

Walter Schottky Institut

Technische Universität München



Kapitel	Titel
1	Grußworte
2	Geschichte und Forschungsschwerpunkte
3	Halbleiter – Eine Einführung
4	Materialforschung – Die Basis
5	Nanoskalige Materialien
6	Physik in niedrigen Dimensionen
7	Nano-Photonik
8	Halbleiterlaser
9	Modellierung und Simulation von Halbleiter-Bauelementen
10	Spintronik - Informationsverarbeitung auf der Basis von Spins
11	Biosensoren und Bioelektronik
12	Halbleiter und Energie
13	Leben am Walter Schottky Institut
14	Das WSI in Zahlen
15	Kontaktadressen

20 Jahre Walter Schottky Institut

Zum 20jährigen Bestehen gilt dem Walter Schottky Institut (WSI) mein herzlicher Glückwunsch. Ganze zwei Jahrzehnte ist es inzwischen her, dass das neue Zentralinstitut der Technischen Universität München nach rekordverdächtiger, nur zweijähriger Planungs- und Bauzeit am 14. Juli 1988 seiner Bestimmung übergeben werden konnte. Vorangegangen war eine beispiellose konzertierte Aktion von Wissenschaft, Wirtschaft und Politik, die diesen Erfolg seinerzeit möglich gemacht hat und auf die wir bis heute mit Bewunderung, vielleicht auch mit leisem Neid blicken dürfen. Insbesondere die starke Partnerschaft der Hochschule mit der Siemens AG und die auch für damalige Verhältnisse außergewöhnlich unbürokratische Unterstützung durch die Bayerische Staatsregierung waren es, die zur Realisierung des ehrgeizigen Plans beigetragen haben, in kürzester Zeit ein interdisziplinär aufgestelltes und weltweit agierendes Forschungszentrum für die Grundlagen der Halbleiterelektronik zu errichten. Die enge Kooperation mit der einschlägigen Industrie und der Transfer der wissenschaftlichen Erkenntnis in die Anwendung waren dabei von Anfang an eines der zentralen Ziele.

An die aufregende Gründungsphase und die enorme wissenschaftliche und politische Dynamik, die hinter der Errichtung des Schottky-Instituts stand, kann ich mich aus meiner Zeit als Staatssekretär im damaligen Wissenschaftsministerium noch lebhaft erinnern. Die Erwartungen der Beteiligten an den wissenschaftlichen Erfolg des Instituts waren damals – angesichts der hohen Investitionen durchaus zu Recht – beträchtlich. Heute, zwanzig Jahre später, können wir mit Fug und Recht sagen, dass das Walter Schottky Institut die hohen Erwartungen mehr als gerechtfertigt hat. Seit seiner Gründung hat sich das Institut kontinuierlich einen hervorragenden wissenschaftlichen Ruf erworben und sich zu einem Leuchtturm an der Technischen Universität München entwickelt, der weit über die Grenzen Bayerns hinaus strahlt. Das WSI war und ist maßgeblich an zahlreichen SFBs beteiligt, auch der Exzellenz-Cluster „Nanosystems Initiative Munich“ (NIM) unter Federführung der LMU und die TUM International Graduate School for Science and Engineering (IGSSE) tragen seine Handschrift. Längst ist das WSI zum Magneten und Kristallisationspunkt für Spitzenwissenschaftler aus aller Welt geworden.

Mit dem Erfolg wachsen die Ansprüche, auch an Raum und Forschungsfläche. So wundert es nicht, dass das 1988 in Betrieb genommene Gebäude längst nicht mehr ausreicht, um alle Forschergruppen, modernen Großgeräte und zeitgemäßen neuen Forschungsbereiche unterzubringen. Ein Erweiterungsbau ist dringend erforderlich geworden, und wir setzen unseren Ehrgeiz daran, auch dieses Bauvorhaben so schnell wie möglich – wenn auch vielleicht nicht ganz in der damaligen Rekordzeit – durchführen zu können. Dabei helfen uns das von der Staatsregierung aufgelegte Sonderprogramm Bayern 2020 und das neue Forschungsbauverfahren nach Art. 91 b GG, in dem sich das WSI dank einem überzeugenden Forschungsprogramm im Wettbewerb um die Bundesmittel mühelos vor zahlreichen ebenfalls hochrangigen Konkurrenzanträgen durchsetzen konnte.

Mein besonderer Dank für zwanzig hervorragende Jahre Walter Schottky Institut gilt den Spitzenwissenschaftlern, die diesen Erfolg möglich gemacht haben, stellvertretend nenne ich den Direktor des Instituts, Professor Gerhard Abstreiter; er gilt auch den Partnern aus der Industrie und der außeruniversitären Forschung. Für die nächsten 20 Jahre wünsche ich Ihnen allen eine ebenso erfolgreiche Fortsetzung Ihrer Arbeit und weiterhin alles Gute!

München, im Mai 2008



Dr. Thomas Goppel
Staatsminister für Wissenschaft, Forschung und Kunst



Dr. Thomas Goppel
Staatsminister für Wissenschaft,
Forschung und Kunst

Spitzenforschung vom Feinsten

20 Jahre Walter Schottky-Institut an der Technischen Universität München: Das sind 20 Jahre Forschung und Entwicklung auf Weltniveau im Bereich der Halbleiter-Nanotechnologie. Diese Erfolgsgeschichte sucht ihresgleichen. In enger Zusammenarbeit der TU München mit der Bayerischen Staatsregierung und der Siemens AG ist es damals gelungen, das nach modernsten internationalen Standards konzipierte, interdisziplinäre Zentralinstitut nach nur zweijähriger Planungs-, Entwicklungs- und Realisierungszeit am 14. Juli 1988 seiner Bestimmung zu übergeben.

Die innovative Planung ist mehreren Personen zu verdanken, die ich dankend erwähnen möchte: Fred Koch, Gerhard Abstreiter und Wilhelm Brenig von unserem Physik-Department, Klaus von Klitzing als damals frischgebackener Nobelpreisträger, der damalige TU-Präsident und spätere Wissenschaftsminister Wolfgang Wild sowie Karl Heinz Beckurts, Leiter des Zentralbereichs Forschung und Technik bei der Siemens AG. Das großartige Engagement von Karl Heinz Beckurts ist unvergessen. Die Eröffnung des Instituts durfte er nicht mehr erleben; die RAF hatte ihn hinterhältig ermordet, ein unfassbarer Verlust für seine Familie, für die Wissenschaft und die deutsche Wirtschaft.

Die Initiatoren hatten frühzeitig erkannt, dass die moderne Halbleiterphysik disziplinäre Grenzen sprengt und nur durch eine Zusammenführung verwandter Forschungsaktivitäten als interdisziplinäres Zentrum international wettbewerbsfähig agieren kann. Der Erfolg des Walter Schottky-Instituts gibt ihnen recht: Bis heute nimmt das Zentrum eine Spitzenstellung bei der Herstellung und Charakterisierung von Halbleiterschichtsystemen und Nanostrukturen mit höchster Materialqualität ein und ist ein Anziehungspunkt für die besten Forscher aus aller Welt. Die große Zahl hochrangiger nationaler und internationaler Kooperationen, die mit Beteiligung des WSI zustande gekommen sind – dabei ist nicht zuletzt der Exzellenzcluster Nanosystems Initiative Munich zu nennen –, die Tatsache, dass rund 80% der Mitarbeiter über Drittmittel finanziert sind sowie mehr als 1500 seit Gründung entstandene Publikationen – nicht selten in Nature und Science –, belegen eindrucksvoll den Weltspitzenstandard.

Beim Bau des Instituts hatten die TUM und der Freistaat Bayern vor 20 Jahren Neuland betreten: Mit der Siemens AG übernahm damals erstmalig ein Unternehmen die Verantwortung für ein Universitätsgebäude. Heute ist dieses Vorgehen zu einer erfolgreichen Tradition an unserer Universität geworden. Derzeit errichtet die BMW AG auf dem Garching Campus das Gebäude für ein vergleichbar innovatives Projekt, das TUM Institute for Advanced Study als Ergebnis der Exzellenzinitiative.

Als dann im vergangenen Jahr der Antrag für den Forschungsneubau eines Center for Nanotechnology and Nanomaterials (CNN) gestellt wurde, haben sich Bund und Länder vorbehaltlos für die Erweiterung des WSI entschieden. Der Wissenschaftsrat evaluierte das Projekt ohne jede Einschränkung, da alle Kriterien – Zitat – „in höchstem Maße und sehr überzeugend erfüllt“ seien, vor allem das zur 50%-Bundesfinanzierung erforderliche Kriterium der „überregionalen Bedeutung“. Überregional? International darf man da mit Fug und Recht sagen. Das Walter Schottky-Institut ist eine Perle in der Krone der Wissenschaft, jener der TUM allemal!

Diese Krone möchte ich heute dem gesamten Walter Schottky-Institut, seinen Initiatoren und den heutigen Mitarbeitern aufsetzen. Das WSI hat alle Erwartungen, die wir bis zum heutigen Tage in unser Zentralinstitut gesetzt haben, „in höchstem Maße und sehr überzeugend erfüllt“. Als Präsident gratuliere ich daher herzlich zum 20jährigen Bestehen und setze zunächst auf mindestens weitere 20 Jahre Walter Schottky-Institut an unserer Universität. Möge das WSI der Goldstandard für unsere wissenschaftlichen Zentralinstitute bleiben!

Mai 2008



Professor Wolfgang A. Herrmann
Präsident
Technische Universität München



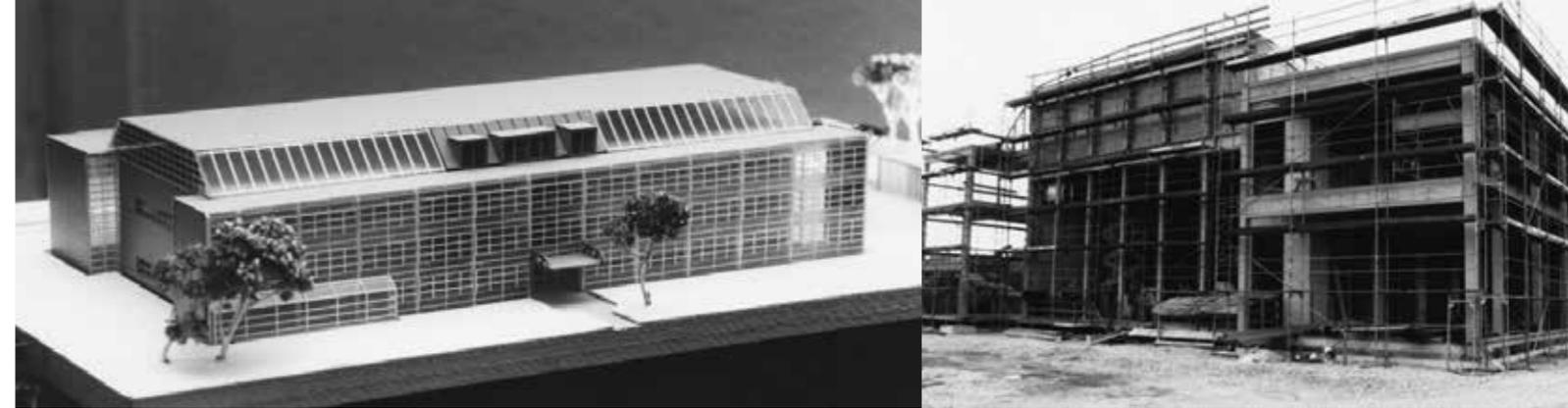
Professor Wolfgang A. Herrmann
Präsident
Technische Universität München



Walter Schottky Institut

Geschichte und Forschungsschwerpunkte

Geschichte und Forschungsschwerpunkte



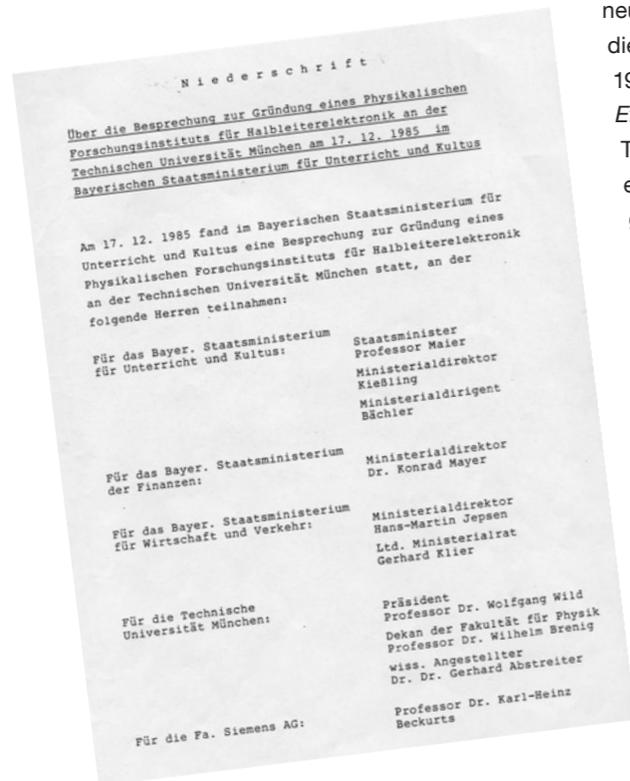
Das Walter Schottky Institut ist ein wissenschaftliches Zentralinstitut der Technischen Universität München (TUM), das zum Ziel hat, die Wechselwirkung zwischen grundlegenden physikalischen Untersuchungen und der Halbleiterelektronik zu verstärken. Die Idee zur Gründung solch eines interdisziplinären Instituts entstand Anfang bis Mitte der 80er Jahre. Forschung mit Halbleiterheterostrukturen wurde um diese Zeit sehr populär, da in maßgeschneiderten

Potentialtöpfen und sog. zweidimensionalen Elektronengasen eine Vielzahl neuer elektronischer und optischer Effekte auftraten. Am spektakulärsten war die Entdeckung des *Quantum Hall Effekts* durch Klaus von Klitzing im Jahr 1980 (Nobelpreis 1985) und dann 1982 des sog. *Fraktionierten Quantum Hall Effekts* durch Daniel Tsui, Horst Störmer und Arthur Gossard (Nobelpreis für Tsui, Störmer und Laughlin (Theorie) im Jahr 1998). Zur gleichen Zeit wurden eine Reihe neuer elektronischer und optischer Bauelemente vorgeschlagen und entwickelt. Beispiele hierfür sind der Potentialtopflaser (Henry, Dingle, Holonyak, Tsang und andere), resonante Tunnelioden (Esaki, Tsu, Chang und andere) und neuartige Feldeffekttransistoren (Abstreiter, Ploog, Mimura und andere). Die neuartigen Funktionalitäten dieser Bauelemente ermöglichten unterschiedlichste Anwendungen z.B. im Bereich der Kommunikationstechnologie (Satellitenempfänger, optische Nachrichtenübertragung, mobile Telefone). Dies wurde durch eine ausgezeichnete Beherrschung der Materialtechnologie erreicht, insbesondere die Entwicklung der Molekularstrahlepitaxie spielte hier eine wichtige Rolle. Diese modernen Materialtechnologien waren Basis für die Realisierung und Kontrolle von Schichtstrukturen mit atomarer Genauigkeit und wurden insbesondere auch in Industrielabors in den USA und in Japan zur Entwicklung neuartiger Bauelemente intensiv eingesetzt. In München war dieses Forschungsgebiet in einen Sonderforschungsbereich der Deutschen Forschungsgemeinschaft eingebettet (SFB 128, *Elementare Anregungen an Oberflächen*). Ein Bereich des SFBs widmete sich der Untersuchung von zweidimensionalen Elektronengasen an Halbleitergrenzflächen. Dieser Forschungsschwerpunkt war am Lehrstuhl von Fred Koch am Physik-Department der TUM konzentriert und die Projektleiter Anfang der 80er Jahre waren Fred Koch, Klaus von Klitzing und Gerhard Abstreiter. Um diese Zeit entwickelten sich auch engere Beziehungen zwischen den Physikgruppen der TUM und den Forschungslaboratorien der Siemens AG auf dem Gebiet mikrostrukturierter Bauelemente. Zusätzlich wurde ein gemeinsamer Forschungsschwerpunkt von Klaus von Klitzing, Gerhard Abstreiter und

leitergrenzflächen. Dieser Forschungsschwerpunkt war am Lehrstuhl von Fred Koch am Physik-Department der TUM konzentriert und die Projektleiter Anfang der 80er Jahre waren Fred Koch, Klaus von Klitzing und Gerhard Abstreiter. Um diese Zeit entwickelten sich auch engere Beziehungen zwischen den Physikgruppen der TUM und den Forschungslaboratorien der Siemens AG auf dem Gebiet mikrostrukturierter Bauelemente. Zusätzlich wurde ein gemeinsamer Forschungsschwerpunkt von Klaus von Klitzing, Gerhard Abstreiter und

Erich Gornik's Gruppe von der Universität Innsbruck, finanziert durch die Volkswagenstiftung, eingerichtet. Der Erfolg dieser Projekte war abhängig von der Verfügbarkeit qualitativ hochwertiger Halbleiter-Heterostrukturen. In Deutschland gab es in diesem Zeitraum nur wenige Labors, die solche Proben zur Verfügung stellen konnten, namentlich das Forschungslabor der Bundespost in Darmstadt mit Günter Weimann und das Max-Planck-Institut für Festkörperforschung in Stuttgart mit Klaus Ploog. Dies waren die einzigen zwei Laboratorien, die in der Lage waren, hochwertige GaAs basierende Heterostrukturen mit Molekularstrahlepitaxie herzustellen. Es bestand großer Bedarf an einem interdisziplinären Forschungsumfeld, das hochwertige Materialtechnologie für Halbleiterhetero- und Nanotechnologie mit grundlegenden physikalischen Untersuchungen, sowie der Entwicklung neuartiger Bauelemente vereinte. Im Februar 1985 verfasste Gerhard Abstreiter, nach einem Forschungsaufenthalt in Japan, ein Memorandum zur Gründung eines neuen Forschungsinstituts mit spezieller Fokussierung auf Halbleiter-Mikromaterialien und Entwicklung neuartiger Bauelemente. Dieser Vorschlag wurde mit dem damaligen Forschungschef der Siemens AG, Karl-Heinz Beckurts diskutiert, dessen Intention es war, die Kooperation zwischen Industrie und Universitäten, insbesondere mit der TUM zu stärken. Der Vorschlag für ein neues Forschungsinstitut stieß auf breiteres Interesse, als im September 1985 die Verleihung des Nobelpreises an Klaus von Klitzing bekanntgegeben wurde. Klaus von Klitzing hatte Anfang 1985 das Physik-Department der TUM verlassen, um einem Ruf an das Max-Planck-Institut für Festkörperforschung nach Stuttgart zu folgen. Fred Koch und Wilhelm Brenig, zu der Zeit Dekan des Physik-Departments, schlugen in entsprechenden Briefen im Oktober und November 1985 die Gründung eines Forschungsinstituts mit dem Fokus auf Halbleiterphysik und -elektronik vor. „Walter Schottky Institut“ wurde als möglicher Name von Karl-Heinz Beckurts bei einem Treffen am Physik-Department in Garching vorgeschlagen. Walter Schottky ist einer der bekanntesten deutschen Halbleiterphysiker der von 1927 bis zu seinem Tode im Jahr 1976, kurz vor seinem 90. Geburtstag, für Siemens tätig war. Seine Forschungstätigkeit war stets dadurch geprägt, dass er Grundlagenforschung mit möglichen Anwendungen kombinierte. Dies sollte auch die Philosophie des geplanten Instituts werden und durch Kombination von Materialtechnologie mit grundlegender physikalischer Forschung und Bauelemententwicklung verwirklicht werden. Die Idee eine solch interdisziplinäre Forschungseinrichtung zu realisieren wurde von Klaus von Klitzing und Wolfgang Wild, zu der Zeit Präsident der TUM und später bayerischer Staatsminister für Wissenschaft, Forschung und Kunst, befürwortet und mit Nachdruck unterstützt. Am 17. Dezember 1985 fand ein Treffen im Bayerischen Staatsministerium für Unterricht und Kultus mit dem damaligen Minister, Hans Maier statt, um die Randbedingungen für die Gründung eines Instituts für Halbleiterelektronik an der TUM in Zusammenarbeit

Ein Traum wird Wirklichkeit – vom Modell zur Realisierung des Walter Schottky Instituts im Jahr 1987



Protokoll der ersten Besprechung zur Gründung eines Forschungsinstituts für Halbleiterelektronik an der TUM



Eröffnungsfeier am 14. Juli 1988 mit Bundesminister Dr. H. Riesenhuber und dem Vorstandsvorsitzenden der Siemens AG Dr. K. Kaske

Geschichte und Forschungsschwerpunkte



Das Walter Schottky Institut bei Nacht, kurz nach der Eröffnung im Jahr 1988

mit der Siemens AG auszuloten. Nach einem zusätzlichen Treffen von Klaus von Klitzing mit dem damaligen Bayerischen Ministerpräsidenten Franz Josef Strauß und weiteren Mitgliedern des Kabinetts im Februar 1986 wurden die Ampeln zur Gründung dieses interdisziplinären Forschungsinstituts auf Grün gestellt. Es war das Jahr des hundertsten Geburtstags von Walter Schottky. Sofort wurde mit den Planungen für einen Forschungsneubau begonnen und bereits im Mai 1988 konnten die neuen Labors in Betrieb genommen werden. Die offizielle Einweihungsfeier fand am 14. Juli 1988 statt. Diese außergewöhnlich kurze Zeit für Planung, Bau und Fertigstellung eines modernen Institutsgebäudes wurde durch eine exzellente Zusammenarbeit zwischen der Siemens AG, den bayerischen Ministerien und der TUM ermöglicht. Die Interessen der Universität, der Industrie und der Politik haben sich hier in einem seltenen aber glücklichem Umstand vereint. Die Errichtung des WSI basierte auf einer offiziellen TUM-Siemens Kooperation, der *Sonderforschungseinheit mikrostrukturierte Bauelemente*. Wie bereits im Vorwort betont wurde, war dies das erste Beispiel an der TUM, wo ein Industrieunternehmen die Verantwortung für den Bau eines Laborgebäudes übernahm. Viele Persönlichkeiten waren besonders engagiert und hilfreich in Planung und Umsetzung dieses ambitionierten Vorhabens. Der großartige Einsatz von Karl-Heinz Beckurts war wesentlich für das gesamte Projekt. Bereits in der Planungsphase wurde er Opfer eines grausamen und unfassbaren Terroranschlags durch die RAF, wobei er und sein Chauffeur ums Leben kamen. Es ist sehr traurig und bedauerlich, dass er bei der offiziellen Einweihungsfeier des Institutes nicht mehr unter uns sein konnte.

