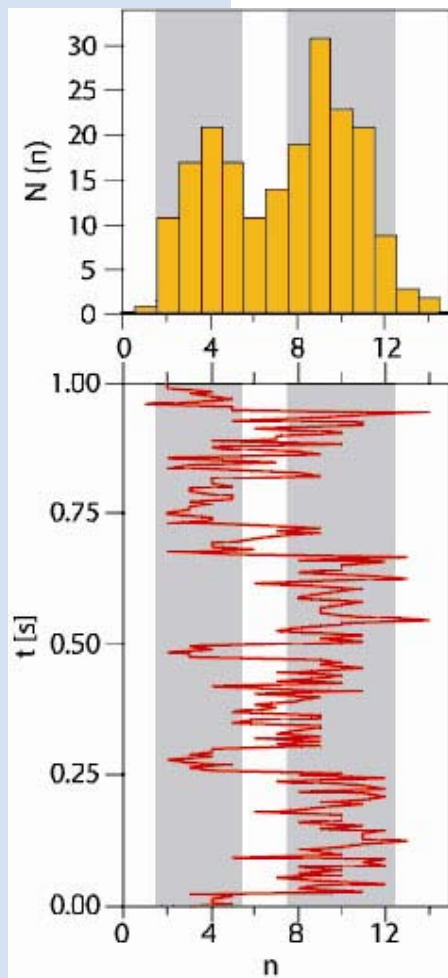


Fig. 3 Bimodal distribution.

and G2. These gates are also used to set the number of electrons in the QD. The experimental setup allows us to resolve tunneling times as small as $30 \mu\text{s}$. A typical time trace of the QPC current is shown in Fig. 2.

Distinct changes in the current can be seen for every change of the number of electrons on the QD. Due to the applied bias voltage electrons are entering the QD from the source and are leaving the QD to the drain. In the time segment shown three traversing electrons can be identified. By this we can not only measure the current through the dot electron by electron but even extract the characteristic tunneling times t . To determine the counting distribution a large number of such short segments are taken and the number of transitions n from $N+1$ to N electrons is counted for each segment [11]. The experimental result (bars) compares well to the theoretical model (line) calculated without free parameters from the mean of t_{in} and t_{out} [18,11].

When excited states of the quantum dot take part in transport, we observe

a different behavior. We now find two maxima, the counting distribution is bimodal. This is shown in Fig. 3. Below the distribution we present the evolution of the counted electron events with time. Depicted is the number of electrons entering the QD in a given time segment in chronological order. By this we can examine the temporal evolution of all time segments contained in the distribution. We find two ranges where the majority of events are accumulated. Moreover a switching between these two ranges can be observed. Each range represents a transport channel through the system. These transport channels are caused by two different configuration of the quantum dot. While one of these configuration allows a fast tunneling of electron on and off the dot, the other configuration leads to a much lower rate of traversing electrons.

This behavior leads to an enhanced Fanofactor, the transport seems to follow a super-Poissonian counting statistic. But when we analyze the two transport channels individually, we find sub-Poissonian behavior for both channels. Moreover we are able to model the bimodal distribution by two subpoissonian processes, with only one free parameter, that describes the mean occupation time of one channel. We analyzed the switching between the transport channels in more detail and found a sub-poissonian statistic even for the switching process.

A detailed description of these result is given at: Fricke *et al.* Phys. Rev. B 76, 155307 (2007)

References

- [1] Y. M. Blanter and M. Büttiker, Phys. Rep. 336, 1, (2000).
- [2] A. Nauen, I. Hapke-Wurst, F. Hohls, U. Zeitler, R. J. Haug, and K. Pierz, Phys. Rev. B 66, 161303(R) (2002).
- [3] A. Nauen, F. Hohls, N. Maire, K. Pierz, and R. J. Haug, Phys. Rev. B 70, 033305 (2004).
- [4] B. Reulet, J. Senzier, and D. E. Prober, Phys. Rev. Lett. 91, 196601 (2003).
- [5] M. Field, C. G. Smith, M. Pepper, D. A. Ritchie, J. E. F. Frost, G. A. C. Jones, and D. G. Hasko, Phys. Rev. Lett. 70, 1311 (1993).