Auf einer Fläche von ca 2400 m² sind im Gebäude des WSI modernste Halbleiterlaboratorien und Büros untergebracht, wobei ein 250 m² großer Reinraum das Kernstück des Instituts bildet. Die Kosten für das Gebäude in Höhe von 16,4 Millionen DM wurden ursprünglich von Siemens übernommen. Die TUM kaufte das Gebäude im Jahr 1992. Der bayerische Staat hat das Institut großzügig mit Erstausrüstung in Höhe von 15 Millionen DM unterstützt und drei neue Lehrstühle mit insgesamt 23 neuen Stellen geschaffen. Ein Lehrstuhl wurde in die Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik aufgenommen, zwei in das Physik-Department. 1990 hat das Institut für Theoretische Physik das WSI zusätzlich unterstützt und einen

Lehrstuhl für Theoretische Halbleiterphysik besetzt. Folgende Forschergruppen wurden am WSI installiert:

- Halbleitertechnologie: Günter Weimann (von 1988 bis 1995), Markus-Christian Amann (seit 1997)
- Experimentelle Halbleiterphysik I: Gerhard Abstreiter (seit 1987)
- Experimentelle Halbleiterphysik II: Erich Gornik (von 1988 bis 1992), Martin Stutzmann (seit 1993)
- Theoretische Halbleiterphysik: Peter Vogl (seit 1990)

Die wichtigsten Forschungsthemen sind:

- Herstellung und Charakterisierung neuer Halbleitermaterialien, Materialkombinationen und Funktionalisierung von Oberflächen
- Entwicklung neuer Methoden zur Herstellung und Charakterisierung von Nanostrukturen
- Grundlagenphysikalische Untersuchungen von niedrigdimensionalen Systemen mit Schwerpunkt auf elektronischen und optischen Eigenschaften
- Entwicklung neuer Halbleiterbauelemente mit Anwendungen in Bereichen wie Höchstfrequenzelektronik, Optoelektronik sowie bio-/chemische Sensorik
- Theorie und Simulation von modernen Halbleitermaterialien und Bauelementen

In der Anfangszeit konzentrierten sich die Projekte auf Si, GaAs und InP basierende Systeme, wobei die Heteroepitaxie mit atomarer Genauigkeit einen Schwerpunkt darstellte. Entwicklung schneller und rauscharmer Heterofeldeffekt-Transistoren, Halbleiter-Laserdioden im Wellenlängenbereich von 980 bis 1,55 μm , sowie Grundlagen für Si/SiGe basierende Bauelemente waren die wichtigsten ersten anwendungsorientierten Projekte. Grundlagenforschung beinhaltete optische Spektroskopie von Quantendrähten und Quantenpunkten, insbesondere mit hoher Ortsauflösung, elektronischen Transport und resonantes Tunneln in niedrigdimensionalen Systemen, sowie die Demonstration neuartiger Bauelemente, die auf Quanteneffekten

Geschichte und Forschungsschwerpunkte

basierten. In der jüngeren Vergangenheit wurde die Materialbasis auf GaN und verwandte Legierungen, auf Diamant und auf Antimonide ausgeweitet, um neue Anwendungsfelder zu erschließen. Ein neuer Schwerpunkt der Grundlagenforschung ist die Quantenkontrolle von Ladungen, Spins und Photonen für zukünftige Quanten-Informationstechnologie. Zusätzlich wurden vor einigen Jahren biophysikalische Themen mit eingeschlossen, insbesondere die Kombination von biologischen Systemen mit Halbleitern. Dieses neue Forschungsgebiet eröffnet neuartige biomedizinische Anwendungen, z.B. in der medizinischen Diagnose und Überwachung.

Das WSI wurde international sehr schnell bekannt als eines der führenden Institute zur Herstellung und Charakterisierung von reinsten Halbleiterhetero- und -nanostrukturen. Die hervorragende Materialtechnologie war die Basis für viele nationale und internationale Kooperationen (siehe Kapitel 14). Das WSI spielte eine Schlüsselrolle in der Einrichtung von Sonderforschungsbereichen der DFG sowie nationalen Verbundprojekten des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF). Weitere Forschungsmittel wurden von der Bayerischen Forschungstiftung, der Volkswagenstiftung, der Europäischen Union und der Industrie eingeworben. In den letzten Jahren lag die Gesamtsumme der eingeworbenen sog. Drittmittel für Forschung immer über 3 Millionen Euro pro Jahr. Die vielfältigen nationalen und internationalen Kooperationen resultierten in vielen gemeinsamen Veröffentlichungen in hochrangigen Zeitschriften. Die Gesamtzahl der Veröffentlichungen mit Beiträgen des WSI beträgt ca 1600, die nach ISI Web of Science bisher ca 27000 mal zitiert wurden (zur Zeit ca 2500 Zitierungen pro Jahr). Am WSI wurden bisher ca 350 Diplomarbeiten betreut. In der gleichen Zeit haben ca 130 Doktoranden ihre Arbeit abgeschlossen, die alle sehr schnell interessante Anstellungen, überwiegend in der *High-Tech* Industrie (70 %) fanden. 20 % der Absolventen blieben an Universitäten oder Forschungsinstituten und 10 % übernahmen Aufgaben in anderen Bereichen, wie Patentwesen oder bei Beraterfirmen.



Walter Schottky Institut im Winter

Die Anzahl der Forscher am Walter Schottky Institut hat kontinuierlich zugenommen. Heute arbeiten im Institut die Arbeitsgruppen von Gerhard Abstreiter, Markus-Christian Amann, Martin Brandt, Anna Fontcuberta i Morral, Jonathan J. Finley, Alexander Holleitner, Martin Stutzmann und Peter Vogl mit einer Gesamtzahl von ca 140 Mitarbeitern einschließlich aller wissenschaftlichen und technischen Mitarbeiter, Sekretärinnen, Doktoranden und Diplomanden sowie Gastwissenschaftler. Davon werden weniger als 30 Stellen durch die TUM bereitgestellt, während alle Doktoranden, Gastwissenschaftler und einige Nachwuchsgruppenleiter durch Drittmittel finanziert werden. Die Labor- und Büroflächen des Instituts sind bei weitem nicht mehr ausreichend, um den Mitarbeitern vernünftige Arbeitsbedingungen bieten zu können; das Institut bedarf nach nunmehr 20 Jahren dringendst einer Erweiterung. Ein neues Zentrum für Nanotechnologie und Nanomaterialien ist derzeit in Planung und soll bis 2010 in direkter Nachbarschaft zum WSI entstehen. Neben gemeinsam betriebenen Apparaturen für



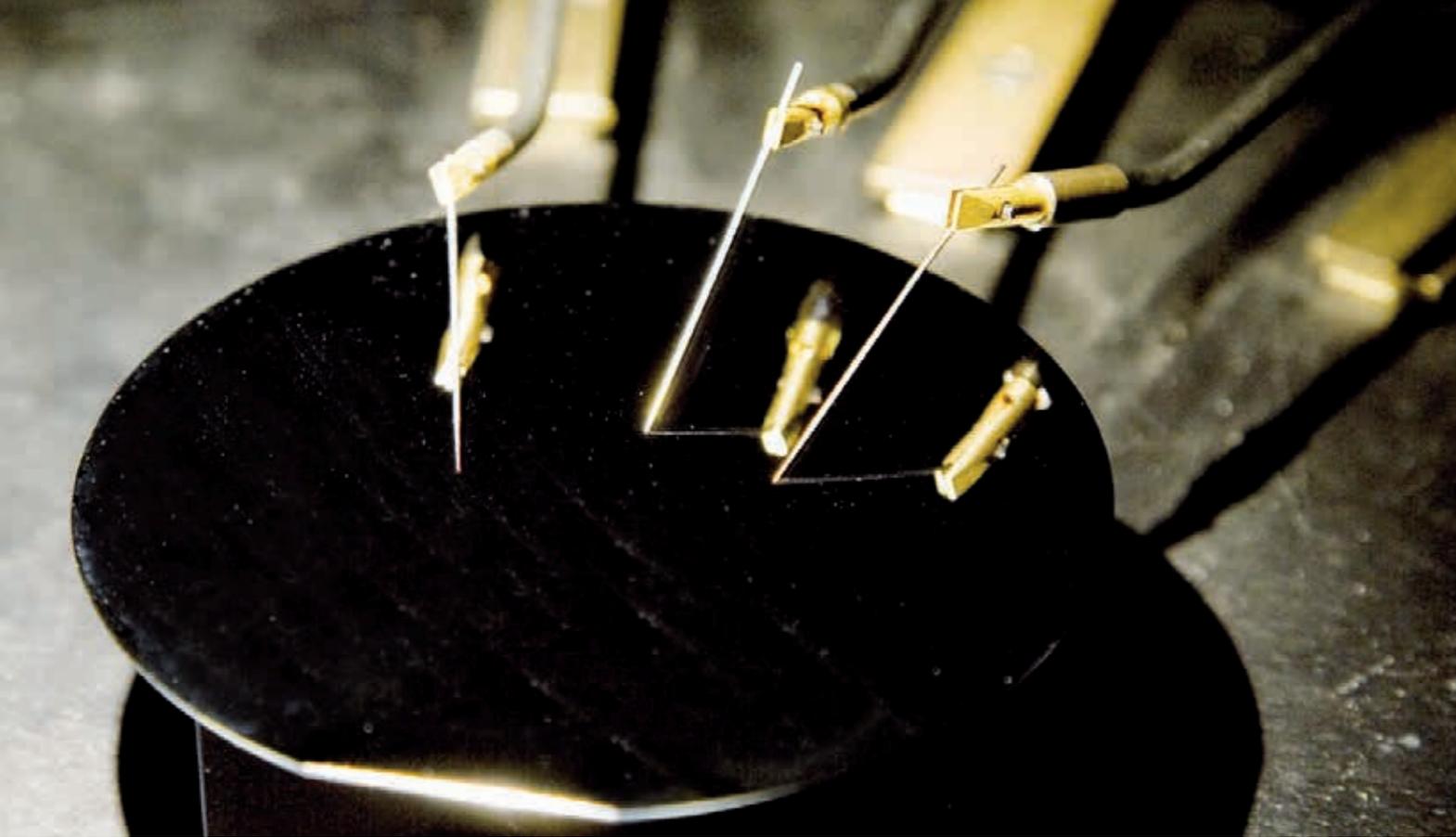
Die Mitarbeiter des Walter Schottky Institutes im Frühjahr 2008

modernste Nanotechnologie soll hier insbesondere auch das neue Gebiet der Bionanotechnologie gestärkt werden.

Zusätzlich zu den intensiven Forschungsaktivitäten beteiligen sich selbstverständlich alle Gruppen an der Lehre in den entsprechenden Fakultäten. Neben den allgemeinen Lehrverpflichtungen wird besonderer Wert auf eine zeitgemäße Ausbildung der Diplomanden und Doktoranden auf dem Gebiet der Physik von niedrigdimensionalen Systemen und der Nanotechnologie gelegt.

Halbleiter – Eine Einführung





Eine moderne Version des Experimentes von Ferdinand Braun

Als der Gymnasiallehrer Ferdinand Braun am 14. November 1876 vor der Naturforschenden Gesellschaft zu Leipzig einen Vortrag mit dem Titel „Versuche über Abweichungen vom Ohmschen Gesetz in metallisch leitenden Körpern“ hielt, ahnten wohl weder der Vortragende noch seine interessierten, aber auch skeptischen Zuhörer, dass sie gerade die Geburtsstunde der Halbleiterphysik miterlebten. Was Ferdinand Braun mit akribischen Untersuchungen entdeckt hatte, sah auch auf den ersten Blick wenig aufregend aus: wenn man auf einen Kristall zwei metallische Kontakte aufbrachte und eine elektrische Spannung anlegte, konnte man zwei grundsätzlich verschiedene Verhaltensweisen beobachten. Floss kein Strom, so handelte es sich bei dem Kristall um einen Isolator, und ein solcher war für weitere elektrische Untersuchungen offensichtlich ungeeignet. Floss aber ein Strom, so handelte es sich offenbar um einen metallischen elektrischen Leiter, der dem Ohmschen Gesetz gehorchte. Verdoppelte man die angelegte Spannung, so verdoppelte sich auch der Strom. Polte man die Spannung an den beiden Kontakten um, so floss ein gleich großer Strom in die andere Richtung. So war es jedenfalls bis dahin immer gewesen...

Die Abweichungen, von denen Ferdinand Braun berichtete, waren in der Tat sehr merkwürdig. Braun hatte statt mit großflächigen Metallkontakten Experimente mit feinen Metallspitzen durchgeführt. Bei manchen Kristallen beobachtete er so, dass Strom zwar wie erwartet in einer Richtung fließen konnte, bei der Umpolung der angelegten Spannung aber versiegte der

Stromfluss und der Kristall verwandelte sich in einen Isolator. Ebenfalls merkwürdig war das Verhalten der Stromstärke als Funktion der angelegten Spannung. Bei einer Erhöhung der Spannung stieg der Strom wesentlich stärker an, als es das Ohmsche Gesetz erlaubte.

Was Ferdinand Braun entdeckt hatte, war das erste Halbleiter-Bauelement: eine Gleichrichter-Diode, die Wechselstrom in Gleichstrom umwandeln konnte und viele Jahre später als Spitzendiode auch eine gewisse Anwendung in der Radio- und Radartechnik fand. Den Grund für das eigentümliche Verhalten seiner Kristalle fand Ferdinand Braun, der 1909 den Nobelpreis für Physik erhielt, allerdings nie heraus. Die wissenschaftliche Erklärung folgte erst viele Jahre später und blieb Walter Schottky vorbehalten, der 1939 eine erste Theorie für die elektronischen Eigenschaften der Halbleiter/Metall-Grenzflächen aufstellte. Ihm zu Ehren werden solche Bauelemente auch Schottky-Dioden genannt. Ferdinand Braun hingegen ist uns heute hauptsächlich als Erfinder der Braun'schen Röhre bekannt. Und in der Tat verdrängte Anfang des letzten Jahrhunderts die Erfindung der Vakuum-Röhren die Festkörper fast vollständig aus dem Gebiet der Elektronik. Erst mit der Erfindung des Transistors durch Bardeen, Brattain und Shockley im Dezember 1947 begann der Siegeszug der Halbleiter-Elektronik, ohne die unsere moderne Welt gar nicht mehr vorstellbar ist.

Aber was sind nun eigentlich Halbleiter, was unterscheidet sie von metallischen Leitern einerseits und Isolatoren andererseits, und was macht sie so interessant für viele Anwendungen? Die Antwort auf diese Fragen und die Bereitstellung geeigneter Halbleiter-Materialien und –Bauelemente ist die zentrale Aufgabe der Halbleiterphysik und der Halbleitertechnologie. Es bedarf vieler Jahre intensiven Studiums, um sich hier die notwendigen Grundlagen zu erarbeiten. Wir wollen aber trotzdem versuchen, anhand eines einfachen Analogons die wesentlichen Eigenschaften von Halbleitern kurz zu erläutern.

In einem regelmäßigen periodischen Kristallgitter können sich Elektronen als Träger des elektrischen Stroms nicht beliebig bewegen, sondern müssen sich an bestimmte Regeln halten, die durch die Quantenmechanik vorgegeben werden. Eine Konsequenz davon ist, dass die Elektronen sich immer in sogenannten „Energiebändern“ aufhalten müssen, die durch mehr oder weniger große „Energilücken“ voneinander getrennt sind. Diese Situation ist in etwa zu vergleichen mit einem Gebäude bestehend aus zwei Stockwerken: dem Erdgeschoss, in der Sprache der Festkörperphysiker „Valenzband“ genannt, und dem ersten Stock, dem „Leitungsband“. Die Fußböden der beiden Stockwerke bestehen aus regelmäßig angeordneten quadratischen Kacheln, entsprechend dem regelmäßigen Atomgitter im Halbleiter-Kristall. Die Bewegung von Elektronen im Halbleiter entspricht dann der Bewegung der Bewohner in unserem Gebäude, deren Aufgabe es ist, irgendeine Fracht von einer Seite des Gebäudes zur anderen Seite zu transportieren. Auch die Bewohner unseres Hauses müssen sich an eine

Halbleiter – Eine Einführung

wichtige Regel halten: zu keinem Zeitpunkt darf sich auf einer bestimmten Kachel mehr als ein Bewohner aufhalten! Auch die Elektronen im Festkörper unterliegen einer ähnlichen Regel, nämlich dem quantenmechanischen „Ausschließungsprinzip“ des berühmten Physikers Wolfgang Pauli.



Besetzung des Valenzbandes (Erdgeschoss) und des Leitungsbandes (erster Stock) durch Elektronen (Bewohner) in einem undotierten Halbleiter

Nun da der Bauplan unseres Gebäudes und auch die Regeln für die Bewohner klar sind, können wir damit beginnen, das Gebäude mit Bewohnern zu bevölkern. Zunächst können alle Bewohner im Erdgeschoss bleiben und dort ungestört ihre Fracht transportieren. Der Frachtstrom steigt also zunächst mit der Zahl der Bewohner an und erreicht ein Maximum, wenn etwa die Hälfte der Kacheln des Erdgeschosses im Mittel mit einem Bewohner besetzt ist. Kommen noch mehr Bewohner in das Erdgeschoss, so fangen sie an, sich zunehmend bei ihrem Weg durch das Gebäude zu behindern, weil einfach nicht mehr für jeden Bewohner genügend freie Kacheln zur Verfügung stehen. Schließlich kommt der erwünschte Frachtstrom sogar vollständig zum Erliegen: wenn alle Kacheln besetzt sind, kann

sich kein einziger Bewohner mehr durch das Gebäude bewegen!

Neue Bewohner müssen jetzt in das erste Stockwerk einziehen und dort ihre Fracht transportieren. Dadurch steigt aber der Frachtstrom durch das Gebäude zunächst wieder an, erreicht ein Maximum bei halb gefülltem ersten Stock und versiegt wieder, wenn auch der erste Stock vollständig mit Bewohnern gefüllt ist.

Ähnlich wie den Bewohnern unseres Hauses ergeht es den Elektronen im Festkörperkristall, und wir können nun leicht verstehen, warum es in der Natur elektrische Leiter und Isolatoren gibt: Festkörper, bei denen die Energiebänder nur halb mit Elektronen aufgefüllt sind, können den elektrischen Strom sehr gut leiten, da sich die Elektronen relativ ungestört durch das Kristallgitter bewegen können. Sind die Energiebänder hingegen voll besetzt oder komplett leer, kann kein elektrischer Strom durch den Festkörper fließen und wir haben den Fall eines elektrischen Isolators. Welche Situation nun für einen bestimmten Festkörper gilt, hängt davon ab, wie viele Elektronen pro Atom für die Bevölkerung des Valenz- und des Leitungsbandes zur Verfügung stehen. So sind fast alle Metalle sehr gute elektrische Leiter mit halb gefüllten Energiebändern, während Metalloxide häufig gute Isolatoren sind.

Wie kann man aber nun in unserem Bild die Existenz von Halbleitern erklären? Wie der Name schon ausdrückt, sind dies Festkörper, die den elektrischen Strom zwar besser leiten als ein Isolator, aber nicht so gut wie ein metallischer Leiter. Offenbar muss es sich bei solchen Materialien um Festkörper handeln, bei denen aus irgendwelchen Gründen entweder eine geringe Zahl der Kacheln im Erdgeschoss frei bleiben oder eine geringe Anzahl von zusätz-

lichen Bewohnern in den ersten Stock einziehen, oder sogar Beides. In der Praxis kann man eine solche Konstellation auf drei unterschiedlichen Wegen erreichen, die für die Halbleiterphysik und -technologie alle von größter Bedeutung sind und die wir daher in unserem Gebäudemodell kurz besprechen wollen.

Ausgangspunkt ist dabei jeweils die bereits beschriebene Situation eines Isolators, also eines Gebäudes mit gerade so vielen Bewohnern, dass alle Kacheln im Erdgeschoss besetzt und alle Kacheln im ersten Stock unbesetzt sind. Es findet also kein Frachttransport durch das Gebäude statt. Um diese für elektrische Bauelemente unbefriedigende Situation zu beseitigen, haben die Halbleiterphysiker die „Dotierung“ erfunden. Gemeint ist damit der gezielte Einbau von Fremdatomen zur Erzeugung einer genau vorausberechenbaren und einstellbaren elektrischen Leitfähigkeit als Grundlage für fast alle modernen Halbleiter-Bauelemente.

In unserem Halbleiter-Modellgebäude entspricht dies dem Einbringen von speziellen Kacheln (d.h. Fremdatomen) mit folgenden merkwürdigen Eigenschaften. Zunächst kann man eine Kachel im Erdgeschoss durch eine „Akzeptor-Kachel“ austauschen. Jede Akzeptor-Kachel hat die Eigenschaft, genau einen Bewohner des Erdgeschosses zu verschlucken. Danach verhält sich eine Akzeptor-Kachel wieder wie eine normale Kachel. Pro eingebauter Akzeptor-Kachel entsteht also ein „Loch“ in der Besetzung des Erdgeschosses, das es den übrigen Bewohnern nun wieder erlaubt sich zu bewegen. Dabei bewegt sich das Loch ebenfalls, und zwar in entgegengesetzter Richtung zum Strom der Bewohner. Analog erzeugt ein Akzeptor-Dotieratom in einem Halbleiter ein Loch in der Besetzung des Valenzbandes mit Elektronen, welches sich wie ein positiv geladenes „Fehlelektron“ verhält. Man nennt diese Art der Dotierung daher p-Typ Dotierung (p wie positiv). Als zweite Möglichkeit kann man aber auch „Donator-Kacheln“ im ersten Stock einsetzen. Jede Donator-Kachel bringt einen zusätzlichen Bewohner mit in das Gebäude, der wegen des vollbesetzten Erdgeschosses notgedrungen einen Platz im ersten Stock belegen muss. Nachdem die Donator-Kachel diesen zusätzlichen Bewohner an den ersten Stock abgegeben hat, verhält sie sich ebenfalls wie jede andere normale Kachel. Die zusätzlichen Bewohner des ersten Stocks können sich dort frei bewegen und zum Frachtstrom beitragen. Analog werden durch den Einbau geeigneter Donator-Dotieratome in einen Isolator zusätzliche Elektronen im Leitungsband erzeugt, die ganz normal zur elektrischen Leitfähigkeit beitragen (n-Typ Dotierung durch negativ geladene Elektronen).



P-Typ Halbleiter mit Akzeptor-Atomen



N-Typ Halbleiter mit Donatoren

Halbleiter – Eine Einführung

Als Fazit bleibt festzuhalten, dass erst durch die Möglichkeit der gezielten Dotierung sich Halbleiter wirklich grundsätzlich von Leitern oder Isolatoren als eine eigene dritte Materialklasse absetzen: während Leiter den elektrischen Strom immer und überall gut leiten und Isolatoren den elektrischen Stromfluss immer und überall verlässlich unterbinden sollen, erlauben Halbleiter durch die Dotierung eine gezielte, örtlich begrenzte und von außen beeinflussbare Einstellung der elektrischen Leitfähigkeit. Dies ermöglicht erst grundlegende elektrische Operationen wie die Gleichrichtung, Verstärkung oder das Schalten elektrischer Signale.

Man kann aber bei einem Halbleiter auch ohne Dotierung Löcher im Valenzband und zusätzliche Elektronen im Leitungsband erzeugen, und zwar durch Zufuhr von Energie von außen in Form von Licht oder Wärme. Wie wir alle aus eigener Erfahrung wissen, kostet es Energie, um in einem Gebäude aus dem Erdgeschoss in höhere Stockwerke hinaufzusteigen. Genau so geht es den Elektronen im Halbleiter: Elektronen im Leitungsband (erster Stock) haben eine höhere Energie als Elektronen im Valenzband (Erdgeschoss). Den energetischen Unterschied kann man aus der bereits erwähnten Bandlücke des Halbleiters ablesen. Da auch Elektronen zur Faulheit neigen, bleiben sie lieber im Erdgeschoss, als den mühsamen Weg hinauf in den ersten Stock von sich aus auf sich zu nehmen. Hierzu müssen sie erst durch

äußere Einflüsse motiviert werden. Abhängig von der Temperatur kann dies zum Einen durch die Wärmebewegung der Atome unseres Kristallgitters geschehen. Atome sind Kaltblüter: bei tiefen Temperaturen sitzen sie träge auf ihrem Gitterplatz, bei steigender Temperatur aber wackeln sie immer mehr auf ihrem Gitterplatz hin und her. Dabei stoßen sie auch die Elektronen an. Um im Bild unseres Halbleiter-Gebäudes zu bleiben, entspricht die Wärmebewegung der Atome einer Treppe zwischen Erdgeschoss und erstem Stock, auf dem die Bewohner Schritt für Schritt (Stoß um Stoß) nach oben gelangen können. Je größer die Bandlücke eines Halbleiters, um so länger ist diese Treppe und um so weniger Elektronen schaffen es bei einer bestimmten Temperatur in das Leitungsband. Wie in einem gut geplanten Gebäude gibt es aber noch einen eleganteren Weg, um in höhere

Stockwerke zu gelangen, nämlich einen Aufzug. Die Rolle des Aufzugs übernehmen bei Halbleitern die Elementarteilchen des Lichtes, die sogenannten Photonen. Trifft ein solcher elementarer Lichtblitz auf einen Halbleiter, so kann er ein Elektron aus dem Leitungsband schnell und mühelos vom Valenzband in das Leitungsband befördern, genauso wie in einem Gebäude faule Bewohner lieber den Aufzug nehmen, wenn es denn einen gibt. Je stärker die Beleuchtung mit Photonen, um so häufiger fährt dieser Photonen-Aufzug und befördert Elektronen aus dem Valenzband in das Leitungsband. Aber auch der umgekehrte Weg ist möglich. Elektronen im Leitungsband können auch wieder in das Valenzband zurückkehren, wenn es dort frei Plätze (Löcher) gibt. Diesen Vorgang nennt der Halbleiter-Physiker „Rekombination“. Die Elektronen können dazu entweder die Treppe nehmen und sich auf dem



Undotierter Halbleiter mit thermisch angeregten Ladungsträgern



Halbleiter und Licht

Weg nach unten durch Stöße an die Atome bei diesen für die vorangegangene unfreundliche Behandlung auf dem Weg nach oben revanchieren. Oder aber die Elektronen nehmen den Aufzug nach unten. Jedesmal, wenn sich dann die Aufzugstür im Valenzband öffnet und ein Elektron des Leitungsbandes in ein freies Loch des Valenzbandes fällt, verlässt ein elementarer Lichtblitz (Photon) den Halbleiter. Die Energie dieses Photons entspricht dabei der Bandlücke des Halbleiters. Halbleiter mit kleiner Bandlücke können also rote Photonen aussenden, während Halbleiter mit großer Bandlücke blaue Photonen abgeben.

Die eben beschriebenen Prozesse in unserem Halbleiter-Haus bilden die Grundlage für ein weiteres wichtiges Anwendungsgebiet der Halbleiter-Technologie, der Optoelektronik. Die beiden grundlegenden Bauelemente dabei sind die Solarzellen und die Leuchtdioden. Bei einer Solarzelle trifft Sonnenlicht von außen auf einen geeigneten Halbleiter und befördert mit dem Photonen-Aufzug Elektronen aus dem Valenzband in das Leitungsband. Dadurch kann dann aus dem Halbleiter der gewonnene Solarstrom fließen. Bei einer Leuchtdiode werden umgekehrt von außen durch geeignete Kontakte auf der einen Seite des Halbleiter-Hauses Elektronen in das Leitungsband gepresst, während auf der anderen Seite Elektronen aus

Halbleiter – Eine Einführung

dem Valenzband gesaugt und dadurch Löcher erzeugt werden. Treffen nun Elektronen und Löcher im Halbleiter aufeinander, so können die Elektronen den Photonen-Aufzug nach unten nehmen und Licht aussenden.

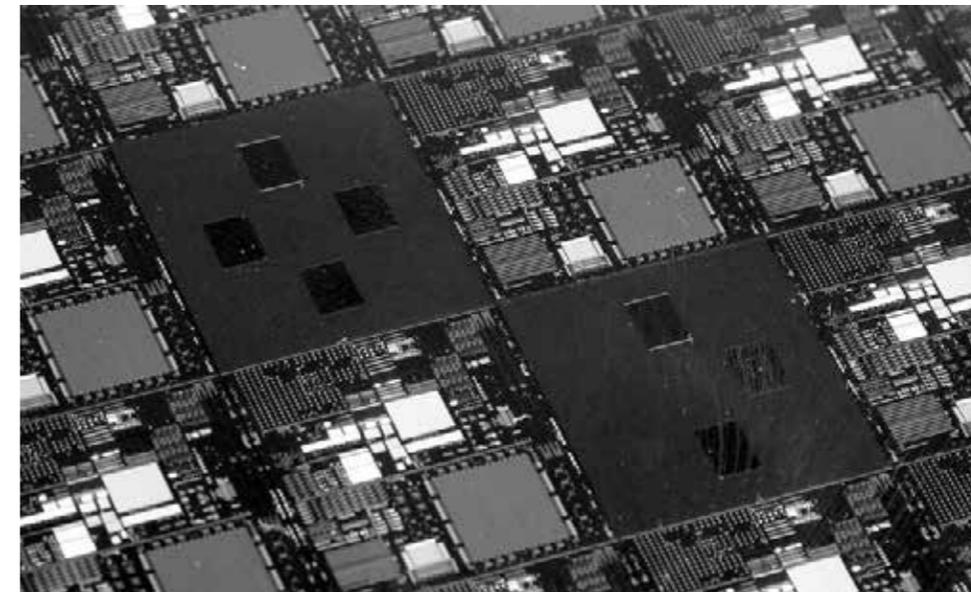
Diese kurze Einführung in die elementaren Eigenschaften und Prozesse eines Halbleiters sollte einen Eindruck davon vermitteln, warum Halbleiter im Gegensatz zu Metallen oder Isolatoren für die Elektronik so interessant sind. Charakteristisch für Halbleiter ist die Möglichkeit, die elektrische Leitfähigkeit durch Dotierung gezielt einzustellen und so maßgeschneiderte Bauelemente wie Dioden oder Transistoren herzustellen. Außerdem haben wir gesehen, dass durch die Existenz einer Bandlücke zwischen Valenz- und Leitungsband Halbleiter ideal für das Einfangen oder das Aussenden von Licht geeignet sind. Diese Flexibilität und Vielfalt haben aber auch ihren Preis. Da Fremdatome schon in geringen Mengen die Leitfähigkeit von Halbleitern beeinflussen können, muss umgekehrt bei der Herstellung von Halbleitern auf höchste Sauberkeit geachtet werden. Und um Licht bei unterschiedlichen Wellenlängen effizient einzufangen oder auszusenden, müssen neue Halbleitermaterialien mit immer komplexerer chemischer Zusammensetzung erforscht, synthetisiert und optimiert werden. Hiervon wird im nächsten Kapitel ausführlicher die Rede sein.

Aber der Einsatz lohnt sich! Ob in der Computertechnologie, der industriellen Prozesssteuerung, der Energietechnik, der Nachrichtenübermittlung, der Unterhaltungselektronik, der Sensorik und medizinischen Diagnostik, der Beleuchtungstechnik, oder in Flugzeugen, Automobilen, Haushaltsgeräten, Telefonen und Uhren: überall sind heute Halbleiter-Bauelemente

enthalten und inzwischen unverzichtbar geworden. Allein der direkte Umsatz mit Halbleiter-Bauelementen beträgt heute etwa 300 Milliarden Euro pro Jahr. Die wirkliche wirtschaftliche Bedeutung von Halbleitern als Schlüsseltechnologie für viele andere Wirtschaftsbereiche ist aber noch um ein Vielfaches höher. Auch in Zukunft werden Halbleiter unser Leben begleiten und hoffentlich positiv verändern.

Sichtbarstes Beispiel im wahrsten Sinne des Wortes sind dabei die großen Fortschritte auf dem Gebiet der Beleuchtungselektronik. Hier beginnt gerade die Ablösung der herkömmlichen Beleuchtungstechnik auf der Basis von Vakuumröhren durch hocheffiziente Leuchtdioden, ähnlich wie vor mehr als 50 Jahren die Einführung des Transistors zur Ablösung der Vakuumröhren in der analogen und digitalen Informationsverarbeitung geführt hat. Die aktuellen Fortschritte bei Prozessoren oder in der Nachrichtentechnik erlebt jeder von uns selbst hautnah mit. Auch zu einer umweltverträglichen Erzeugung von Energie tragen Halbleiter immer mehr bei. So entspricht das geschätzte weltweite Produktionsvolumen für Solarzellen ab 2010 einer jährlich installierten Leistung von etwa 20 Gigawatt, in etwa die Leistung von 20 Kernkraftwerken.

In den weiteren Kapiteln dieser Broschüre finden Sie mehr Informationen zu vielen Gebieten, die derzeit im Brennpunkt der Halbleiterphysik und -Technologie stehen und die am Walter Schottky Institut der Technischen Universität München aktiv erforscht werden. Viel Spaß dabei!



Halbleiter-Chip



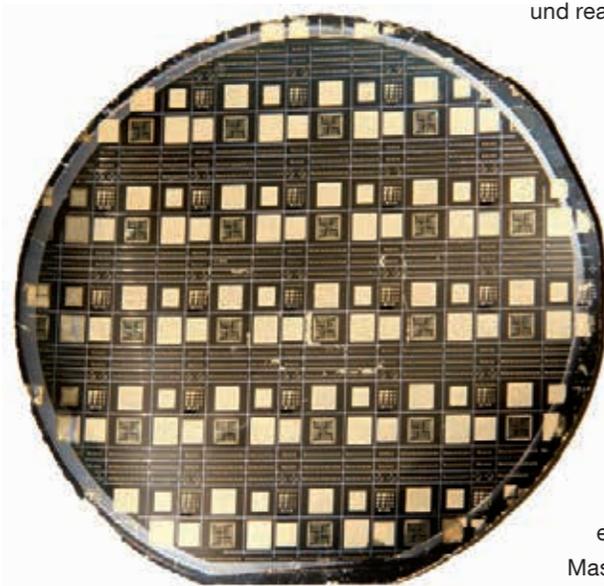
Materialforschung – Die Basis

Quarzglasreaktor einer MOVPE-Anlage

Materialforschung – Die Basis

Steinzeit, Bronzezeit, Eisenzeit ... und in den siebziger Jahren des vorigen Jahrhunderts begann man vom Siliziumzeitalter zu sprechen. Es ist kein Zufall, dass ganze Epochen nach Materialien benannt wurden, denn die Beherrschung neuer Werkstoffe und Techniken hat häufig auch das tägliche Leben bestimmt. Die jüngste große technische Umwälzung, der Aufbau der elektronischen Informationsverarbeitung und der mobilen Kommunikationsnetze, hat große Auswirkungen auf unsere Gesellschaft und jeder ist davon betroffen und nimmt daran teil. Voraussetzung für diese technischen Entwicklungen waren die Fortschritte in der Mikroelektronik, die untrennbar eben mit dem Element *Silizium* verbunden sind. Aber heutzutage ist es nicht mehr nur das Silizium alleine. Die Materialforschung auf dem Gebiet der Halbleiter hat in den letzten 40 Jahren eine solche Vielzahl von speziellen Verbindungen hervorgebracht, dass man sich für eine gewünschte Anwendung das am besten geeignete Material aussuchen kann. Damit öffnen neue Materialien den Weg zur Entwicklung ganz neuer Produkte. Doch dies ist ein Wechselspiel, denn gleichzeitig verlangen umgekehrt wachsende Anforderungen oder völlig neuartige Konzepte auch nach ständigen Fortschritten auf dem Gebiet der Werkstoffe. Das Ziel einer möglichst effizienten Lichterzeugung mit Leuchtdioden für Beleuchtungszwecke, was auch dem Schutz der Umwelt dienen soll, ist ein entsprechendes Beispiel. Dem gegenüber steht die Idee einer *Quantenkryptografie*, bei der durch die Aussendung von nur noch einzelnen Lichtteilchen eine inhärent sichere Übertragung von Daten erreicht werden kann. Als Lichtquellen sollen dabei *Nano-Strukturen* zum Einsatz kommen, bei denen die Eigenschaften der Materialien auf atomarer Skala maßgeschneidert werden. Vor diesem Hintergrund ist es verständlich, dass die Materialforschung einen Schwerpunkt des Walter Schottky Institutes bildet, auf deren Basis dann neue Bauelemente entwickelt und realisiert werden.

Prozessierter Wafer mit verschiedenen oberflächenemittierenden Lasern und Laser-Arrays



Silizium

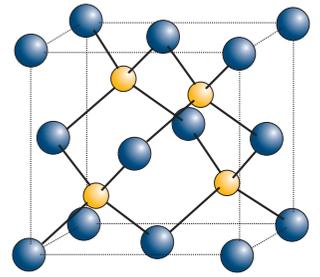
Silizium ist heute der mit Abstand am häufigsten eingesetzte Halbleiter und sicherlich auch der Bekannteste. Aber die speziellen Eigenschaften von Halbleitern wurden zunächst in einem Bauelement aus einem anderen Material ausgenutzt. Germanium war der Ausgangsstoff, an dem 1947 John Bardeen, Walter Brattain und William B. Shockley die Funktionsweise eines Bipolartransistors demonstrierten. Doch nachdem 1954 der erste produzierbare Silizium-Transistor in den Labors der Firma Texas Instruments gefertigt worden war, begann die stürmische Entwicklung des Siliziums. Die Gründe dafür liegen in den Eigenschaften der Elemente selbst. Silizium ist dem Germanium in einer Reihe von Eigenschaften überlegen, die besonders vorteilhaft für die Massenfertigung von elektronischen Schaltkreisen sind. Verglichen mit anderen Halbleitern ist es hart, so dass die Wafer auch bei hundert Fertigungsschritten nicht einfach zerbrechen. Außerdem verfügt es über eine gute Wärmeleitfähigkeit, was bei den

heutigen Packungsdichten der Elemente auf einem Chip ein wesentlicher Gesichtspunkt ist. Nicht umsonst werden die Prozessoren in Computern mit Ventilatoren zur Kühlung ausgestattet, denn die umgesetzte elektrische Leitung muss abgeführt werden, da die Chips ansonsten durch Überhitzung zerstört würden. Darüber hinaus ist Silizium als zweithäufigstes Element der Erdkruste auch vergleichsweise preisgünstig.

Ein ganz entscheidender Aspekt, vielleicht wichtiger als alle bisher genannten, ist aber die Eigenschaft des Siliziums ein hochwertiges natürliches Oxid zu bilden. Setzt man Silizium bei ca. 1.000 °C einer sauerstoffhaltigen Atmosphäre aus, so bildet sich an der Oberfläche SiO_2 , was eigentlich nichts anderes als Quarzglas ist. Diese Schicht wächst immer weiter, je länger der Prozess der Oxidation dauert. Die Dicke einer solchen Schicht ist damit sehr genau kontrollierbar. Im Gegensatz zu Silizium selbst ist SiO_2 ein perfekter Isolator. Es wird in den meisten Halbleiterbauelementen eingesetzt, um stromführende Leitungen und die verschiedenen Bestandteile der Chips voneinander zu isolieren. Alles in allem bringt Silizium alle Eigenschaften mit, um elektronische Bauelemente mit extrem hoher Präzision und Zuverlässigkeit in großen Stückzahlen herzustellen.

SiGe – Die Rückkehr eines alten Bekannten

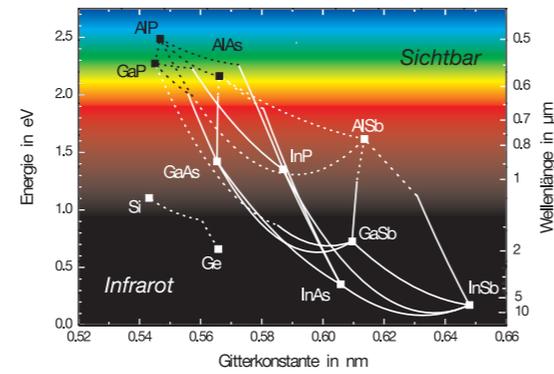
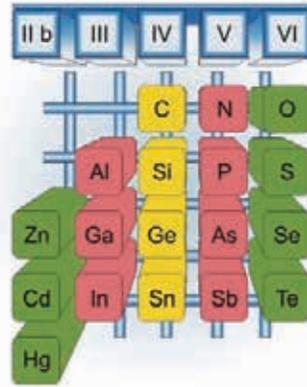
Doch diese Vorteile gelten vor allem für Produzierbarkeit und Lebensdauer der Bauteile. Will man jedoch andere Aspekte wie zum Beispiel die Geschwindigkeit, mit der ein Transistor Signale verarbeiten kann, gezielt optimieren, bietet Silizium nur selten die idealen Voraussetzungen. So ist zum Beispiel die Geschwindigkeit von Elektronen, und Strom ist ja nichts anderes als bewegte Elektronen, in anderen Materialien teilweise um einen Faktor 10 höher. Darüber hinaus lassen sich auch Verluste, die beim Betrieb eines Transistors auftreten, durch den Einsatz neuer Materialien reduzieren. Hier kommt auch wieder das Germanium ins Spiel, denn mischt man dem Silizium eine gewisse Menge Germanium bei, so können die daraus hergestellten Transistoren bei höheren Frequenzen betrieben werden. Vom chemischen Standpunkt aus gesehen lässt sich eine solche Legierung leicht herstellen, da beide Elemente in der vierten Gruppe des Periodensystems stehen, sich also chemisch gleichartig verhalten und die Atome in den Kristallen dieselbe räumliche Anordnung bilden. Einzig die Größe der Atome ist unterschiedlich und damit aber auch ihr Abstand voneinander in einem Kristall. Versucht man also eine Schicht SiGe auf einem Silizium-Wafer abzuscheiden, so müssen die Atome der SiGe-Schicht dichter zusammenrücken, um perfekt auf den Silizium-Kristall zu passen, als sie es normalerweise tun würden. Dabei entsteht eine mechanische Spannung zwischen der Schicht und dem Substrat, die, so lange sie nicht zu groß wird, zum Glück elastisch aufgefangen werden kann. Denn obwohl diese Kristalle an sich hart sind, zeigen sie doch ein gewisses elastisches Verhalten. Wie bei einem Gummiband oder einer Feder führt die mechanische Spannung zu einer Dehnung oder Stauchung, was in diesem Fall heißt, der Abstand der Atome in der SiGe-Schicht voneinander passt sich perfekt an die Silizium-Un-



Gitterstruktur: Zinkblende Silizium und III-V-Halbleiter kristallisieren in derselben räumlichen Anordnung; bei Silizium oder Diamant sind alle Atome vom selben Element, bei III-V-Halbleitern wie GaAs wechseln sich Gallium- und Arsen-Atome regelmäßig ab.

Materialforschung – Die Basis

Links: Ausschnitt des Periodensystems; Rechts: „Landkarte“ einiger Halbleitermaterialien



terlage an. Aber, wie im täglichen Leben auch, irgendwann, wenn der Zug am Gummiband zu groß wird, reißt es. Im Fall der Halbleiterkristalle heißt das, die Atome sitzen nicht mehr perfekt an den richtigen Stellen, es treten Baufehler in der schönen Kristallstruktur auf, die falsch eingebauten Atome stehen den sich bewegenden Elektronen im Weg und alle Vorteile des neuen Mischkristalls sind perdu. Die Materialforscher müssen hier also sehr darauf achten, dass sie nicht zuviel Germanium verwenden und die Dicke der Schicht eine zulässige Grenze nicht überschreitet. In diesem Fall meint „Dicke“ eher „Dünne“, denn die kritischen Größen liegen meist unterhalb von 100 nm, was einem 10.000stel eines Millimeters oder dem 500sten Teil eines menschlichen Haars entspricht. Für die Anwendungen werden häufig aber auch gar keine dickeren Schichten benötigt. In der Elektronikindustrie werden solche „Hetero“-Strukturen aus SiGe und Silizium eingesetzt, um die Schaltgeschwindigkeit von Transistoren zu erhöhen bzw. die Verluste zu reduzieren. Am Walter Schottky Institut werden dagegen aktuell Isotopen-reine Strukturen aus diesen Elementen hergestellt. An diesen besonders reinen Materialien kann man zum Beispiel studieren, wie sich die magnetischen Eigenschaften von Elektronen, ihr Spin oder auch Eigendrehimpuls, transportieren lässt und ob sich daraus nicht Bauelemente mit einem völlig neuartigen Funktionsprinzip zur Informationsverarbeitung realisieren lassen (mehr zu solchen Anwendungen im Kapitel 10 über Spintronik).