- [6] J. M. Elzerman, R. Hanson, J. S. Greidanus, L. H. Willems van Beveren, S. De Franceschi, L. M. K. Vandersypen, S. Tarucha, and L. P. Kouwenhoven, *Phys. Rev. B* 67, 161308(R) (2003).
- [7] R. Schleser, E. Ruh, T. Ihn, K. Ensslin, D. C. Driscoll, and A. C. Gossard, *Appl. Phys. Lett.* 85, 2005 (2004).
- [8] C. Fricke, M. C. Rogge, B. Harke, M. Reinwald, W. Wegscheider, F. Hohls, and R. J. Haug, *Phys. Rev. B* 72, 193302(2005).
- [9] J. M. Elzerman, R. Hanson, L. H. Willems van Beveren, B. Witkamp, L. M. K. Vandersypen, and L. P. Kouwenhoven, *Nature* 430, 431 (2004).
- [10] T. Fujisawa, T. Hayashi, R. Tomita, and Y. Hirayama, *Science* 312, 1634 (2006).
- [11] S. Gustavsson, R. Leturcq, B. Simovic, R. Schleser, T. Ihn, P. Studerus, K. Ensslin, D. C. Driscoll, and A. C. Gossard, *Phys. Rev. Lett.* 96, 076605 (2006).
- [12] L. S. Levitov, H. Lee, and G. B. Lesovik, *J. Math. Phys.* 37, 4845 (1996).
- [13] S. Gustavsson, R. Leturcq, B. Simovic, R. Schleser, P. Studerus, T. Ihn, K. Ensslin, D. C. Driscoll, and A. C. Gossard, *Phys. Rev. B* 74, 195305 (2006).
- [14] A. N. Jordan and E. V. Sukhorukov, *Phys. Rev. Lett.* 93, 260604 (2004).
- [15] E. V. Sukhorukov, A. N. Jordan, S. Gustavsson, R. Leturcq, T. Ihn, and K. Ensslin, *Nature Physics* 3, 243 (2007).
- [16] R. Held, T. Vancura, T. Heinzel, K. Ensslin, M. Holland, and W. Wegscheider, *Appl. Phys. Lett.* 73, 262 (1998).
- [17] U. F. Keyser, H. W. Schumacher, U. Zeitler, R. J. Haug, and K. Eberl, *Appl. Phys. Lett.* 76, 457 (2000).
- [18] D. A. Bagrets, and Yu. V. Nazarov, *Phys. Rev. B* 67, 085316 (2003).

Magnetic Interactions in Spin-valve Systems

T. Griesbach and H.H. Gatzen

Institute for Microtechnology, Leibniz Universität Hannover

An der Universitaet 2, D-30823 Garbsen, Germany

Email: griesbach@imt.uni-hannover.de, gatzen@imt.uni-hannover.de

ABSTRACT

GMR spin-valve sensors excel in detecting small magnetic fields and are used in various sensing applications, among other magnetic data storage. For optimizing such a sensor, the magnetic coupling between the spin-valve layers has to be investigated. There are two magnetic interactions of particular interest. The first one is the exchange bias field occurring at the ferromagnetic/antiferromagnetic interface, which is used for magnetic pinning. The second one is the exchange coupling between ferromagnetic layers separated by a non-magnetic metal spacer, which should be avoided. This paper presents experimental results on a typical spin-valve multilayer system.