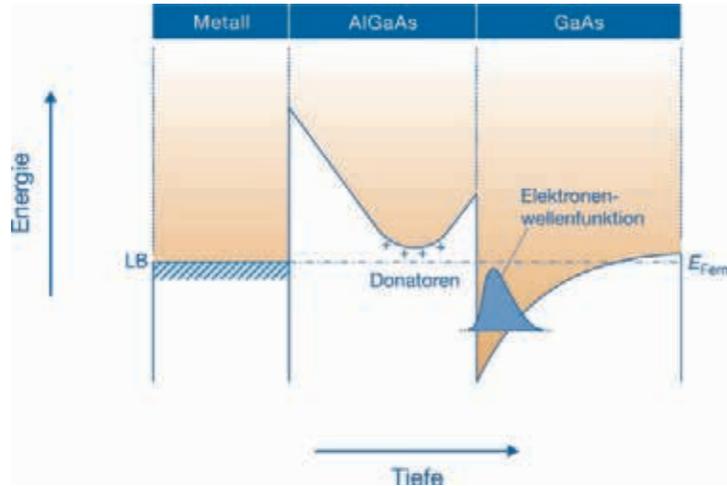
Licht und höchste Frequenzen – Die III-V-Verbindungshalbleiter

Bisher wurden mit Silizium und Germanium nur die Materialien vorgestellt, die als Elemente aus der vierten Gruppe des Periodensystems von sich aus halbleitende Eigenschaften zeigen und deswegen auch als Elementhalbleiter bezeichnet werden. Die Eigenschaft ein Halbleiter zu sein, hat dabei ihre tiefere Ursache in der speziellen Anordnung der Atome, in der jedes Atom von genau vier Nachbarn umgeben ist und der Tatsache, dass die Elementhalbleiter

eben genau vier Elektronen pro Atome für eine chemische Bindung zur Verfügung stellen können. Etwas Gleichartiges lässt sich jedoch auch erreichen, wenn ein dreiwertiges Element wie Gallium mit einem fünfwertigen wie Arsen kombiniert wird. Die räumliche Anordnung der Atome entspricht dann genau der des Siliziums, nur dass jetzt jedes Gallium-Atom von vier Arsen-Atomen umgeben ist und umgekehrt. Die Elektronen, drei vom Gallium und fünf vom Arsen, teilen sich die Atome untereinander, so dass im Mittel wieder vier Elektronen pro Atom beteiligt sind. Der größte Vorteil dieser Verbindungshalbleiter aber ist, dass sie im Gegensatz zu Silizium auf direktem Weg elektrischen Strom in Licht umwandeln können. Anders als bei einer Glühbirne geht dabei keine Energie als Heizleistung verloren. Alle lichtemittierenden Bauelemente, sei es die Leuchtdiode, die den Betrieb des Fernsehers anzeigt, die Infrarot-Fernbedienung oder der Laser im CD-Spieler werden heutzutage aus diesen Materialien gefertigt. Auch die allgemeine Beleuchtung wird in den nächsten Jahren durch diese Verbindungen revolutioniert werden, wie es sich heute schon bei Taschenlampen, Autoscheinwerfern oder Ampelanlagen andeutet.

Der „klassische“ Verbindungshalbleiter – Das System Aluminium-Gallium-Arsenid

Verschiedene Elemente zu immer neuen Materialien zusammen zu bringen und daraus komplexeste Schichtstrukturen herstellen zu können, eröffnet ganz neue Möglichkeiten für die Herstellung elektronischer und optoelektronischer Bauelemente. Bereits Ende der 70er Jahre des vorigen Jahrhunderts konnte man zeigen, dass sich die Beweglichkeit von Elektronen um ein Vielfaches steigern lässt, wenn man sie von „Verunreinigungen“ fernhält. Verunreinigungen sind in diesem Fall auch die zur Dotierung erforderlichen und gezielt eingebrachten Fremdatome. In einer Struktur aus einer Schicht Aluminium-Gallium-Arsenid (AlGaAs), die gezielt mit Silizium dotiert und auf einer Schicht aus hochreinem GaAs abgeschieden wird, sammeln sich die eigentlich vom Silizium stammenden Elektronen aufgrund der speziellen Anordnung der Energiebänder im GaAs. Hier wird ihre Bewegung nicht durch die geladenen Fremdatome gestört, was enorme Beweglichkeiten erlaubt. Mit einer speziell für die Herstellung solcher Strukturen konzipierten Anlage wurde am Walter Schottky Institut 1996 die Marke von 10 Millionen cm^2/Vs für die Beweglichkeit von Elektronen in GaAs bei Temperaturen nahe des absoluten Nullpunkts ($-273,15^\circ\text{C}$) durchbrochen. Zur Einordnung dieser Zahl muss man sich vor Augen führen, dass die Beweglichkeit von Elektronen in zum Beispiel Silizium bei Zimmertemperatur weniger als 1.000 cm^2/Vs beträgt. Dieses Ergebnis zählt auch international zu den absoluten Spitzenwerten und viele Forschergruppen, national wie international, benutzen dieses Material zur Erforschung spezieller Quanteneffekte in Halbleitern. Technisch ausgenutzt wird dieser Effekt der Geschwindigkeitssteigerung in solchen Heterostrukturen in so genannten Feldeffekttransistoren, die häufig als erste Verstärkerstufe in Handys eingesetzt werden.



AlGaAs/GaAs-Heterostruktur für hochbewegliche, zweidimensionale Elektronengase

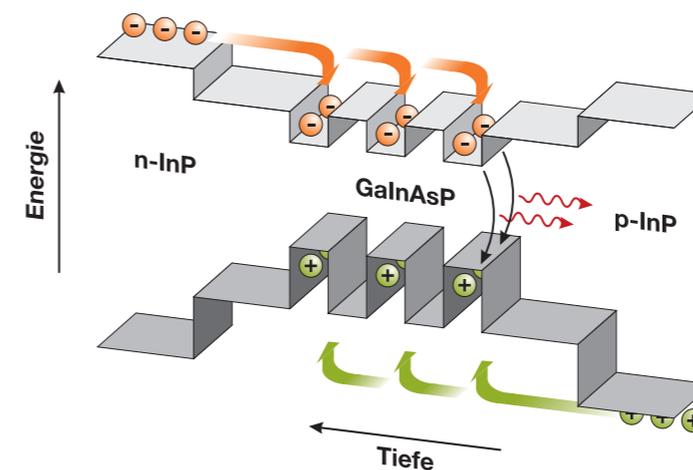
GaInAsP / InP – Laser für Telekommunikation und Internet

Telefonierte man früher mit Amerika über Satellit, was schon aufgrund der reinen Streckenlänge von über 70.000 km (Erde – Satellit – Erde) zu hörbaren Verzögerungen bei der Antwort führte, so werden heute die Signale per Licht über ein transatlantisches Glasfaserkabel geschickt. Allerdings ist es aber auch mit Glasfasern nicht möglich, jede Farbe des Lichtes verlustfrei über große Strecken zu transportieren. Dazu ist Licht im infraroten Spektralbereich mit einer Wellenlänge von 1,55 µm am besten geeignet. Solches Licht kann eine Halbleiterverbindung aussenden, in der die Elemente Gallium (Ga), Indium (In), Arsen (As) und Phosphor (P) miteinander gemischt sind. Die Mischungsverhältnisse müssen dabei im Prozentbereich genau getroffen werden, um einerseits die richtige „Farbe“ zu liefern und andererseits wieder zur „Unterlage“, dem Wafer aus InP, zu passen. Gegenüber dem GaInAsP hat das InP eine größere Bandlücke. Das erlaubt es, sowohl Elektronen als auch Löcher in einer Schicht aus GaInAsP, die sich zwischen zwei Lagen InP befindet, einzusperren. Damit sind die Ladungsträger auf ein sehr kleines Volumen konzentriert und es ist sehr wahrscheinlich, dass Elektronen und Löcher miteinander rekombinieren und dabei Licht aussenden. Diese direkte Umsetzung von Licht in Strom erfolgt sehr effizient und kann Werte nahe 100 % erreichen. Auf der Basis dieses Materialsystems wurden am Walter Schottky Institut im Rahmen eines von der EU geförderten Projektes Laser zur Anwendung im Telekommunikationsbereich entwickelt, deren Leistungsdaten denen industriell gefertigter Laser entsprachen, die aber durch ein raffiniertes Design des Bauelementes auch nachträglich noch gezielt in ihrer Wellenlänge

veränderlich waren. Da sich Signale bei verschiedenen Wellenlängen nicht gegenseitig beeinflussen, können so die Möglichkeiten der Datenübertragung per Glasfaser noch umfassender ausgenutzt werden und zum Beispiel hunderttausende von Telefongesprächen gleichzeitig über eine einzige Faser gesendet werden.

Antimonide – Ein Beitrag zur Atmosphärenanalytik

Eine optische Anwendung ganz anderer Art ist die Absorptionsspektroskopie. Dabei macht man sich zu Nutze, dass viele Gase Licht absorbieren, wenn die Energie des Lichtes exakt dem Wert entspricht, der notwendig ist, um die Atome des Moleküls gegeneinander in Schwingung oder in Rotation zu versetzen. Da verschiedene Moleküle unterschiedlich aufgebaut sind, hat jedes Molekül ein spezifisches Absorptionsverhalten, das wie ein Fingerabdruck ist. Aus der Schwächung des Lichtes beim Durchgang durch eine Messstrecke kann dann auf die vorhandene Konzentration eines bestimmten Gases geschlossen werden. Mit dieser Methode könnten zum Beispiel Lecks in Erdgasleitungen gefunden oder Verbrennungsprozesse in Öfen gesteuert werden. Allerdings liegen die stärksten Absorptionslinien meist noch weiter im Infraroten als die ohnehin schon nicht mehr sichtbaren Wellenlängen der optischen Nachrichtentechnik. Um solches Licht zu erzeugen, bedarf es eines Materials mit hinreichend *kleiner* Bandlücke, wieder eine Aufgabe für die Materialforschung. Die Lösung heißt: „Antimon“. Verwendet man in einer Laser-Struktur neben den Metallen Aluminium, Gallium oder Indium für die Gruppe-III-Komponente nicht die Kombination Arsen und Phosphor, sondern Arsen und Antimon für den Gruppe-V-Anteil, so lassen sich Halbleiterkristalle herstellen, die Licht mit Wellenlängen jenseits von 2 µm aussenden. Doch viele Fragen, die

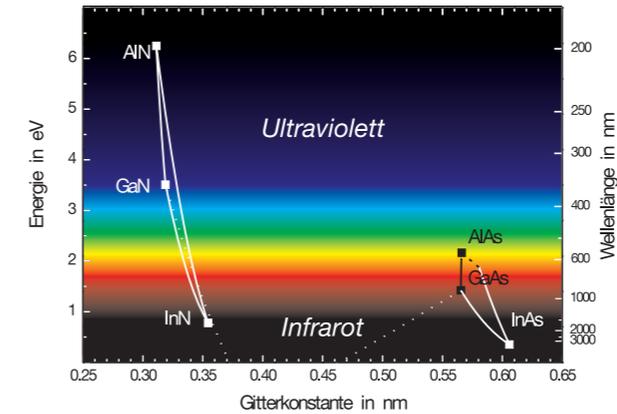


Doppel-Heterostruktur einer Halbleiter-Laser-Diode

bei den anderen Verbindungen schon lange gelöst sind, stellen sich hier ganz neu. Wie sieht, zum Beispiel, die elektronische Struktur solcher Heterostrukturen aus? Wie exakt lassen sich die gewünschten Verbindungen herstellen? Wie bearbeitet man antimonhaltige Materialien am besten? Mit welcher Säure lässt sich eine Struktur in den Kristall ätzen? Oder wie macht man einen guten elektrischen Kontakt, damit der Strom möglichst ohne Widerstand aus dem Kabel in den Halbleiter kommt? Im Laufe der langjährigen Forschung auf diesem Gebiet, in denen einige Fragen beantwortet und ein paar neue aufgeworfen wurden, konnten am Walter Schottky Institut doch eine Reihe von Erfolgen mit diesem bisher eher wenig untersuchten Material gefeiert werden. So gelang es, Laser herzustellen, deren Emissionswellenlängen von 2,2 bis zu 3,3 μm reichten und die damit die langwelligsten bipolaren Laser-Dioden aus III-V-Halbleitern überhaupt waren. Ein weiterer Meilenstein wurde 2007 erreicht, als erstmals weltweit mit einem elektrisch gepumpten, *oberflächenemittierenden* Laser auf Antimon-Basis Licht bei 2,2 μm erzeugt werden konnte.

Nitride – Blaues Licht aus kalten Quellen

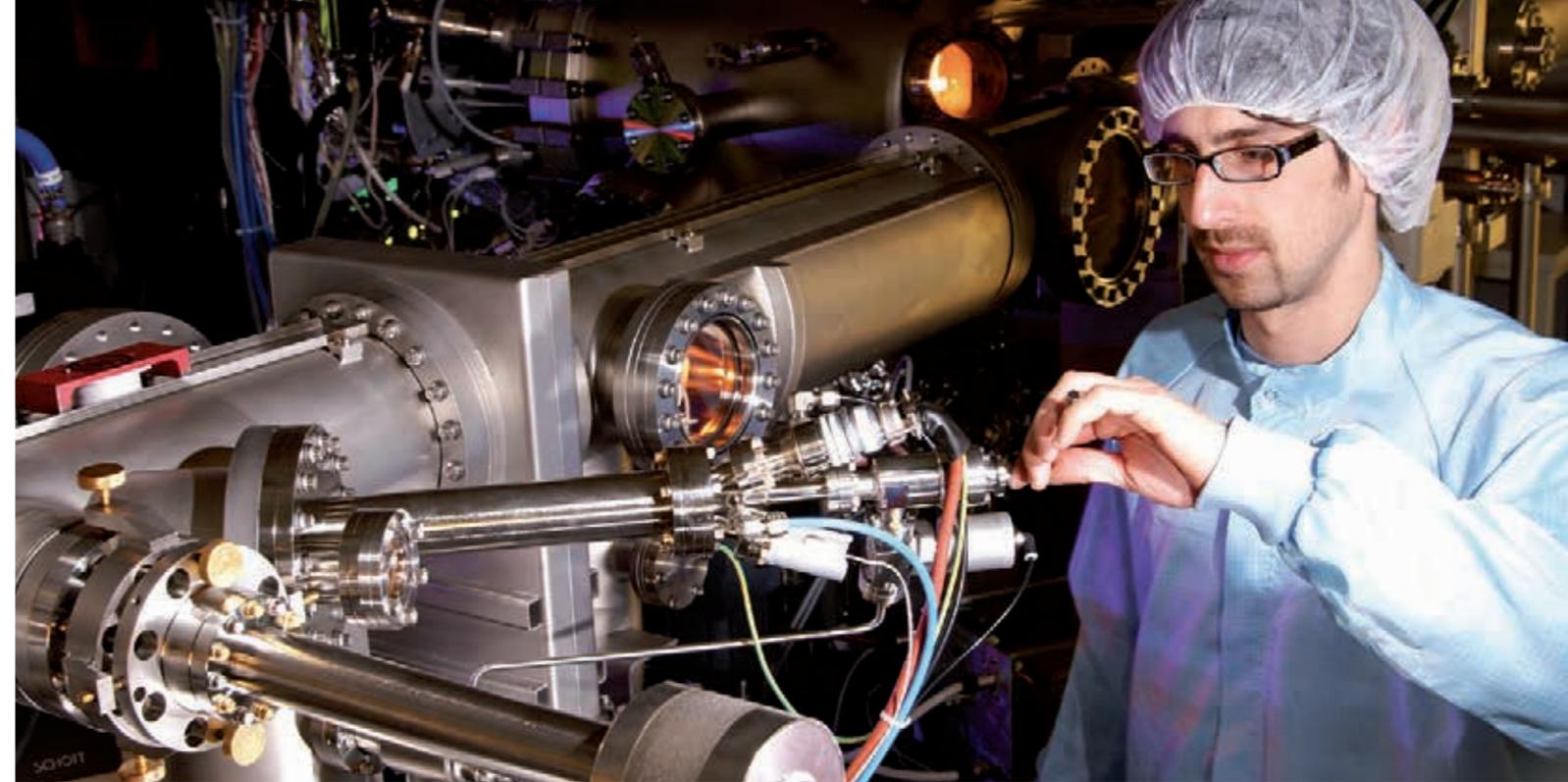
Blue-Ray oder HD-DVD? Diese System-Frage ist in den letzten Monaten entschieden worden. Aber schon mit der Einführung dieser Produkte wurde wohl auch die Frage nach dem besten Material für das entscheidende Bauelement, den blauen Laser, entschieden. Blaues Licht mit Halbleitern erzeugen zu können, war lange Zeit ein großes Ziel der Halbleiterindustrie, denn erstens können Speichermedien, die mit blauem statt infrarotem Licht arbeiten, wesentlich größere Datenmengen speichern und zweitens ist es mit der Kombination *Rot – Grün – Blau* möglich, auch weißes Licht herzustellen. Keines der bisher erwähnten Materialsysteme hat jedoch eine so *große* Bandlücke, dass das energiereiche blaue Licht erzeugt werden könnte. Zinkoxid (ZnO) und Siliziumcarbid (SiC) waren aussichtsreiche Kandidaten, die in den vergangenen Jahren und Jahrzehnten zu diesem Zweck untersucht wurden, doch Herstellung und Bearbeitung waren schwierig. Die Sache änderte sich jedoch grundlegend, als Mitte der 90er Jahre eine japanische Firma namens *Nichia*, die eigentlich Leuchtstoffe für Fernsehöhren herstellte, eine blaue Leuchtdiode aus einer stickstoffhaltigen Verbindung demonstrieren konnte. Galliumnitrid (GaN) und seine Verwandten sind seitdem Gegenstand intensivster Forschung und Entwicklung. Selbst spezielle Anlagen und Komponenten zur Abscheidung dieser Verbindungen mussten entwickelt werden, um ein Metall (Aluminium, Gallium oder Indium) mit einem Gas (Stickstoff) zu einem Festkörper zu verbinden. Die Probleme der Herstellung beginnen schon bei der Basis für die Nitrid-Bauelemente. Anders als bei Silizium, Galliumarsenid oder Indiumphosphid stehen für Galliumnitrid keine geeigneten Substratmaterialien zur Verfügung. Saphir, chemisch Aluminiumoxid Al_2O_3 , ist ein teurer Kompromiss, dessen Kristallstruktur eigentlich nicht ideal ist.



Bandlücke bzw. Wellenlängenbereich stickstoffhaltiger Halbleiter

Aufgrund dieser und anderer grundsätzlicher Schwierigkeiten beim Wachstum haben die bisher hergestellten Kristalle der Nitride noch nicht die Perfektion erreicht, die bei den arsen- oder phosphorbasierten Systemen inzwischen üblich sind. Dennoch werden heute schon grüne und blaue Leuchtdioden und Laser daraus gefertigt. Auch für die Elektronik sind „die Nitride“ sehr interessant. Aufgrund der großen Bandlücke sind sie ideal geeignet zur Herstellung von Hochleistungstransistoren, die gleichzeitig auch bei sehr hohen Frequenzen betrieben werden können. Hohe Temperaturbeständigkeit und chemisch inertes Verhalten zeichnen sie weiterhin aus. Insbesondere letzteres wird bei den Arbeiten am WSI ausgenutzt, bei denen es um die Entwicklung von Bio-Sensoren geht. Das Oberflächenoxid der Nitride zeigt eine hohe elektrochemische Stabilität in wässrigen Lösungen, was es erlaubt, hochempfindliche Sensoren zur Bestimmung des pH-Wertes einer Lösung herzustellen. Aber die hierzu entwickelten speziellen Feldeffekttransistoren können noch mehr. Es lassen sich nämlich Enzyme oder auch andere Biomoleküle an die Steuerelektrode eines solchen Transistors anheften, wodurch dieser elektronische Sensor empfindlich für biologische Signale wird.

Als Fazit dieses Überblickes über Halbleitermaterialien, ihre Eigenschaften und Anwendungen kann festgehalten werden, dass Silizium das perfekte Material für elektronische „Standard“-Bauelemente ist, wobei der „Standard“ durch kontinuierliche Weiterentwicklung der Fertigungstechnologien eine sich ständig verändernde Marke ist. Für spezielle Anwendungen wie Höchstfrequenzelektronik, Optoelektronik oder hocheffiziente Solarzellen für den Weltraum bieten dagegen Verbindungshalbleiter und darunter vor allem die III-V-Verbindungen die perfekten physikalischen Voraussetzungen für maßgeschneiderte Lösungen.



Epitaxie – Herstellung perfekter Kristalle

Epitaxie – Mit diesem Begriff bezeichnet man die Herstellung von Kristallen, die eine perfekte dreidimensionale Anordnung von Atomen besitzen, und zwar entweder in Form von dünnen Schichten oder als Nanostrukturen, wie im nächsten Kapitel beschrieben. Die ersten Verfahren benutzten meist heiße Schmelzen der verschiedenen Elemente, die abgekühlt wurden, um Kristalle entstehen zu lassen. Heutzutage werden jedoch meist zwei andere Verfahren verwendet, die entweder darauf beruhen, dass die Ausgangsstoffe als Strahlen von Atomen bzw. Molekülen auf die Substratoberfläche auftreffen (*Molecular Beam Epitaxy, MBE*) oder aber, dass die Abscheidung in einer Gasphase erfolgt (*Metal Organic Vapour Phase Epitaxy, MOVPE*).

MBE – Kristallzucht auf atomarer Ebene

Die Molekularstrahlepitaxie ist ein Verfahren, das in seinen Grundzügen leicht verständlich ist, für das aber ein hoher apparativer Aufwand getrieben werden muss, um die erforderlichen Vakuumbedingungen zu schaffen. Im Prinzip handelt es sich hierbei um eine spezielle Form des Aufdampfens. Metalle werden in keramischen Tiegeln auf Temperaturen von einigen Hundert oder, je nach Element, auch auf bis zu über 1.000 °C erhitzt, wodurch sie verdampfen. Da der Druck in der Vakuumkammer extrem niedrig ist, stoßen die verdampften Atome nicht aneinander, so dass sich keine „Dampfwolke“ über einem Tiegel ausbildet, sondern ein gerichteter Strahl aus Atomen oder Molekülen die Verdampferzelle verlässt. Diese Molekülstrahlen, die dem Verfahren auch seinen Namen geben, treffen auf das Substrat, das den Zellen gegenüber steht und scheiden sich darauf als neue Schicht ab.

Vereinfacht gesagt, haften die Metalle, wie Aluminium oder Gallium, perfekt auf der Oberfläche des Wafers, das heißt, jedes ankommende Metallatom wird auch in die entstehende Schicht eingebaut. Für die Halbmetalle, also zum Beispiel das Arsen, gilt dies jedoch nicht, was eigentlich ein sehr günstiger Umstand ist, wie sich gleich zeigen wird. Neu ankommende Arsen-Atome haften nämlich nur dann auf der Oberfläche des Substrates, wenn die oberste Atomlage aus Metallatomen besteht. Besteht die oberste Schicht jedoch schon aus Arsen, dann dampft das nachkommende, überschüssige Arsen vollständig wieder ab. Die Konsequenz daraus: Arsen bzw. allgemeiner die Gruppe-V-Elemente können im Überschuss angeboten werden und trotzdem werden in den Kristall nur exakt so viele Atome eingebaut, wie auch tatsächlich benötigt werden. Die Natur sortiert also für uns die Atome auseinander, so dass schließlich die Gruppe-III- und die Gruppe-V-Atome perfekt einander abwechseln. Das erleichtert die Prozessführung ungemein und eigentlich wird nur dadurch garantiert, dass fehlerfrei aufgebaute Kristalle entstehen. Der Natur sei Dank.

Betrachtet man nur eine Atomsorte, etwa nur die Elemente der dritten Gruppe des Periodensystems Aluminium, Gallium oder Indium, so sind diese ja chemisch gleichartig. Zwischen diesen Elementen gibt es also keine wesentlichen Unterschiede, so dass sie sich innerhalb einer Atomlage auch statistisch verteilen. In der Wachstumsrichtung also senkrecht zur Oberfläche des Wafers kann jedoch der Mensch bestimmen, welche Elemente die Schichten nacheinander enthalten sollen. Durch „Öffnen“ und „Schließen“ von Blenden werden die Atomstrahlen gewissermaßen ein- und ausgeschaltet. So entstehen Heterostrukturen aus verschiedenen Materialien, in denen sich zum Beispiel aluminiumhaltige und aluminiumfreie Schichten in einer AlGaAs/GaAs-Struktur einander abwechseln. Durch die richtige Abfolge



Materialforschung – Die Basis

dieser Schichten können so die Eigenschaften von Heterostrukturen für die jeweiligen Bauelementenanwendungen maßgeschneidert werden, und da bei diesem Verfahren atomare Strahlen benutzt werden, hat man eine Kontrolle über die Zusammensetzung und Dicke der Schichten auf atomarer Skala.

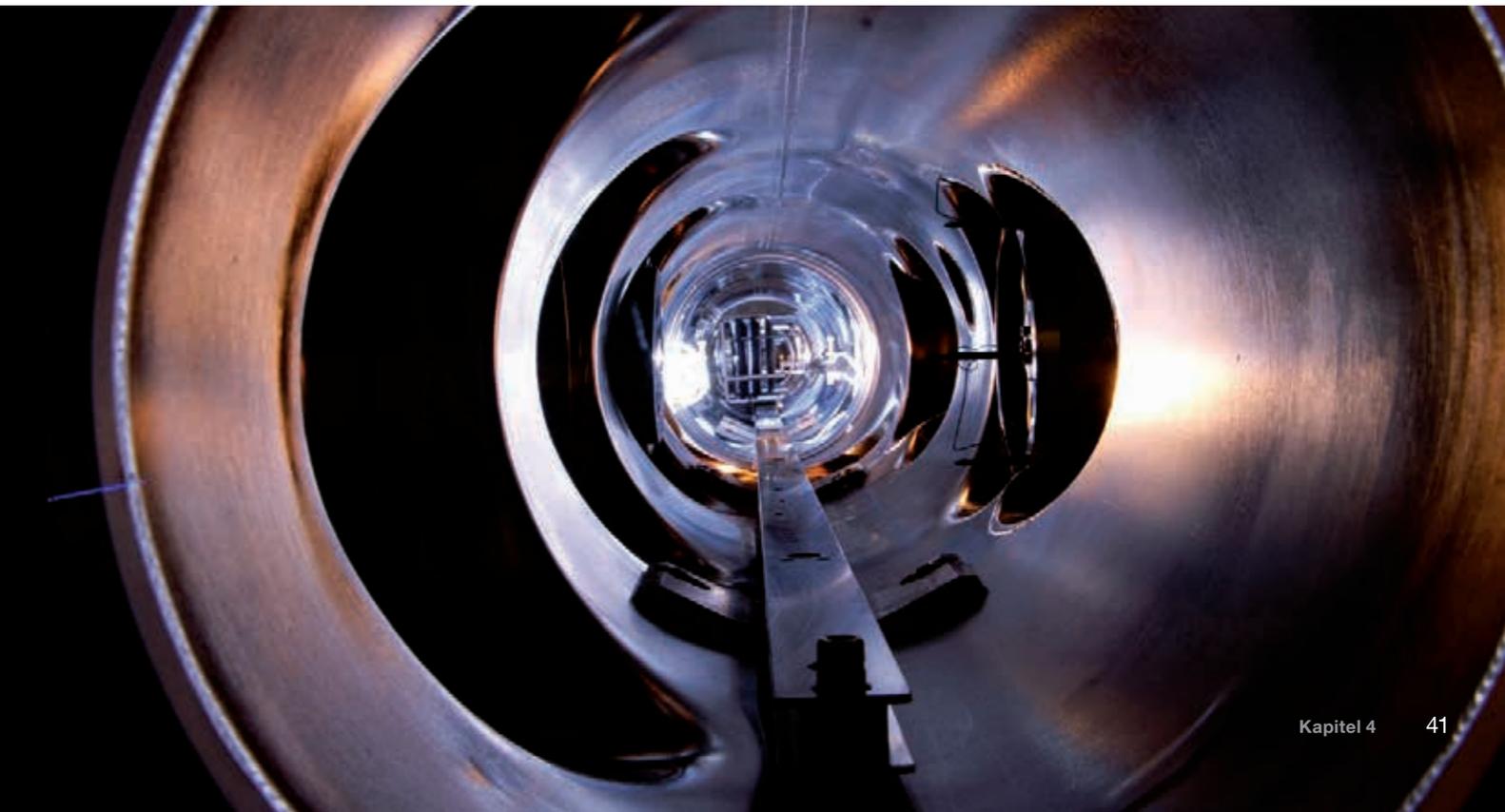
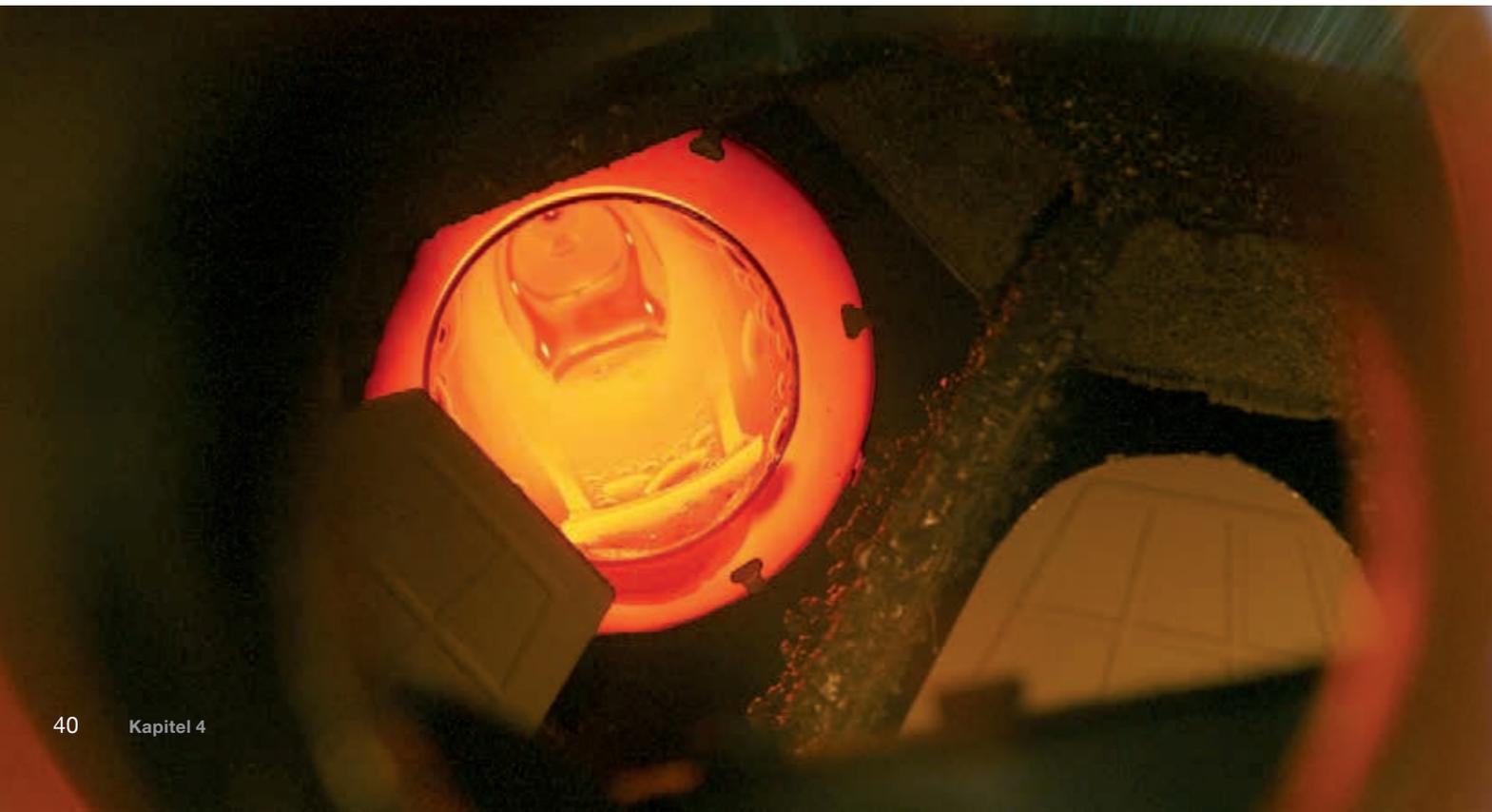
MOVPE – Kristalle aus Gasen

Die Molekularstrahlepitaxie ist mit ihren Strahlen aus einzelnen Atomen, die sich auf ihrem Weg von der Quelle zum Substrat nicht gegenseitig beeinflussen, das ideale Verfahren, um perfekte dreidimensionale Anordnungen von Atomen in Kristallen herzustellen. Doch es hat auch gewisse Nachteile. Vom Materialaspekt her stellen Elemente mit hohen Dampfdrücken eine besondere Belastung solch einer Ultra-Hoch-Vakuum-Anlage dar und sind darüber hinaus auch schwerer zu kontrollieren. So waren phosphorhaltige Verbindungen bis Anfang der 90er Jahre mittels MBE nicht herstellbar und erst die Entwicklung neuer Verdampferzellen

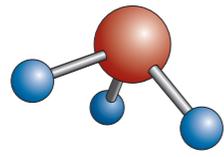
brachte eine Erweiterung des abscheidbaren Materialspektrums. Außerdem stellen die langen Ausfallzeiten von einigen Wochen, wenn die Kammer geöffnet werden muss, sei es wegen Reparatur, Reinigung oder zum Nachfüllen der Reinstelemente, einen schweren Nachteil für industrielle Fertigungsabläufe dar. Für den bei einer Produktion nötigen Durchsatz sind daher Gasphasenprozesse im Allgemeinen besser geeignet.

Daher wurde in den 70er und 80er Jahren ein Verfahren entwickelt, bei dem die gewünschten Elemente nicht in reiner Form, sondern als chemische Verbindungen eingesetzt werden. Diese Stoffe sind entweder von Hause aus gasförmig oder aber, wenn sie flüssig sind, genügt der Dampf, der sich bei einer bestimmten Temperatur über der Flüssigkeitsoberfläche befindet. Für die Gruppe-III-Elemente (Al, Ga, In) werden dabei die Metalle meist mit organischen Anteilen wie zum Beispiel dem Methan kombiniert. Daher auch der Name: „metall-organische Gasphasenepitaxie“. Bei der Synthese einer solchen Verbindung wird vom Methan (CH_4) gewissermaßen ein Wasserstoffatom abgebrochen und drei dieser „Rumpfmoleküle“ (Methyl, CH_3) dann an zum Beispiel ein Gallium-Atom angehängt. Die entstandene Verbindung heißt

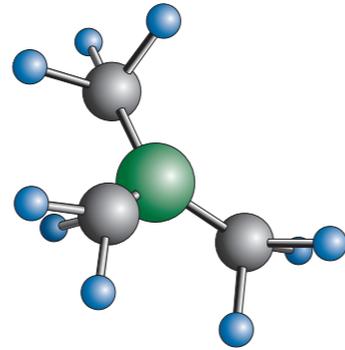
Blick in eine heiße Effusionszelle mit flüssigem Aluminium bei offener Blende



Materialforschung – Die Basis



Arsin



Tri-Methyl-Gallium

dementsprechend *Tri-Methyl-Gallium*. Die Gruppe-V-Elemente werden häufig in Verbindung mit Wasserstoff eingesetzt. Aus dem Arsen wird so das *Arsin* (AsH_3), bei dem das Arsen-Atom von drei Wasserstoff-Atomen umgeben ist.

Diese Gase werden mit Wasserstoff gemischt und strömen durch einen Glasreaktor (siehe Titelbild dieses Kapitels), in dem auf einem Graphitblock das Substrat liegt. Dieser Block wird mit Lampen auf 500 bis 800 °C aufgeheizt, bevor die reaktiven Gase zum ersten Mal eingelassen werden. Strömen die Gase über diese heiße Zone, so zersetzen sie sich auf der Oberfläche des Wafers. Die *Methyl*gruppen brechen vom Gallium ab und verbinden sich mit dem Wasserstoff aus dem *Arsin* wieder zu *Methan*. Dieses gelangt zurück in die Gasphase und wird als Abfallprodukt mit dem übrigen Gasstrom abtransportiert. Die frei gewordenen Gallium- und Arsen-Atome werden dagegen als neue Lage GaAs in den Kristallverbund des Substrates eingebaut und so neues Material in perfekter Geometrie geschaffen.

Da bei diesem Verfahren die Flüsse der Gase mit elektronischen, linear arbeitenden Reglern eingestellt werden, hat man eine sehr gute Kontrolle über das Materialangebot und es können sehr flexibel Kristalle mit unterschiedlicher Zusammensetzung hergestellt werden. Allerdings ist durch die Verwendung von Verbindungen der Prozess insgesamt sehr komplex, da bis zum Einbau der Atome in den Kristall auch eine Reihe chemischer Reaktionen ablaufen. Erschwerend kommt hier noch ein weiterer Punkt hinzu. Während die meisten reinen Elemente vergleichsweise unkompliziert in ihrer Handhabung sind, sind die hier verwendeten Verbin-

dungen giftig, teilweise sogar hochgradig. Der sichere Betrieb einer solchen Anlage ist daher nur zu gewährleisten, wenn die Abgase aktiv gereinigt werden und von der Gasflasche bis zum Abgasreiniger ein umfassendes Sicherheitssystem zur Überwachung existiert.

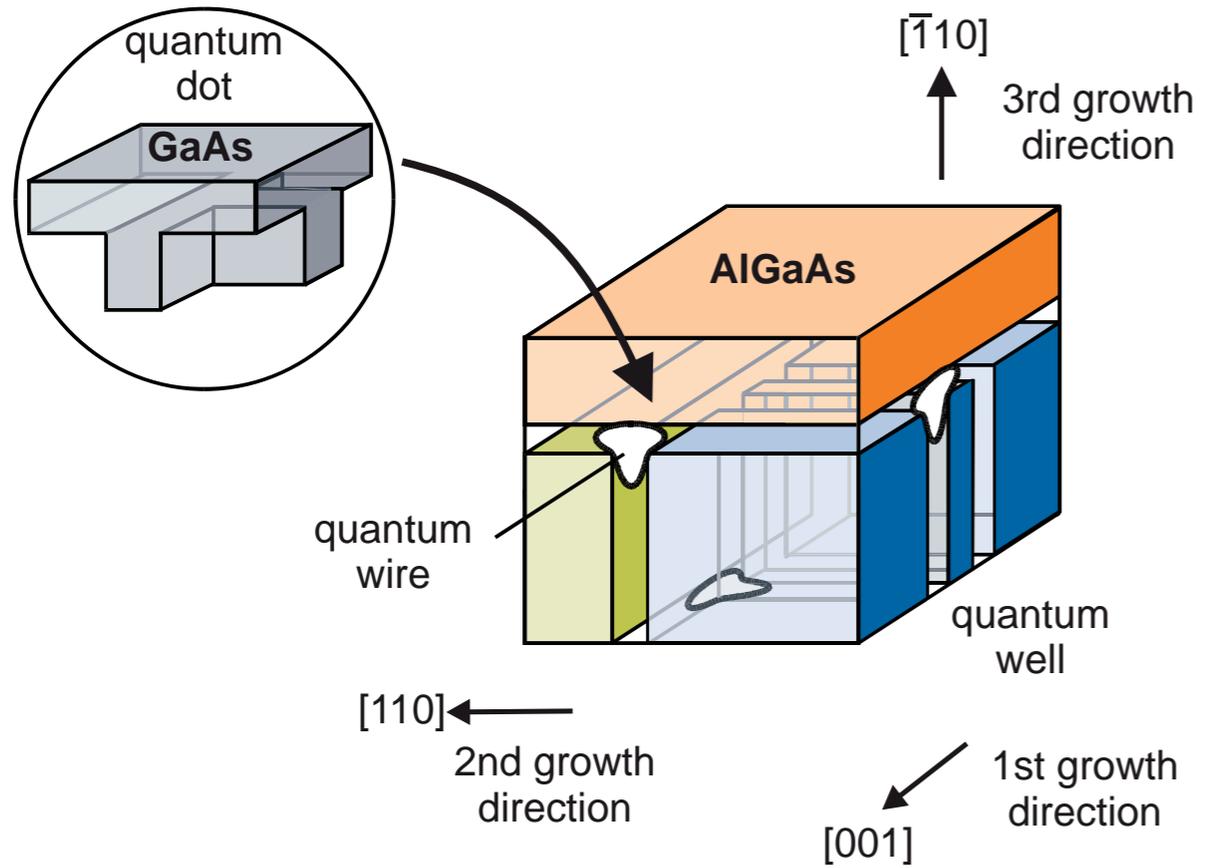
Jedes der hier vorgestellten Verfahren hat also so seine spezifischen Stärken und Schwächen. Aluminiumhaltige Verbindungen wird man vorzugsweise mittels MBE herstellen und auch eine Kontrolle der Schichtdicken auf atomarer Skala ist hier eher gegeben, während der Umgang mit Phosphor und Stickstoff beim MOVPE-Verfahren „leichter“ zu bewerkstelligen ist und der höhere Durchsatz den industriellen Einsatz favorisiert.

Zusammenfassend verfügt das Walter Schottky Institut über eine Reihe modernster Epitaxieanlagen, mit denen verschiedenste neuartige Halbleitermaterialien und komplexe Schichtstrukturen synthetisiert werden, um ihre Eigenschaften zu studieren und sie für Anwendungen in neu entwickelten Bauelementen maßzuschneidern.

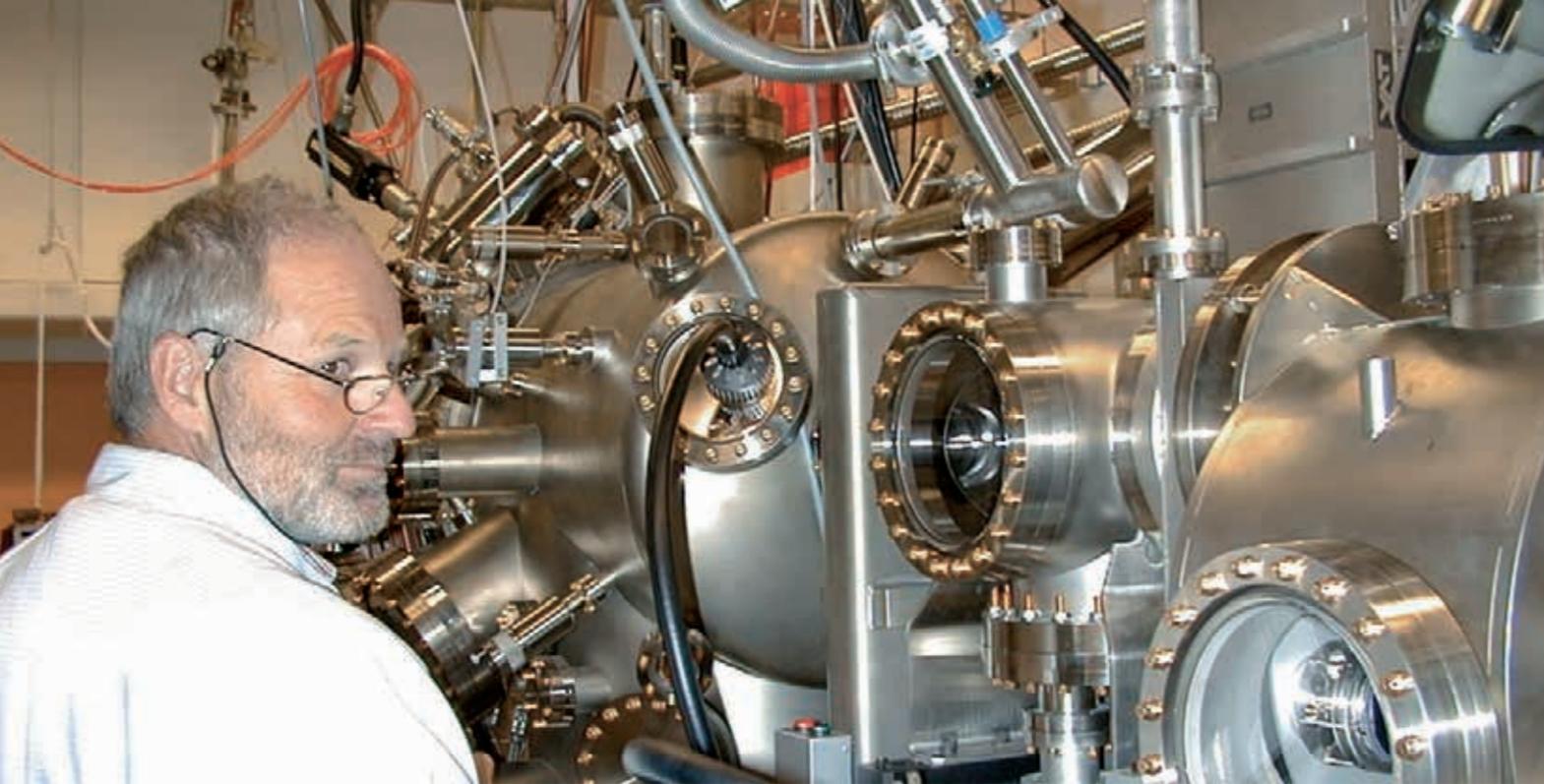
Beladung eines MOVPE-Reaktors



Nanoskalige Materialien

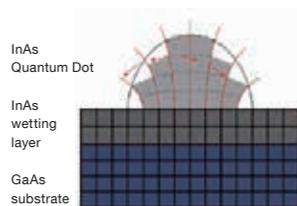


Schema zur Herstellung von
Quantendrähten und Quanten-
punkten durch Überwachsen von
Spaltflächen



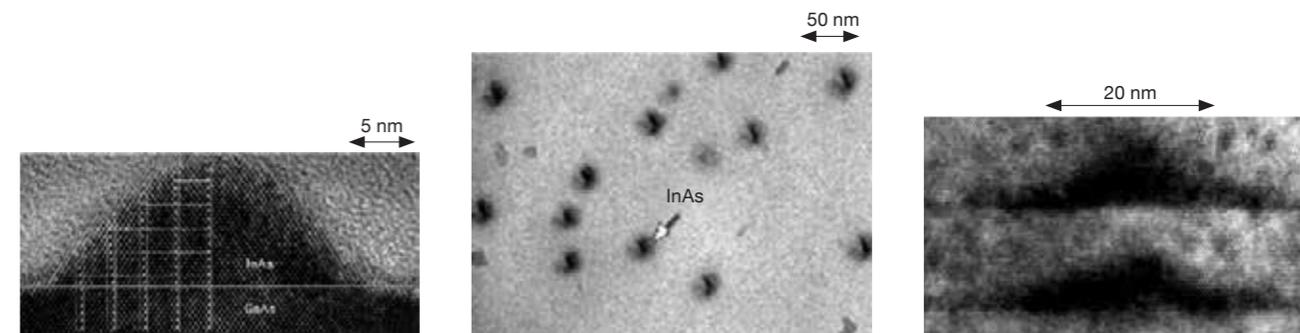
GaAs basierende MBE Anlage zur Synthese ultrareiner Materialien und Selbstorganisation von Nanostrukturen

Halbleiternanostrukturen sind Basis für die Entwicklung außerordentlich vielversprechender Bauelemente für elektronische, opto-elektronische und sensorische Anwendungen. Nanostrukturen bezeichnen Materialien mit charakteristischen Ausdehnungen von wenigen Nanometern. Solche Systeme weisen außergewöhnliche physikalische und/oder chemische Eigenschaften auf, die Grundlage für die Entwicklung neuartiger Bauelemente für unterschiedliche Anwendungsbereiche, z.B. in der Informationstechnologie, der biomedizinischen Diagnostik und der Energie- und Umwelttechnologie sind. Eine weitere Motivation für die intensive Erforschung von Halbleiternanostrukturen liegt auch darin begründet, dass die herkömmliche Mikroelektronik bei weiterer Verkleinerung der Bauelemente in den Nanometerbereich an ihre Grenzen stoßen wird und für die Zukunft Bauelemente mit neuen Funktionsprinzipien, z.B. durch Nutzung quantenmechanischer Effekte, gesucht werden. Am Walter Schottky Institut ist ein Forschungsschwerpunkt die Realisierung von Halbleiternanostrukturen, wie Quantendrähte und Quantenpunkte, durch direkte Synthese mit epitaktischen Methoden. Zum Einsatz kommen hierbei chemische Abscheidung aus der Gasphase sowie Molekularstrahlepitaxie. Diese Verfahren sind in Kapitel 4 ausführlich beschrieben. In diesem Abschnitt stellen wir ausgewählte Beispiele vor, wie mit Epitaxieverfahren durch Selbstanordnung und Selbstorganisation Nanostrukturen wie Quantendrähte und Quantenpunkte hergestellt werden können.