I. INTRODUCTION

Magnetic sensors cover a wide range of applications, ranging from rotational velocity measurements in automotive to read heads in magnetic data storage. Spin-valve sensors taking advantage of the giant magnetoresistance (GMR) effect are combining very high magnetoresistance (MR) signals and high sensitivity at low magnetic fields [1, 2]. A typical spin-valve configura-

tion consists of two ferromagnetic metal layers (free layer and pinned layer), separated by a non-magnetic metal spacer, as well as an antiferromagnetic layer. The latter serves as a pinning layer and defines the magnetization direction of the ferromagnetic pinned layer. The free layer follows the direction of an external magnetizing field. Because of the exchange bias field H_{EX} of the antiferromagnet, the hysteresis loop of the pinned layer is offset compared to a loop of a single magnetic layer. On the other hand, the magnetization of the free layer orients itself along the directions of an external field, even if it is small. The resistance of the spin-valve changes as a function of the angle between the direction of magnetization of the pinned and the free layer [3]. Figure 1 depicts a schematic representation of a typical basic spin-valve system and the directions of magnetizations under the influence of an external magnetizing field.

A further effect occurs in the ferromagnetic layers: despite a separation by the non-magnetic spacer, exchange coupling takes place. It was investigated by Grünberg in 1989 [1]. The coupling strength of two ferromagnetic layers shows an oscillatory variation, depending on the thickness of the non-magnetic spacer. As a function of the layer thickness, the magnetization is either parallel (ferromagnetic coupling) or antiparallel (antiferromagnetic coupling) [1, 4].

For characterizing these effects, spin-valve systems consisting of NiFe/Cu/NiFe/FeMn layers were fabricated. During the experiments, main emphasis was put on studying the relationship between the non-magnetic layer thickness and the exchange field, the exchange coupling between two ferromagnetic layers separated by the non-magnetic layer, and the interaction of both effects.

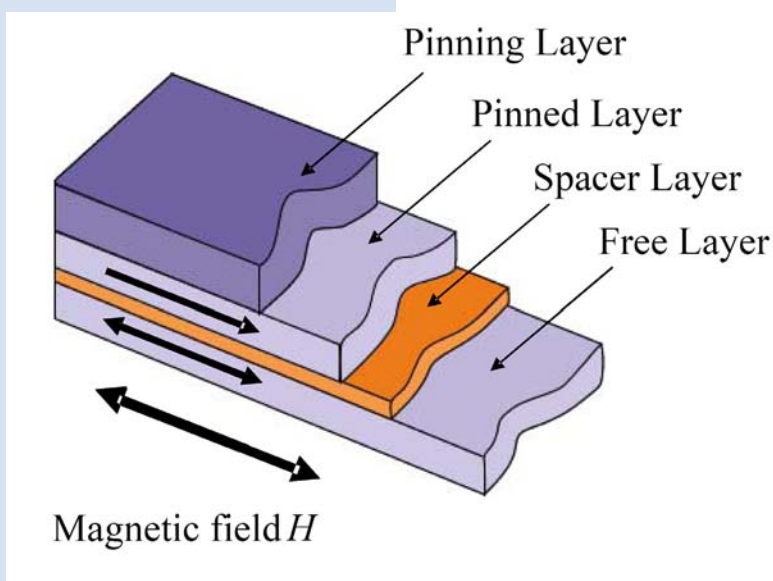


Fig. 1: Spin-valve multilayer system exposed to an external magnetic field.

II. EXPERIMENTAL METHODS

Three spin-valve multilayer systems were deposited on thermally oxidized Si(100) substrates. Table 1 specifies the respective multilayer combinations.

The spin-valve structures were deposited in an Ar atmosphere using a six target planetary RF sputtering system. An internal magnetic field was applied in the in-plane direction during sputter deposition. For analyzing the magnetic properties of the probes, a Vibrating Sample Magnetometer (VSM) was used. The magnetic characteristics were measured at room temperature in the in-plane direction.

III. RESULTS AND DISCUSSION

Figure 2 depicts hysteresis loops of the spin-valve systems investigated. The hysteresis loops of the spin-valve systems show a strong magnetic coupling dependant on the thickness of the non-magnetic Cu spacer. The magnetic coupling between the ferromagnetic layers is evident by the offset of the pinned layer. The greatest offset of the free layer is found in the spin-valve system A. The offset amounts a magnetic field strength of 1.98 kA/m. An increase of the Cu thickness results in a decrease of the magnetic coupling. The greatest shift from zero was found in system B and amounted to 0.42 kA/m. The lowest offset was achieved with the spin-valve structure C. In this system, the shift from zero of the free layer was 0.26 kA/m.