Schema für das spannungsinduzierte Wachstum von InAs Quantenpunkten auf GaAs Substraten.

Mit der Molekularstrahlepitaxie werden hochreine Materialien in separaten Effusionszellen verdampft. Die Atome oder Moleküle werden von den Quellen kontrolliert freigesetzt und bewegen sich als „Strahl“ auf das Substrat zu, wo sie abgeschieden werden. Die präzise Kontrolle der Freisetzung von Atomen und Molekülen sowie der Wachstumsbedingungen auf der Oberfläche ermöglichen es, komplexe Legierungen mit kontrollierter Zusammensetzung und



Transmissionselektronenmikroskopische (TEM) Abbildung eines selbstorganisiert gewachsenen InAs Quantenpunktes.

Planare TEM Abbildung eines Ensembles von InAs Quantenpunkten auf GaAs.

Querschnitt TEM Mikrograph eines InAs QD Moleküls, hergestellt durch Wachstum von zwei übereinanderliegenden Quantenpunktenlagen.

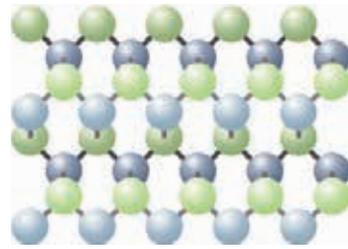
Geometrien mit einer Genauigkeit im atomaren Bereich herzustellen. Die Untersuchung der Wachstumsmechanismen und Eigenschaften der Materialien ist ein wichtiger Schritt für die Realisierung von neuartigen Bauelementen und niedrig dimensionalen Systemen für die Grundlagenforschung. Nur mit einem tiefgehenden Verständnis der physikalischen und chemischen Phänomene, die während der Synthese an der Substratoberfläche auftreten, ist es möglich neue Formen und Anordnungen von Halbleitermaterialien auf der Nanometerskala zu realisieren.

Quantenpunkte sind Halbleiternanostrukturen, die in allen drei Raumrichtungen auf der Nanometerskala begrenzt sind. Aufgrund der kleinen Dimensionen sind die elektronischen Zustände diskret, ähnlich wie in Atomen (siehe hierzu Kapitel 6). Das große Interesse an Quantenpunkten ist durch mögliche Anwendungen wie Halbleiterlaser, Solarzellen sowie der Kontrolle quantenphysikalischer Phänomene als Basis für zukünftige Quanteninformationstechnologie motiviert.

Mit Molekularstrahlepitaxie können verschiedene Arten von Quantenpunkten hergestellt werden. Eine der am häufigsten

verwendeten Methoden ist das sog. Stranski-Krastanow Wachstum, wobei das Material auf einem gitterfehlangepassten Substrat (z.B. InAs auf GaAs oder Ge auf Si) abgeschieden wird. Wegen der unterschiedlichen Gitterkonstanten (atomare Abstände) sind die epitaktischen Schichten verspannt. Dies führt, unter bestimmten Wachstumsbedingungen (Substrattemperatur und Abscheidungsrate), innerhalb der ersten wenigen atomaren Lagen zu einem Übergang von planarem Wachstum zu dreidimensionalem Inselwachstum. Dieser Übergang setzt bei einer kritischen Schichtdicke ein, die von den chemischen und physikalischen Eigenschaften der Materialien abhängt, wie z.B. Oberflächenenergien und Größe der Gitterfehlangepassung. Am WSI werden Quantenpunkte mit dieser Methode, je nach angestrebter Anwendung, mit verschiedenen Materialsystemen wie, InAs, bzw. InGaAs auf GaAs oder InP und Ge, bzw. SiGe auf Si hergestellt. Zur spektroskopischen Untersuchung solcher Quantenpunkte und zur Demonstration möglicher Anwendungen ist es notwendig, diese nach dem Entstehen zu Überwachen und damit vollständig in eine Kristallmatrix einzubetten. Materialdiffusion und -segregation während des Überwachens resultieren in einer Veränderung der geometrischen Form und Zusammensetzung

Nanoskalige Materialien



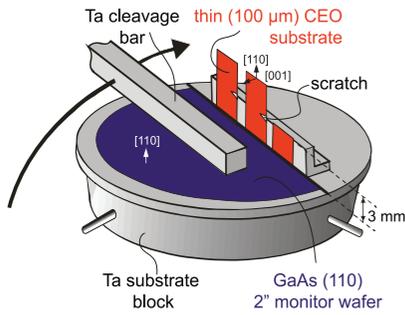
Zinkblende-Kristallstruktur mit (100)- und (110)-Oberflächen

der Quantenpunkte. Dadurch werden deren optische und elektrische Eigenschaften charakteristisch verändert. Ein grundlegendes Interesse besteht in der Kontrolle von Ladung, Spin und Photonen für Anwendungen in der Quanteninformationstechnologie. Zu diesem Zweck ist es notwendig, die Eigenschaften der Quantenpunkte abstimmen zu können, z.B. durch ein elektrisches Feld. Hierfür werden Quantenpunkte in eine Diode oder auch in komplexere Bauelementstrukturen wie Mikroresonatoren eingebettet.

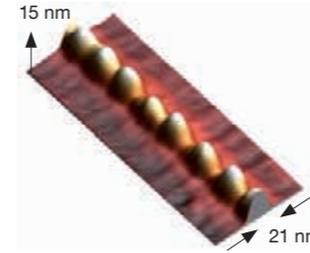
Ein Schwerpunkt der materialorientierten Forschung am WSI ist die Untersuchung der Entstehungsmechanismen und der Selbstorganisation dieser Nanostrukturen. Nur durch das Verständnis der Wachstumsmechanismen ist es möglich, die angestrebten Eigenschaften der Quantenpunkte, die ja von Form, Größe und Zusammensetzung aber auch der räumlichen Dichte abhängen, gezielt einstellen und kontrollieren zu können.

Eine wichtige Erweiterung der Funktionalität von Quantenpunkten ist die exakte räumliche Kontrolle mehrerer Quantenpunkte zueinander. Die quantenmechanische Kopplung verschiedener Quantenpunkte kann damit gezielt kontrolliert werden, ein wichtiger Baustein für die Anwendung in der Quanteninformationstechnologie. Eine Methode um Paare von Quantenpunkten mit exakt definiertem Abstand zu erhalten, ist die Abscheidung einer zweiten Quantenpunktschicht mit dünner Zwischenschicht. Beim Aufwachsen der zweiten Schicht entstehen die Quantenpunkte bevorzugt genau über den darunterliegenden Inseln, da an der Oberfläche die Verspannung, verursacht durch diese, noch spürbar ist. Hierfür muss die Zwischenschicht aber dünn genug sein, typisch unter 30 nm. Der Abstand und damit die Kopplungsstärke ist daher bis zu maximal 30 nm beliebig einstellbar. Durch Einbettung in Dioden kann die resonante Kopplung der elektronischen Zustände in solchen Quantenpunkt-Molekülen gezielt im elektrischen Feld abgestimmt werden. Dies wurde vor einigen Jahren am WSI erstmalig demonstriert.

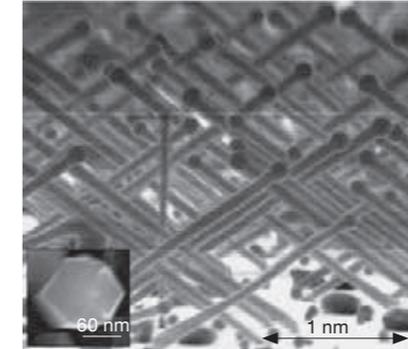
Ein weiterer neuer Ansatz zur atomar genauen räumlichen Kontrolle von Quantenpunkten, basiert auf dem Überwachsen von Spaltflächen. Hierzu wurde am WSI Pionierarbeit geleistet. Die Standardoberfläche für epitaktisches Wachstum ist die (100) Fläche. GaAs kann man senkrecht zu dieser Oberfläche entlang einer (110) Fläche mit atomarer Genauigkeit brechen, oder wie man hierfür sagt, spalten. Wird z.B. zunächst ein AlGaAs/GaAs/AlGaAs Potentialtopf auf die (100) Fläche aufgewachsen, dann kann man nach dem Spalten dieser Probe, senkrecht dazu, auf eine (110) Fläche einen weiteren Potentialtopf aufwachsen. An der Kreuzungsstelle dieser beiden Potentialtöpfe entsteht ein Quantendraht. Nochmaliges Spalten entlang der (-110) Fläche, die zu beiden ursprünglichen Flächen senkrecht steht, ermöglicht die Realisierung eines Quantenpunktes an der Kreuzung von drei Potentialtöpfen. Alle Raumrichtungen sind dabei mit der atomaren Genauigkeit der Molekularstrahlepitaxie einstellbar und es können sowohl einzelne, gekoppelte oder auch Quantenpunkte, die zu einer Kette angeordnet sind, realisiert werden, je nach Schichtfolge auf der (100) Ausgangsfläche. Das Grundprinzip dieser Methode besteht im epitaktischem Wachstum auf einer Kristalloberflä-



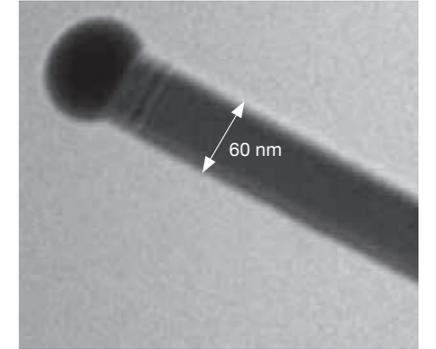
Schematische Darstellung der Methode des Überwachsens von Spaltflächen



Rasterkraftmikroskopische Abbildung einer Reihe von InAs Quantenpunkten auf Spaltflächen.



Rasterelektronenmikroskopische Abbildung einer Anordnung von GaAs Nanodrähten gewachsen auf einem (001) orientierten GaAs Substrat.



TEM Abbildung eines mittels MBE hergestellten GaAs Nanodrahts.

che, die im Ultrahochvakuum der Epitaxie-Anlage „in-situ“ frisch gespalten wurde. Qualitativ hochwertiges Wachstum auf diesen Oberflächen ist mit besonders hohen Anforderungen an die Reinheitsbedingungen in der Anlage verbunden. Nur in wenigen Labors der Welt kann dies durchgeführt werden. Nanostrukturen, hergestellt mit der Methode des Überwachsens von Spaltflächen, sind Modellsysteme. Am WSI wurde mit dieser Methode bereits vor ca 10 Jahren erstmalig die quantenmechanische Kopplung von Halbleiter-Quantenpunkten demonstriert.

Spaltflächen können auch als Template für die Anordnung von selbstorganisierten Quantenpunkten verwendet werden. Hierzu werden zunächst auf ein GaAs Substrat dünne Schichten aus AlAs, eingebettet in GaAs aufgewachsen. Nach dem „in-situ“ Spalten entsteht auf der (110)-Spaltfläche ein atomar präzises Streifenmuster aus GaAs und AlAs, festgelegt durch die Schichtfolge des ersten Wachstumsschrittes. Wird nun InAs auf der Spaltfläche unter bestimmten Wachstumsbedingungen abgeschieden, so zeigt sich, dass sich dieses Material auf den AlAs Streifen ansammelt. Je nach Menge des abgeschiedenen Materials entstehen Quantendrähte, Quantenpunktzeilen und, bei breiteren Streifen, auch Quantenpunkte in Doppelreihen. Ziel ist hierbei, durch die Anordnung in Streifen, eine homogenere Größenverteilung der Quantenpunkte zu erreichen.

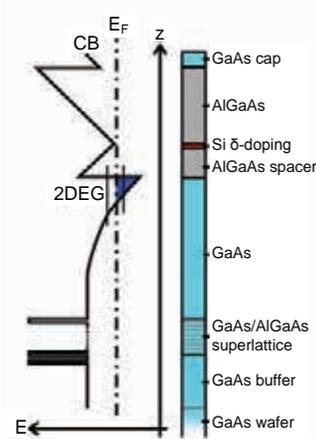
Als abschließendes Beispiel von neuartigen Nanostrukturen werden freistehende Nanodrähte vorgestellt. Nanodrähte sind eindimensionale kristalline Strukturen mit Durchmessern in der Größenordnung von einigen 10 Nanometern und Längen im μm Bereich. Aufgrund ihrer Geometrie sind sie ideale Strukturen, um z.B. eindimensionalen elektronischen Transport zu untersuchen und Quantendrahttransistoren zu realisieren. Solche freistehenden Drähte werden am WSI in den Materialsystemen GaAs, GaN, ZnO und Si synthetisiert. Für GaAs gelang es, Quantendrähte mittels der hochreinen Molekularstrahlepitaxieanlage herzustellen. Damit können die Drähte auch radial mit einer Schalenstruktur überwachsen werden, sowie Quantenpunkte entlang der Wachstumsrichtung eingebaut werden. Diese vielversprechenden Projekte befinden sich momentan noch in der Anfangsphase, werden in Zukunft aber zu einem Schwerpunkt am Institut ausgebaut.

In diesem Kapitel wurde die Bedeutung der Forschung über die Synthese von neuartigen Nano-Materialien vorgestellt. Dank des Verständnisses der Wachstumsmechanismen wurde es möglich, Methoden zur kontrollierten Herstellung von Quantenpunkten und Quantendrähten zu finden. Sie sind Basis für neuartige Bauelementkonzepte sowie für grundlegende Untersuchungen physikalischer Eigenschaften von niedrigdimensionalen Systemen.

Physik in niedrigen Dimensionen

Physik in niedrigen Dimensionen

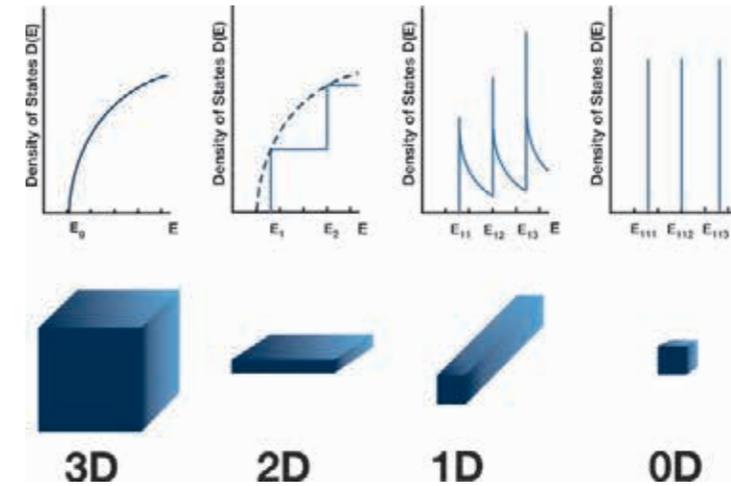
Halbleiterhetero- und -nanostrukturen sind die Basis für neuartige elektronische, optische und sensorische Bauelemente mit unterschiedlichsten Anwendungen. Häufig wird dabei der gezielte Einschluss von Ladungsträgern in eine, zwei oder gar drei Raumrichtungen ausgenutzt, d.h. Elektronen in solchen Halbleiterstrukturen können sich nur noch in zwei, in einer oder in gar keiner Raumrichtung mehr frei bewegen. Da der Einschluss auf quantenmechanischen Prinzipien basiert, spricht man von Quantisierung der Energiezustände in eindimensionalen, zweidimensionalen oder dreidimensionalen Potentialtöpfen. Die elektronischen und optischen Eigenschaften der Ladungsträger in niedrigen Dimensionen zeigen eine Vielfalt von faszinierenden physikalischen Eigenschaften, die in den vergangenen 30 Jahren weltweit ausführlich untersucht wurden. Die bekanntesten Effekte, die gefunden wurden, sind der Quantum Hall Effekt und der sog. Fraktionierte Quantum Hall Effekt, deren Entdeckung mit den Physik-Nobelpreisen für Klaus von Klitzing (1985) sowie Bob Laughlin, Daniel Tsui und Horst Störmer (1998) ausgezeichnet wurde und die weltweit einen Forschungsboom auf dem Gebiet „Physik in niedrigen Dimensionen“ ausgelöst haben. In den vergangenen 20 Jahren hat das Walter Schottky Institut in nationalen und internationalen Kooperationen wesentlich zu diesem Forschungsgebiet beigetragen, was sich in einer Vielzahl grundlegender Veröffentlichungen widerspiegelt. Im Folgenden werden einige ausgewählte physikalische Phänomene, die in niedrigdimensionalen Systemen auftreten, kurz beschrieben.



Schematische Darstellung einer Halbleiter-Heterostruktur mit einem hochbeweglichen zweidimensionalen Elektronengas

Zweidimensionale Systeme

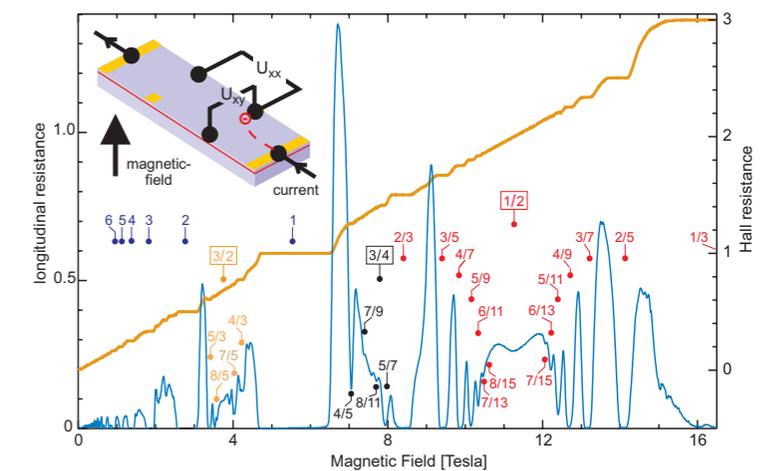
Zweidimensionale elektronische Systeme entstehen an der Grenzfläche zwischen zwei unterschiedlichen Halbleitern oder in einer dünnen Halbleiterschicht, die von Materialien mit einer größeren Energielücke umgeben sind. An den Grenzflächen entsteht eine Potentialbarriere für z.B. die Elektronen im Leitungsband, d.h. die Ladungsträger können nur in das andere Material fließen, wenn ihnen ausreichend Energie zugeführt wird. Sie sind sozusagen in der Schicht wie in einem Graben eingesperrt. Durch Maßschneiden dieser Schichten können z.B. Halbleiterlaser mit genau vorgegebener Wellenlänge realisiert werden (siehe Kapitel 8). Quasi-freie Ladungsträger im Leitungsband werden in Halbleitern durch Dotierung, dem Einbringen von Fremdatomen mit einem extra Elektron, erzeugt (siehe hierzu Kapitel 3 und 4). In dreidimensionalen Volumenhalbleitern ist die freie Bewegung der Leitungsbandelektronen aber behindert, da sie ständig an den positiv geladenen Fremdatomen stoßen, d.h. gestreut werden. Die Heteroepitaxie ermöglicht nun eine räumliche Trennung der frei beweglichen Elektronen von den Fremdatomen oder Donatoren. Wird die Dotierung nur in den Halbleiter mit großer Energielücke eingebracht, dann ist es für die Elektronen günstiger, über die Grenzfläche in den Halbleiter mit der kleineren Energielücke zu fließen. Die im Kristallgitter fest eingebauten Dotieratome bleiben positiv geladen im anderen Material zurück. Man nennt dies selektive oder Modulationsdotierung. Aufgrund ihrer positiven Ladung üben die Donatoren allerdings eine anziehende Kraft auf die in den benachbarten Halbleiter gewanderten Elektronen aus, so dass die Elektronen an der Grenzfläche der beiden Halbleiter festgehalten werden. Sie sind in

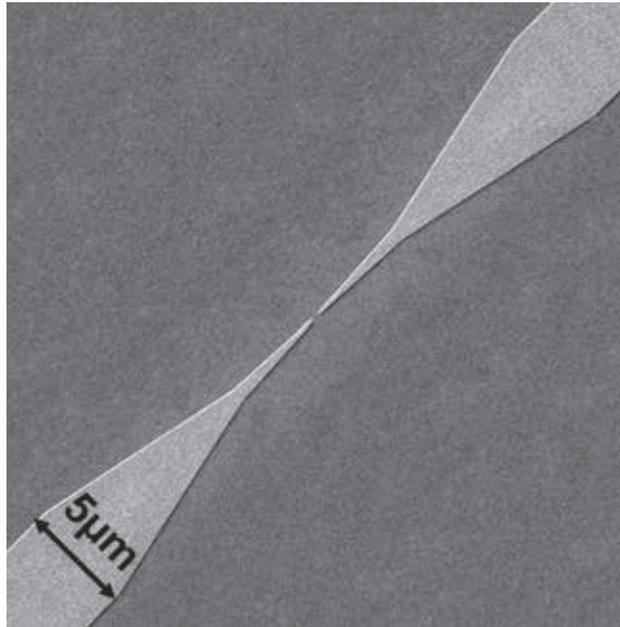


Elektronische Zustandsdichten von Halbleitern unterschiedlicher Dimensionalität

einem eindimensionalen, nahezu dreiecksförmigen Potentialtopf senkrecht zur Heterostruktur eingesperrt, können sich aber parallel zur Grenzfläche frei bewegen. Die Herstellung solcher Systeme ist in Kapitel 4 und 5 beschrieben. Da die in zwei Dimensionen nun frei beweglichen Ladungsträger räumlich von den geladenen Störstellen getrennt sind, kann, zumindest bei tiefen Temperaturen, eine sehr hohe Beweglichkeit der Elektronen erzielt werden. Das am besten untersuchte und am meisten verwendete Materialsystem basiert auf GaAs/AlGaAs. In den reinsten existierenden Proben dieser Art können sich die Elektronen bis zu einem Millimeter weit frei bewegen, ohne dass sie gestreut werden. Dies entspricht einer Erhöhung der Elektronenbeweglichkeit um einen Faktor 1000 bis 10000 gegenüber Volumenhalbleitern. Ein wichtiges Hochfrequenzbauelement, das auf dieser erhöhten Beweglichkeit basiert, ist der sog. High-Electron-Mobility-Transistor oder kurz HEMT, der als rauscharmer Eingangverstärker z.B. in Satellitenantennen und mobilen Telefonen eingesetzt wird. In hochbeweglichen zweidimensionalen Elektronensystemen wurden, insbesondere bei tiefen Temperaturen und in hohen Magnetfeldern, eine Reihe von grundlegend neuen Effekten gefunden, wie z.B. der Fraktionierte Quantum Hall Effekt. Weltweit können solche reinen und hochwertigen Proben nur in wenigen Labors hergestellt werden. Am Walter Schottky Institut wurde Mitte der 90er Jahre eine GaAs-basierte Molekularstrahlanlage für das Wachstum von hochreinen Proben installiert. Diese Anlage ist bis heute die Materialbasis für viele Projekte, in und außerhalb des Instituts, zur Untersuchung neuer grundlegender Phänomene in niedrigdimensionalen Elektronensystemen. Hochbewegliche zweidimensionale Elektronensysteme wurden am WSI außer in GaAs auch in den Halbleitern Si und GaN realisiert.

Magnetotransportexperimente an einem hochbeweglichen zweidimensionalen Elektronengas. Quantum Hall Effekt und Shubnikov-de Haas Oszillationen



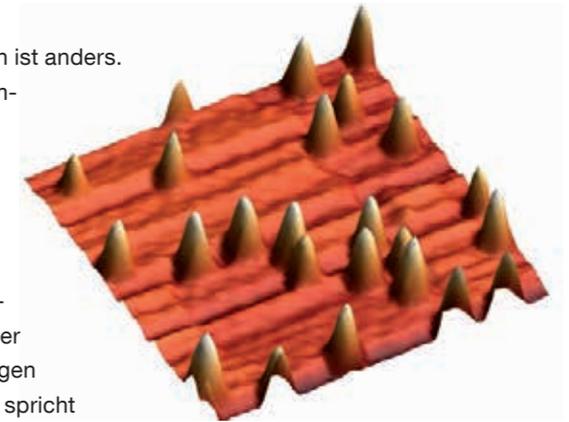


Quanten-Punktkontakt

Viele dieser neuen und faszinierenden Effekte treten insbesondere auf, wenn senkrecht zu den zweidimensionalen Elektronensystemen ein starkes Magnetfeld angelegt wird. Im Magnetfeld werden die Ladungsträger durch die Lorentzkraft auf Kreisbahnen gezwungen. Im quantenmechanischen Bild bedeutet dies, dass die Bewegung in der Ebene ebenfalls quantisiert wird, die Elektronen können sich, ähnlich wie in Atomen, nur noch auf bestimmten, zweidimensionalen Bahnen (Orbitalen) aufhalten. Bei bestimmten Magnetfeldern füllen die mit Elektronen besetzten Orbitale die gesamte Fläche der Probe aus. Anders ausgedrückt, ein quantisiertes Niveau, ein sog. Landau-Niveau ist vollständig besetzt und die Bedingungen für den Quantum Hall Effekt sind erfüllt. Das bedeutet, dass der sog. Hallwiderstand nur noch von den Naturkonstanten h , dem Planckschen Wirkungsquantum, und e , der Elementarladung abhängt. Heutzutage wird dieser elementare Widerstandswert von Klitzing-Widerstand ($R_K = h/e^2 = 24,812807 \dots k\Omega$) nach dem Entdecker des Quantum Hall Effekts benannt. Der Quantum Hall Effekt ist eine fundamentale Entdeckung, die in vielen Bereichen der Physik und auch für Anwendungen eine wichtige Rolle spielt. In den Proben mit höchster Beweglichkeit treten weitere konstante Widerstandswerte zwischen den ganzzahligen Quantum Hall Plateaus auf. Diese sog. Fraktionierten Quantum Hall Plateaus haben ihre Ursache in der Wechselwirkung der Elektronen untereinander in einem starken Magnetfeld. In den vergangenen 20 Jahren wurde dieser Effekt sowohl theoretisch als auch mit unterschiedlichsten Experimenten weltweit sehr detailliert untersucht, häufig an Proben aus dem Walter Schottky Institut.

Es zeigte sich, dass für viele beobachtete Effekte die Ränder der Proben eine wichtige Rolle für den Magnetotransport der Ladungsträger spielen, da dort sogenannte Randkanäle entstehen, in denen sich die Elektronen nur in eine Richtung bewegen können. Eindimensionale Bewegung ist grundsätzlich verschieden von Bewegung in zwei oder drei Dimensionen. Dies zeigt bereits eine einfache klassische Betrachtung. Vögel können im Flug ohne Probleme anderen Vögeln (Hindernissen) nach links oder rechts, nach oben oder unten ausweichen (dreidimensionale Bewegung). Fußballspieler können, trotz der gegnerischen Mannschaft auf dem Platz, den Ball an den Spielern vorbei zum gegnerischen Tor befördern, manchmal auch hinein (zweidimensionale Bewegung bei Flachpassspiel, dreidimensional bei hohen Pässen). Das Billardspiel basiert auf Bewegungen von Kugeln in zwei Dimensionen, wobei

natürlich die klassischen Stoßgesetze gelten. Bewegung in einer Dimension ist anders. Hat z.B. ein Zug auf einer bestimmten Strecke eine Panne, so ist der gesamte Zugverkehr auf diesem Gleis lahmgelegt. Analog verhält es sich im Straßenverkehr im Falle, dass Überholen nicht möglich ist. Ein Hindernis verursacht sofort einen Stau, alle Verkehrsteilnehmer auf diesem Straßenabschnitt „spüren“ das Hindernis (kollektive Wirkung). In gewisser Weise lässt sich dieses Verhalten auch auf den Ladungstransport in unterschiedlichen Dimensionen übertragen. In zwei und drei Dimensionen klingt die Wirkung von Hindernissen räumlich sehr schnell ab. In einer Dimension führt ein Hindernis, z. B. eine geladene Störstelle, zur vollständigen Lokalisierung der Ladungsträger. Der Stromfluss ist blockiert. Physikalisch spricht man davon, dass sich Elektronen in einer Dimension nur kollektiv verhalten können, sogar dann, wenn gar keine Hindernisse vorhanden sind. Anders ausgedrückt bedeutet dies, dass nur kollektive Anregungen möglich sind. Desweiteren zeigt es sich, dass in einer Dimension, z.B. in einem Quantendraht, eine Quantisierung des Leitwertes oder des elektrischen Widerstandes in ganzzahligen Einheiten von h/e^2 auftritt, ganz analog zum Quantum Hall Effekt, aber ohne dass ein Magnetfeld benötigt wird. Bei Veränderung der Elektronendichte im Quantendraht bleibt der Strom konstant. Tiefere Ursache hierfür ist, dass mit zunehmender Elektronenenergie die damit verbundene Geschwindigkeit der Elektronen in gleichem Maße zunimmt, wie die Zahl (Zustandsdichte) der Elektronen abnimmt. Dieses Verhalten ist fundamental in einem eindimensionalen System, d.h. wenn die Energiezustände für Elektronen in die beiden anderen Richtungen durch Potentialbarrieren stark genug quantisiert sind. Zur Beobachtung dieses Effektes ist es notwendig, dass über die Länge des Quantendrahtes hinweg ballistischer Transport vorliegt, d.h. in unserem einfachen klassischen Bild, dass keine Störung im Draht vorliegt, an der die Elektronen zurückgestreut werden. Die ersten Untersuchungen dieser Art wurden an hochbeweglichen zweidimensionalen Elektronensystemen in GaAs durchgeführt, wobei die zweidimensionale Bewegung durch spezielle Elektroden auf der Oberfläche eingeschränkt wurde. Damit ist es möglich, Punktkontakte oder Drähte in der Ebene zu definieren, durch die Elektronen nur noch in eine bestimmte Richtung fließen können (eindimensionaler Transport mit Leitwertquantisierung). Die Steuerelektroden werden üblicherweise mit Elektronenstrahlolithographie hergestellt, da die lateralen Abstände kleiner als 100 Nanometer sein müssen. Am Walter Schottky Institut wurde darüberhinaus auch die in Kapitel 5 beschriebene Methode des Überwachsens von Spaltflächen verwendet, um unterschiedliche ballistische Quantendrähte herzustellen. Bei dieser flexiblen Methode können die Längenskalen in alle Raumrichtungen durch die Epitaxie eingestellt werden. Dadurch ist keine aufwendige Lithographie erforderlich und es können sehr flexibel spezielle Geometrien realisiert werden, die Elektronentunneln in eindimensionale und zweidimensionale Elektronenkanäle ermöglichen. Elektronentunneln durch dünne Barrieren erlaubt insbesondere die Untersuchung der elektronischen Struktur der niedrigdimensionalen Ladungsträgersysteme. Ein zukünftiger Schwerpunkt ist auch die Realisierung hochwertiger Quantendrähte durch Selbstorganisation unter speziellen Epitaxiebedingungen, wie ebenfalls in Kapitel 5 diskutiert.

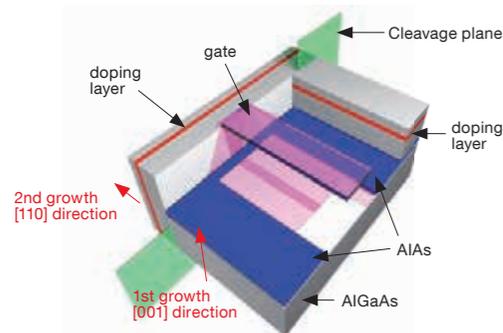


Selbstorganisierte Quantenpunkte

Schemabild eines Quantendraht-Transistors durch Überwachsen von Spaltflächen

Eindimensionale Systeme - Quantendrähte

Es zeigte sich, dass für viele beobachtete Effekte die Ränder der Proben eine wichtige Rolle für den Magnetotransport der Ladungsträger spielen, da dort sogenannte Randkanäle entstehen, in denen sich die Elektronen nur in eine Richtung bewegen können. Eindimensionale Bewegung ist grundsätzlich verschieden von Bewegung in zwei oder drei Dimensionen. Dies zeigt bereits eine einfache klassische Betrachtung. Vögel können im Flug ohne Probleme anderen Vögeln (Hindernissen) nach links oder rechts, nach oben oder unten ausweichen (dreidimensionale Bewegung). Fußballspieler können, trotz der gegnerischen Mannschaft auf dem Platz, den Ball an den Spielern vorbei zum gegnerischen Tor befördern, manchmal auch hinein (zweidimensionale Bewegung bei Flachpassspiel, dreidimensional bei hohen Pässen). Das Billardspiel basiert auf Bewegungen von Kugeln in zwei Dimensionen, wobei





Experimenteller Aufbau für spektroskopische Messungen mit hoher Ortsauflösung

Nulldimensionale Systeme - Quantenpunkte

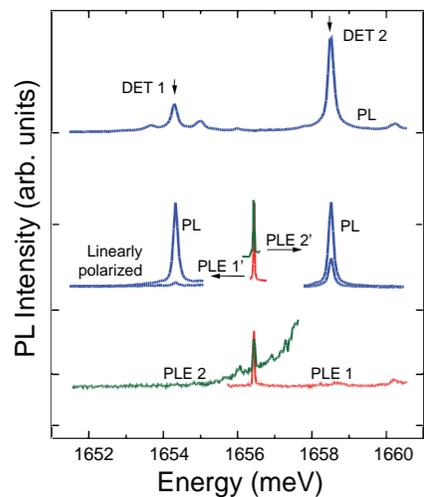
Eine weitere Einschränkung der Bewegung der Ladungsträger in alle drei Raumrichtungen auf Längenskalen deutlich unter 100 Nanometer führt zu sog. Quantenpunkten. Elektronen können sich in solchen Systemen nur noch in diskreten Energiezuständen aufhalten. Die Elektronen ordnen sich energetisch in Schalen an und in Analogie zu Atomen spricht man deshalb auch von künstlichen Atomen. Ein wichtiger Effekt, der in solch kleinen Strukturen neben der Schalenstruktur auftritt, ist die sog. Coulomb-Blockade. Dies ist ein klassischer Effekt, der auf

der elektrostatischen Abstoßung der negativ geladenen Elektronen untereinander beruht. Dies bedeutet, dass es zusätzliche Energie kostet, ein Elektron auf einen Quantenpunkt zu bringen, wenn er bereits mit einem oder mehreren Elektronen beladen ist. In Verbindung mit Tunnelkontakten und einer Steuerelektrode kann ein Quantenpunkt auch als Einzel-Elektronen-Transistor betrieben werden, der, wie schon sein Name sagt, elektrisches Schalten mit nur einem Elektron ermöglicht. Quantenpunkte erlauben allgemein die Kontrolle von einzelnen Ladungen, einzelnen Spins und einzelnen Photonen. Sie sind daher wichtige Modellsysteme für zukünftige Quanteninformationstechnologie und bilden einen Schwerpunkt der Grundlagenforschung am Walter Schottky Institut. Die Realisierung von Quantenpunkten erfolgt zum einen auf der Basis der hochbeweglichen zweidimensionalen Elektronensysteme, sowohl auf GaAs- als auch auf Si-Basis, kombiniert mit Elektronenstrahlolithographie.

Dabei werden entsprechende Steuerelektroden auf die Oberfläche aufgebracht, die es erlauben, lokal kleine Potentialminima zu erzeugen, in die gezielt einzelne Elektronen eingebracht werden können. In Verbindung mit Punktkontakten, wie sie weiter oben beschrieben wurden, können auch Testbauelemente realisiert werden, mit denen einzelne Ladungen und auch einzelne Spins (siehe Kapitel 10) auf den Inseln detektiert werden können. Die Punktkontakte in der Nähe der Quantenpunkte funktionieren dabei als empfindliche Ladungssensoren.

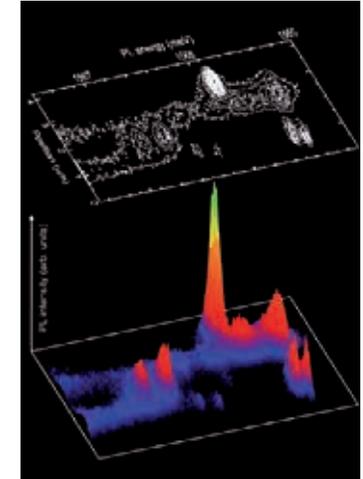
Weitere Verfahren zur Realisierung von Quantenpunkten sind die in Kapitel 5 beschriebenen Methoden des Überwachsens von Spaltflächen sowie die Selbstanordnung und Selbstorganisation in Halbleitern mit Gitterfehlanpassung wie z.B. InAs auf GaAs. Solche Quantenpunkte sind insbesondere für optische und kohärente Kontrolle von Ladungen, Spins und Photonen interessant, da sie auch eine hohe optische Effizienz aufweisen. Am WSI wurde eine Reihe von Pionierarbeiten auf dem Gebiet der optischen Spektroskopie an einzelnen und gekoppelten Quantenpunkten durchgeführt. Bereits Anfang der 90er Jahre wurde weltweit erstmalig die Lumineszenz von einem einzelnen Quantenpunkt nachgewiesen. Lumineszenz ist die

Lichtemission nach Anregung mit einem Laser. Dabei werden, wie in Kapitel 3 beschrieben, durch Absorption von Lichtquanten des Laserstrahls Elektronen von besetzten Valenzbandzuständen in die leeren Leitungsbandzustände angehoben und die Lichtabstrahlung nach

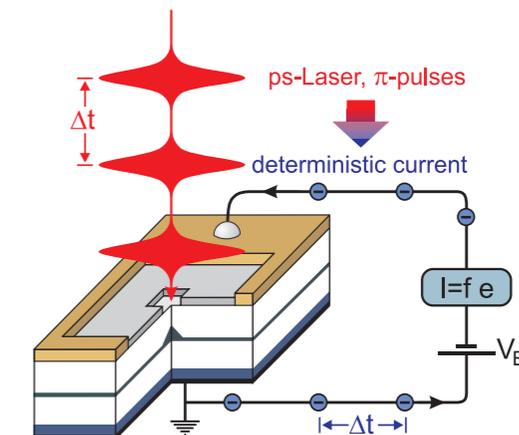
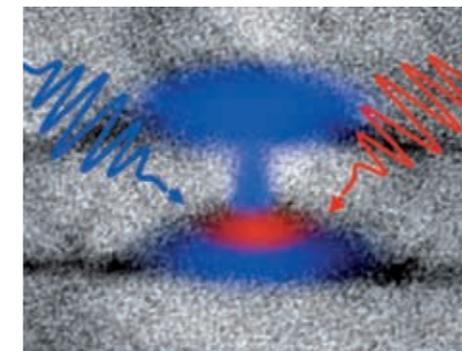


Erste Messungen der Exziton und Bi-Exziton Lumineszenz von einem einzelnen Quantenpunkt - eine der Pionierarbeiten des WSI

deren Rekombination gemessen. Um einzelne Quantenpunkte spektroskopisch untersuchen zu können, benötigt man Apparaturen mit höchster Ortsauflösung. Am WSI wurden solche Systeme durch sog. konfokale Mikroskopie und mittels Nahfeldoptik realisiert. Die Rekombination der Elektronen mit den Löchern im Valenzband hängt charakteristisch von den Energiezuständen des Halbleiters ab. In Quantenpunkten sind diese Zustände, wie oben beschrieben, diskret und, ähnlich wie in Atomen, führt dies zu sehr scharfen Spektrallinien. Ein Elektron-Loch-Paar bildet vor dem „Zerstrahlen“ wegen der Coulomb Anziehung ein sog. Exziton, analog zu einem Wasserstoffatom. Die Wellenlänge (Farbe) des emittierten Lichts hängt nun sehr empfindlich von der Besetzung des Quantenpunktes mit Elektronen und / oder Löchern ab. Zum Beispiel bilden zwei Elektronen und zwei Löcher im Quantenpunkt ein sog. Bi-Exziton, analog zu einem Wasserstoffmolekül, das wegen der Wechselwirkung der Ladungsträger untereinander typischerweise eine rotverschobene Emission zeigt. Auch ein zusätzliches Elektron im Quantenpunkt resultiert in einer charakteristischen Wellenlänge des nun geladenen Elektron-Loch-Paares. Die Beladung kann gezielt durch Einbettung des Quantenpunktes in eine Diode eingestellt und kontrolliert werden. Die Kontrolle einzelner Ladungen ist Basis für Quantenbauelemente. Die Pionierarbeiten, die hierzu am Walter Schottky Institut durchgeführt wurden sind vielfältig und umfassen z.B. die Speicherung einzelner Ladungsträger, die Nutzung gespeicherter Ladungsträger für empfindliche Infrarot-Detektoren, die Kontrolle und Speicherung von einzelnen Spinzuständen mit Hilfe von zirkular polarisiertem Licht, die Beobachtung der resonanten Kopplung von zwei Quantenpunkten, der Nachweis einzelner Elektron-Loch-Paare mittels Photostrom („kleinste Solarzelle der Welt“), die kohärente Kontrolle dieses Photostroms und vieles mehr. Für diese Messungen kamen unterschiedliche Quantenpunkte zum Einsatz, die meist weltweit erstmalig, am WSI hergestellt wurden. Diese umfassen: dünne zweidimensionale GaAs Potentialtöpfe mit Dickenfluktuationen, gekoppelte Quantenpunkte hergestellt durch doppeltes Überwachsen von Spaltflächen, und insbesondere selbstorganisierte Quantenpunkte im InAs/GaAs- und Ge/Si-Materialsystem.



Photolumineszenz von gekoppelten Quantenpunkten



Links: Kohärente Kontrolle von gekoppelten Quantenpunkten
Rechts: Schematische Darstellung einer Einzel-Quantenpunkt-Photodiode



Nano-Photonik in der Natur.
Die intensiv blau schimmernden
Flügel eines Morpho-Schmetter-
lings entstehen durch periodisch
angeordnete Streuzentren auf
der Flügeloberfläche.

Bild: Fotolia

Nano-Photonik

In den Nano-Wissenschaften wird Optik oft unter dem Überbegriff Nano-Photonik eingeordnet. Das Forschungsgebiet hat das Ziel, die Wechselwirkung von elektromagnetischer Strahlung (Licht bzw. Photonen) mit Festkörpern, die eine Ausdehnung von der Größenordnung der Lichtwellenlänge haben, zu verstehen und zu aufzuzeigen, wie diese Licht-Materie-Wechselwirkung durch ein Maßschneidern der chemischen und physikalischen Eigenschaften des Festkörpers kontrolliert werden kann. Nano-photonische Systeme aus Halbleiter-Quantenpunkten (die auch als „künstliche Atome“ angesehen werden können) haben typischerweise Ausdehnungen von einigen Nanometern. Im Falle von Nanodrähten oder Nanoröhren betragen die Ausdehnungen bis zu einigen hundert Nanometern. Diese Ausdehnungen entsprechen dem Wellenlängenbereich der Lichtquanten, die mit den Halbleiterstrukturen wechselwirken. Erst in den letzten 20 Jahren und somit etwa seit der Gründung des Walter Schottky Instituts stehen Nano-Fabrikationsmethoden wie Elektronstrahl- und Nano-Imprint-Lithographie, direktes Laser-Schreiben und holographische Interferenz-Lithographie zur Verfügung. Diese Methoden geben den Forschern Werkzeuge an die Hand, um in kontrollierter Art und Weise halbleitende Materialien auf Längenskalen kürzer als der Wellenlänge des Lichts zu strukturieren und damit neue, verblüffende optische Phänomene zu entdecken und auszunutzen. Zusammen mit neuartigen Herstellungsmethoden für Lichtquellen im Nanometerbereich, wie etwa chemische Synthese und Selbstorganisation, eröffnet sich eine faszinierende und reichhaltige Palette an photonischen und elektronischen Nano-Materialien, die ein vielversprechendes Potential für Anwendungen im Bereich Optik, Informationstechnologie und Ingenieurwissenschaften bieten.