Another important result of the investigations is that the exchange fields H_{EX} of the three spin-valve systems are not proportional to the Cu layer thickness. The greatest exchange field H_{EX} was 20.15 kA/m and occurred in spin-valve structure B (Fig. 2). The lowest shift from zero was measured for the spin-valve system C. In this case, it amounted to an exchange field H_{EX} of 16.1 kA/m. For spin-valve system A, an exchange field H_{EX} of 18.56 kA/m was measured. The variation in the exchange bias field strength is caused by the exchange coupling of the pinned and the free layer, which changes periodically as a function of the spacer thickness, as discussed above.

Table 1: Structures of the Spin-valve Multilayer Systems

Spin-valve system	Structure
A	NiFe81/19 (6 nm) / Cu (2 nm) / NiFe81/19 (6 nm) / FeMn50/50 (8 nm)
B	NiFe81/19 (6 nm) / Cu (3 nm) / NiFe81/19 (6 nm) / FeMn50/50 (8 nm)
C	NiFe81/19 (6 nm) / Cu (4 nm) / NiFe81/19 (6 nm) / FeMn50/50 (8 nm)

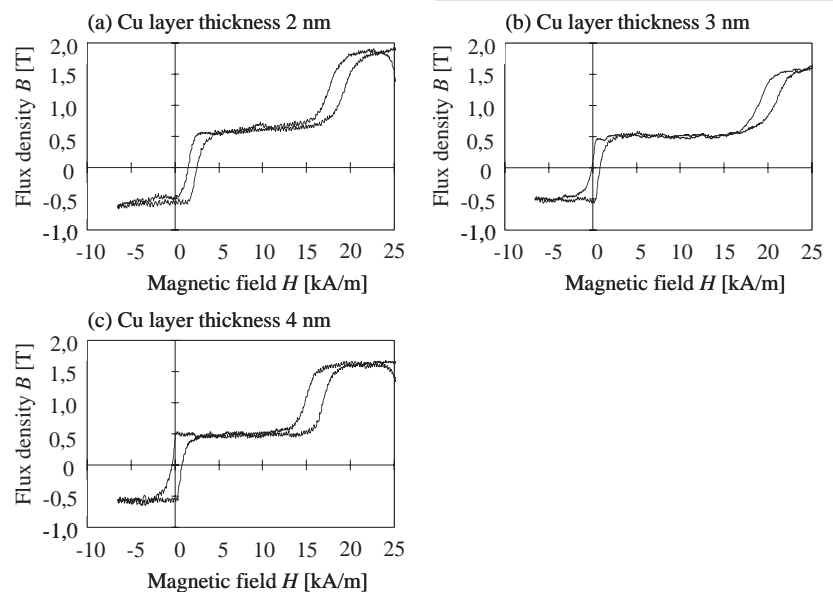


Fig. 2: Hysteresis loops of multilayer spin-valve systems with different Cu spacer layers

(a) System A: NiFe81/19 (6 nm) / Cu (2 nm) / NiFe81/19 (6 nm) / FeMn50/50 (8 nm)

(b) System B: NiFe81/19 (6 nm) / Cu (3 nm) / NiFe81/19 (6 nm) / FeMn50/50 (8 nm)

(c) System C: NiFe81/19 (6 nm) / Cu (4 nm) / NiFe81/19 (6 nm) / FeMn50/50 (8 nm)

IV. CONCLUSION

By studying the magnetic properties of three spin-valve systems composed of NiFe/Cu/NiFe/FeMn, it was found that a 3 nm thick Cu spacer results in an optimal exchange bias field H_{EX} . Such a system also features a minimal shift of the free layer magnetization off zero. Also, the exchange bias field H_{EX} for a 3 nm thick Cu spacer is greater than for either a 2 nm and 4 nm Cu spacer. This variation in the exchange bias field strength is caused by the exchange coupling of the pinned and the free layer, which changes periodically as a function of the spacer thickness.

REFERENCES

- [1] G. Binasch, P. Grünberg, F. Sauerbach, and W. Zinn, Enhanced magnetoresistance in layered magnetic structures with antiferromagnetic interlayer exchange, *Phys. Rev. B* 39, 4828 (1989).
- [2] M. Urbaniak, F. Stobiecki, B. Szymanski, A. Ehresmann, A. Maziewski, and M. Tekielak, Magnetic and magnetoresistive properties of NiFe/Au/Co/Au multilayers with perpendicular anisotropy of Co layers, *Journal of Applied Physics* 101, 013905 (2007).
- [3] Paetzold, A, Thermische Stabilität und Modifizierung der magnetischen Austausch-anisotropie in Schichtsystemen, Dissertation, Universität Kassel, Fachbereich Physik, 2002.
- [4] J. C. S. Kools, A. J. Devasahayam, K. Rook, Chih-Ling Lee, and M. Mao, Effect of microstructure on the oscillating interlayer coupling in spin-valve structures, *Journal of Applied Physics*, Volume 93, Number 10 (2003).

Kontakt zum LNQE

Sprecher des Vorstandes:

Prof. Dr. Rolf J. Haug
 Institut für Festkörperphysik
 Abteilung Nanostrukturen
 Leibniz Universität Hannover
 Appelstr. 2
 30167 Hannover
 Tel.: (0511) 762 2901
 Fax: (0511) 762 29043
 haug@nano.uni-hannover.de
 www.nano.uni-hannover.de



Geschäftsführer:

Dr. Fritz Schulze Wischeler
 Laboratorium für Nano- und Quanten-
 engineering
 Leibniz Universität Hannover
 Schneiderberg 32
 30167 Hannover
 Tel.: (0511) 762 5031
 Fax: (0511) 762 5051
 Schulze-Wischeler@lnqe.uni-hanno-
 ver.de
 www.lnqe.uni-hannover.de



The screenshot shows the website of the Laboratory for Nano- and Quantum Engineering (LNQE) at Leibniz University Hannover. The browser window title is "Laboratorium für Nano- und Quantenengineering, LNQE, Nanotechnologie - Mozilla". The address bar shows "http://www.lnqe.uni-hannover.de/".

The website layout includes a navigation menu on the left with links to "Startseite", "Ziele", "Forschungsbereiche", "Projekte", "Aktuell", "Pressecenter", "NanoDay 2007", "Kolloquium", "Mitglieder", "Freundeskreis", "Gerätepool", "Downloads", and "Interner Bereich". There are also links to partners, tagungs, and funding.

The main content area features a "Willkommen!" section with a welcome message and a detailed description of the laboratory's research focus. It mentions that the laboratory is a research center at Leibniz University Hannover, focusing on nanotechnology and quantum engineering. It highlights the laboratory's commitment to interdisciplinary research, involving natural scientists and engineers, and its focus on developing new materials and functions. The laboratory also provides training and education, including a "NanoDay 2007" event and a "Kolloquium".

On the right side, there are sections for "Aktuell" (Latest News), "Mitgliederversammlung des LNQE 2007" (LNQE 2007 Member Meeting), "Termin" (Term), "Kolloquium" (Colloquium), and "Projekte" (Projects). The "Neustes Projekt" (Newest Project) section mentions a "Full counting statistic of single electron tunneling" project.

The footer of the website includes contact information for Prof. Dr. Rolf Haug and Dr. Fritz Schulze Wischeler, the date of the last update (12. Dezember 2007), and the website's URL (www.lnqe.uni-hannover.de).

Website des LNQE - www.lnqe.uni-hannover.de

Laboratorium für Nano- und Quantenengineering
Leibniz Universität Hannover
Schneiderberg 32
30167 Hannover

Tel +49(0)511.762-5031
Fax +49(0)511.762-5051
e-mail. Schulze-Wischeler@LNQE.uni-hannover.de
<http://www.LNQE.uni-hannover.de>