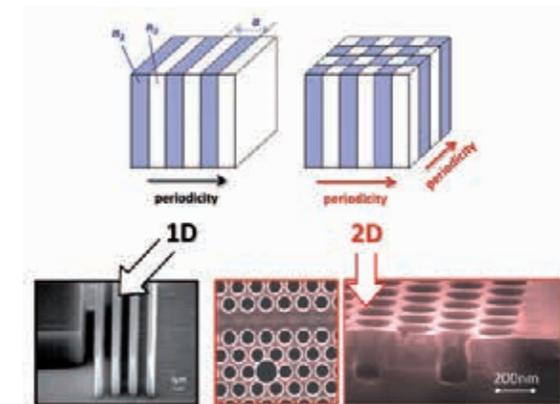
Allerdings sind viele der nano-photonischen Effekte, die in den letzten Jahren in anorganischen Systemen realisiert und untersucht wurden, bei weitem nicht neu, da die Natur diese Phänomene zum Teil schon seit Millionen von Jahren benutzt und optimiert. So entsteht die ausgeprägte, schillernd blaue Farbe der Flügel des Morpho-Schmetterlings („Morpho-rhetenor“) durch periodische Licht-Streuzentren auf der Flügeloberfläche, die kleiner als ein Mikrometer sind. Weitere Beispiele sind die komplexen und hoch-optimierten photochemischen Reaktionen der Photosynthese, mit deren Hilfe lebende Organismen die Energie des Lichtes für sich nutzbar machen und speichern, als auch viele Arten von Insekten, die die Reflexion auf der Oberfläche ihrer Facettenaugen durch spezielle optische Tricks vermindern. Jede dieser natürlich vorkommenden Erscheinungen kann mit Nanostrukturen künstlich nachgebildet werden und die Optimierung dieser Phänomene für bestimmte technische Anwendungen ist Hauptziel der Halbleiter-Nano-Photonik.

Photonische Kristalle

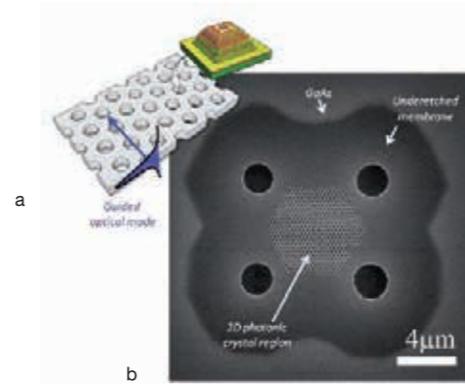
Ein Beispiel einer künstlichen nano-photonischen Struktur, die seit mehreren Jahren aktiv am Walter Schottky Institut untersucht wird, ist ein sog. photonischer Kristall. Diese Nanostrukturen, die im Jahr 1987 zeitgleich von Eli Yablonovitch und Sajeev John vorgeschlagen wurden,

setzen sich aus periodisch angeordneten unterschiedlichen Materialien mit abwechselnden optischen Eigenschaften zusammen. Das Konzept eines photonischen Kristalls basiert auf der Idee eines sog. Bragg-Spiegels, wobei kohärente Streuung und Interferenz von Photonen zur Folge haben, dass sich Licht bestimmter Wellenlängen im photonischen Kristall nicht ausbreiten kann. Diese verbotenen Wellenlängenbereiche sind bekannt als photonische Bandlücken und trennen Wellenlängenbereiche, für die sich Licht innerhalb des Kristalls fortpflanzen kann (photonische Bänder). Solch mehrlagige Bragg-Spiegel werden von Forschern am Walter Schottky Institut benutzt, um hoch-reflektierende Spiegel in „vertical cavity surface emitting lasers“ (VCSEL) zu verwirklichen, wie in Kapitel 8 dieser Broschüre diskutiert. In einer VCSEL-Struktur schwingt Licht innerhalb eines optischen Resonators, der von zwei Spiegeln mit extrem hoher Reflexion (>99%) gebildet wird. Derartige eindimensionale photonische Kristalle in VCSEL-Strukturen bestehen aus abwechselnden Lagen dünner Schichten zweier Halbleiter mit unterschiedlichem Brechungsindex, die mit Hilfe von modernen Epitaxie-Methoden (Kapitel 4) abgeschieden werden können.

Während eindimensionale photonische Kristalle direkt mittels Halbleiterheterostrukturen realisiert werden können, muss in zweidimensionalen photonischen Kristallen der Brechungsindex in zwei örtlichen Richtungen periodisch variieren. Diese Strukturen können gezielt durch periodische Anordnung von zylindrischen Luftlöchern in einem Halbleiter hergestellt werden, wobei man das Bauteil auf Nanometer-Skala mit Hilfe von Elektronstrahl-Lithografie und reaktivem Ionen-Ätzen strukturiert. Um photonische Bandlücken im sichtbaren bzw. nah-infraroten Bereich des optischen Spektrums zu erhalten, werden für die Löcher Radien von etwa 100 Nanometern und überaus glatte Seitenwände mit einer Rauigkeit in der Größenordnung von 10 Nanometern benötigt. Der Abstand zwischen den Löchern muss zwischen 150 und 300 Nanometern liegen. Um die notwendigen engen Toleranzen garantieren zu können, sind extrem präzise Nano-Fabrikationstechniken notwendig. Forscher am Walter Schottky Institut stellen diese zweidimensionalen photonischen Kristalle seit mehreren Jahren aus „Silicon on Insulator“ (SOI), GaInAs/GaAlAs- und GaAlnP-Halbleitersystemen her. Zweidimensionale



Eindimensionale photonische Kristalle werden gewöhnlich für hoch-reflektierende Spiegel in Halbleiter-Lasern verwendet. Zweidimensionale photonische Kristalle werden in einer Vielzahl von nano-photonischen Bauelementen wie etwa Wellenleitern, optischen Resonatoren, Prismen oder Strahlteilern verwendet.



(a) Ein zweidimensionaler photonischer Kristall aus einer dünnen Halbleitermembran, in die Quantenpunkte als Lichtemitter integriert sind. (b) Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme einer am Walter Schottky Institut hergestellten Photonischen-Kristall-Membran aus GaAs/AlGaAs.

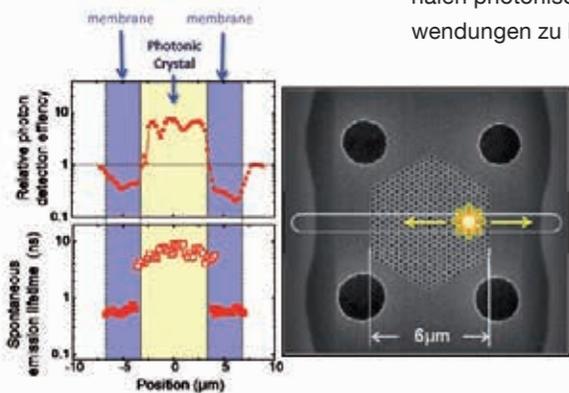
photonische Kristalle bestehen typischerweise aus einer dünnen, freistehenden Halbleitermembran (z.B. aus Silizium oder GaAs), in der eine periodische Anordnung von Luftlöchern den zweidimensionalen photonischen Kristall bildet. Das emittierte Licht wird durch Totalreflexion an der oberen und unteren Halbleiter-Luft-Grenzschicht in der Membran eingeschlossen und in der Ebene der Membran durch Wechselwirkung mit dem photonischen Kristall stark verändert.

Kontrolle der Lichtemission

Zur Verdeutlichung einiger der neuartigen und ungewöhnlichen Effekte, die in zweidimensionalen photonischen Kristallen auftreten können, und um einige der daraus resultierenden Anwendungen zu beschreiben, konzentrieren wir uns auf eine spezielle Halbleiterheterostruktur,

welche aus einer dünnen $Al_{0.8}Ga_{0.2}As$ -Schicht besteht, auf die ein GaAs-Wellenleiter mit einer Dicke in der Größenordnung der Lichtwellenlänge gewachsen wurde. Ein zweidimensionaler photonischer Kristall wird in der Halbleiterstruktur erstellt und die $Al_{0.8}Ga_{0.2}As$ -Schicht, die als Opferschicht dient, wird entfernt, um die dünne freistehende Membran zu bilden. In diesen Experimenten enthält die optisch aktive Region des GaAs-Wellenleiters typischerweise eine einzelne Lage von selbstorganisierten InGaAs-Quantenpunkten (Kapitel 5), die als integrierte Lichtquellen dienen, wenn sie mit einem Laser angeregt werden. Die Bestimmung der Intensität und der Richtung des emittierten Lichts dieser eingebetteten Quantenpunkte

ermöglicht die Untersuchung der lokalen optischen Eigenschaften des photonischen Kristalls und somit auch sein Maßschneidern für bestimmte Anwendungen. Die durchschnittliche Zeit, die ein angeregter Quantenpunkt benötigt, um ein Lichtquant oder Photon zu emittieren, die sogenannte spontane Emissionszeit, verlängert sich in der photonischen Bandlücke um mehr als eine Größenordnung und zeigt somit, dass photonische Kristalle auf grundlegende Art und Weise die Lichtemission von Quantenpunkten verändern. Detaillierte Untersuchungen haben gezeigt, dass mehr als zehn mal so viel Licht aus einer Halbleitermembran mit photonischem Kristall extrahiert werden kann als aus einem unstrukturierten System. Derartige Materialien mit photonischer Bandlücke sind somit besonders nützlich, um die Effizienz der

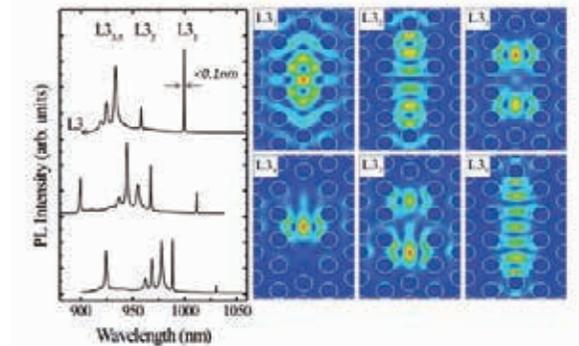


Die starke Verlängerung der spontanen Emissionszeit und die damit einhergehende drastische Erhöhung der Auskoppelleffizienz des vom Quantenpunkt ausgesandten Lichts sind auf die Existenz der zweidimensionalen photonischen Bandlücke zurückzuführen.

Lichtauskopplung in Leuchtdioden zu erhöhen und werden deshalb auch von der Industrie verwendet, um hocheffiziente optoelektronische Bauteile herzustellen.

Lichteinschluss in photonischen Kristallen

Durch gezieltes Verändern der Größe eines einzigen Luftlochs innerhalb eines zweidimensionalen photonischen Kristalls stört man die nahezu perfekte Translationssymmetrie des Kristalls und erzeugt somit eine winzige Region, in der Licht eingesperrt werden kann. Ein derartiger Defekt stellt somit einen wenige Nanometer großen optischen Resonator dar, dessen Kantenlänge bis in die Nähe der fundamentalen Grenze verringert werden kann, die eine halbe Wellenlänge beträgt. Ein Beispiel sind die sogenannten „L3-Defekt“-Resonatoren, deren Name von der Tatsache herrührt, dass der Resonator aus drei fehlenden Luftlöchern besteht. Optischen Messungen zeigen sechs ausgeprägte Maxima, die den verschiedenen Resonanzwellenlängen des Resonators zugeordnet werden können, wobei das Licht auf der Längenskala von wenigen hundert Nanometer lokalisiert ist. Diese Photonischen-Kristall-Resonatoren erlauben die Umsetzung etablierter Techniken der klassischen Quantenoptik auf der Basis von Ionen oder Atomen in festkörperbasierte Systeme. Beispiele umfassen den sog. Purcell-Effekt, der zu einer drastischen Erhöhung der spontanen Emissionsrate in die Resonator-Mode führt. Damit wird Licht in wirksamer Art in eine bestimmte Richtung emittiert und ermöglicht somit die Realisierung hocheffizienter Laser auf Nanometer-Skala. Diese sogenannten schwellenlosen Laser erlauben die Laserwirkung bei extrem niedrigen Injektionsströmen und haben somit viel geringeres Rauschen als herkömmliche Halbleiter-Laser, wie sie z.B. in CD- und DVD-Spielern zu finden sind.

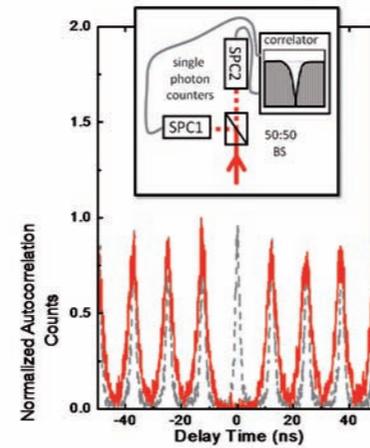


Defektoresonatoren aus fehlenden Löchern weisen sehr kleine Modenvolumina und zugleich sehr schmale spektrale Linienbreiten auf, die zu ausgeprägten quantenoptischen Effekten führen.

Ein Photon pro Zeiteinheit

Eine weitere Technologie, die von der Nutzung sog. cavity-QED-Phänomene profitiert hat, sind Lichtquellen, die auf Anforderung einzelne Lichtquanten emittieren. Derartige Einzelphotonenquellen sind die Grundlage für viele zukunftssträchtige Technologien wie die Quantenkryptographie, die das Senden und Empfangen von geheimen Schlüsseln ausnutzt, die auf der Grundlage der quantenmechanischen Eigenschaften einzelner Photonen geschützt sind. Obwohl sichere „quantum key distribution“-Systeme basierend auf sehr schwachen konventionellen Laserpulsen bereits kommerziell erhältlich sind, erlauben sie jedoch bisher nur den Schlüsselaustausch über kurze optische Distanzen von etwa 10 bis 100 km, da ein Großteil der Laserpulse gar keine Photonen enthält. Eine echte Einzelphotonenquelle hingegen, die exakt ein Photon pro Puls liefert, würden die Leistungsfähigkeit solcher „quantum key distribution“-Systeme beträchtlich steigern und es somit ermöglichen, Schlüssel über lange

Schematische Darstellung eines Hanbury-Brown-Twiss-Korrelationsperiments zum Untersuchen der zeitlichen Statistik von Photonen. Der Graph zeigt Messungen der Photonen-Statistik einer Einzelphotonenquelle basierend auf einem einzelnen Quantenpunkt in einem Photonischen-Kristall-Defektoresonator (rote Kurve), wobei das fehlende Maximum bei einer Verzögerungszeit von 0 Nanosekunden die Emission von einzelnen Photonen kennzeichnet.



optische Wege mit absolutem Schutz gegenüber Lauschangriffen zu übertragen. Die beiden Hauptleistungsmerkmale derartiger „getriggert“ Einzelphotonenquellen sind ihre Effizienz, pro Trigger-Puls genau ein einzelnes Photon auszusenden, sowie die Wahrscheinlichkeit, mehr als ein Photon pro Puls auszusenden.

Einzelne Quantenpunkte senden je ein einzelnes Photon nach dem anderen aus und die Effizienz dieses Vorganges steigt durch Einbau in einen zweidimensionalen photonischen Kristall stark an. Um zu verstehen, wie dies geschieht, betrachten wir im Folgenden die Lichterzeugung durch einzelne InGaAs-Quantenpunkte, die in einen photonischen Kristall aus GaAs eingebettet sind. Da InGaAs eine kleinere Bandlücke als GaAs aufweist, stellen Quantenpunkte ein Potentialminimum für Elektronen und Löcher zugleich dar – die negativ bzw. positiv geladenen Teilchen, die für den Transport des elektrischen Stroms verantwortlich sind und durch Annihilation im Halbleiter Licht erzeugen. In genügend kleinen Quantenpunkten können jeweils nur zwei Elektronen und zwei Löcher vorhanden sein, weitere Ladungen würden aus dem Quantenpunkt ins angrenzende GaAs „abfließen“. Falls wir nun den Quantenpunkt mit einem wenige Pikosekunden kurzen Laserpuls (1 Pikosekunde = 0,000 000 000 001 Sekunden) anregen, füllen sich dessen Energieniveaus schnell mit zwei Elektron-Loch-Paaren. Nachdem der Quantenpunkt gefüllt wurde, zerfallen diese Elektron-Loch-Paare in zwei Photonen mit unterschiedlicher Wellenlänge oder Farbe. Zuerst annihiliert eines der Elektronen mit einem der Löcher, wobei ein Photon mit einer bestimmten Wellenlänge (λ_{2e-2h}) entsteht. Dieser Prozess hinterlässt ein einzelnes Elektron-Loch-Paar im Quantenpunkt, welches

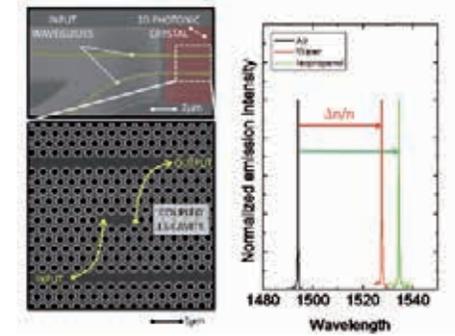
anschließend während einer Zeitspanne von einer Nanosekunde selbst annihiliert und dabei ein zweites Photon mit unterschiedlicher Wellenlänge (λ_{1e-1h}) erzeugt. Die beiden vom Quantenpunkt emittierten Photonen weisen dabei eindeutige Wellenlängen auf, die durch die Coulomb-Wechselwirkung zwischen den geladenen Elektronen und Löchern im Quantenpunkt entstehen. Da die Zeit, die benötigt wird, um den Quantenpunkt mit zwei Elektronen und Löchern zu füllen, viel kürzer ist als die Zeit bis zur Entstehung der beiden Photonen, wird pro Anregungspuls genau ein Photon bei jeder der beiden Wellenlängen λ_{2e-2h} und λ_{1e-1h} erzeugt. So emittiert ein Quantenpunkt pro Anregungspuls ein und nur ein 1e-1h-Photon, der Quantenpunkt stellt eine deterministische Einzelphotonenquelle dar.

Forscher am Walter Schottky Institut betteten einzelne Quantenpunkte in zweidimensionale Photonische-Kristall-Defektoresonatoren, um damit hocheffiziente Einzelphotonenquellen zu realisieren. Derartige Lichtquellen weisen eine um den Faktor 20 gesteigerte Effizienz im Vergleich zu ähnlichen, nicht an einen Nano-Resonator gekoppelte Quantenpunkte auf. Zur genauen Analyse der Eigenschaften solcher einzelner Quantenpunkte, die spektral und örtlich an die Mode eines Photonischen-Kristall-Defektoresonators gekoppelt sind, wird die zeitliche Statistik der emittierten Photonen des 1e-1h-Übergangs mit der Statistik der Photonen eines Lasers bei ähnlicher mittlerer Intensität verglichen und in einem Histogramm aufgetragen, dass die Zeitdifferenzen zwischen Start- und Stop-Ereignissen wiedergibt. Die Messungen dazu erfolgen mit Hilfe eines sogenannten Hanbury-Brown-Twiss-Einzelphotonen-Korrelationsexperimentes.

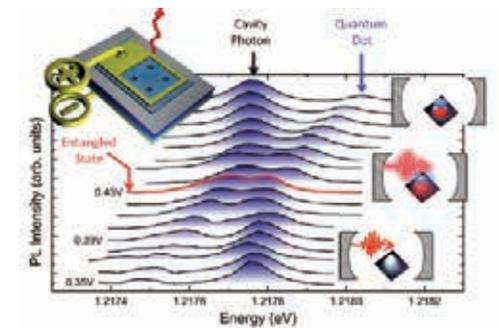
In diesem Experiment werden die Photonen auf einen Strahlteiler geschickt, der die Lichtquanten mit jeweils 50%iger Wahrscheinlichkeit reflektiert oder transmittiert. Durch Verwendung von extrem empfindlichen Einzelphotonendetektoren an jedem der beiden Ausgänge des Strahlteilers, von denen einer einen Zähler startet und der zweite diesen stoppt, stellen die aufgenommenen Ereignisse ein Histogramm der Zeitspannen zwischen Start- und Stopppuls der Lichtquelle dar. Für eine echte Einzelphotonenquelle gilt nun, dass pro Zeiteinheit am Strahlteiler nur ein Photon ankommt und es somit nicht möglich ist, dass beide Detektoren gleichzeitig ein Start- und Stoppereignis anzeigen. Daher sollte die sog. Koinzidenzzählrate bei einer Zeitdifferenz von 0 Nanosekunden zwischen Start- und Stoppereignis verschwinden. Im Gegensatz dazu sind bei anderen Zeiten Koinzidenzmaxima vorhanden, da es dort möglich ist, dass ein einzelnes Photon den Zähler startet und ein Photon z.B. im nächsten Anregungszyklus den Zähler stoppt. Im Fall von Pulsen, die mehrere Photonen beinhalten, ist die Situation grundverschieden: Hier ist es nun möglich, gleichzeitig ein Start- und Stoppphoton zu detektieren, wodurch man für Anregungen des System mit einem Laserpuls ein Maximum bei 0 Nanosekunden im Histogramm erhält. Für eine Einzelphotonenquelle ist das Maximum bei einer Verzögerungszeit von 0 Nanosekunden aber komplett unterdrückt. Dieses Ergebnis bestätigt, dass eine derartige nicht-klassische Lichtquelle deterministisch immer nur ein Photon nach dem anderen erzeugt. Die besten am Schottky Institut hergestellten Einzelphotonenquellen emittieren einzelne Photonen mit einer externen Quanteneffizienz von mehr als 20% bei Wiederholraten von 80 MHz. Diese Werte entsprechen dem weltweit aktuellen Stand der Technik für festkörperbasierte Einzelphotonenquellen und würden somit die verlustfreie Übertragung von quantenkryptographischen Schlüsseln über optische Fasern drastisch verbessern.

Lebt die Katze oder lebt sie nicht?

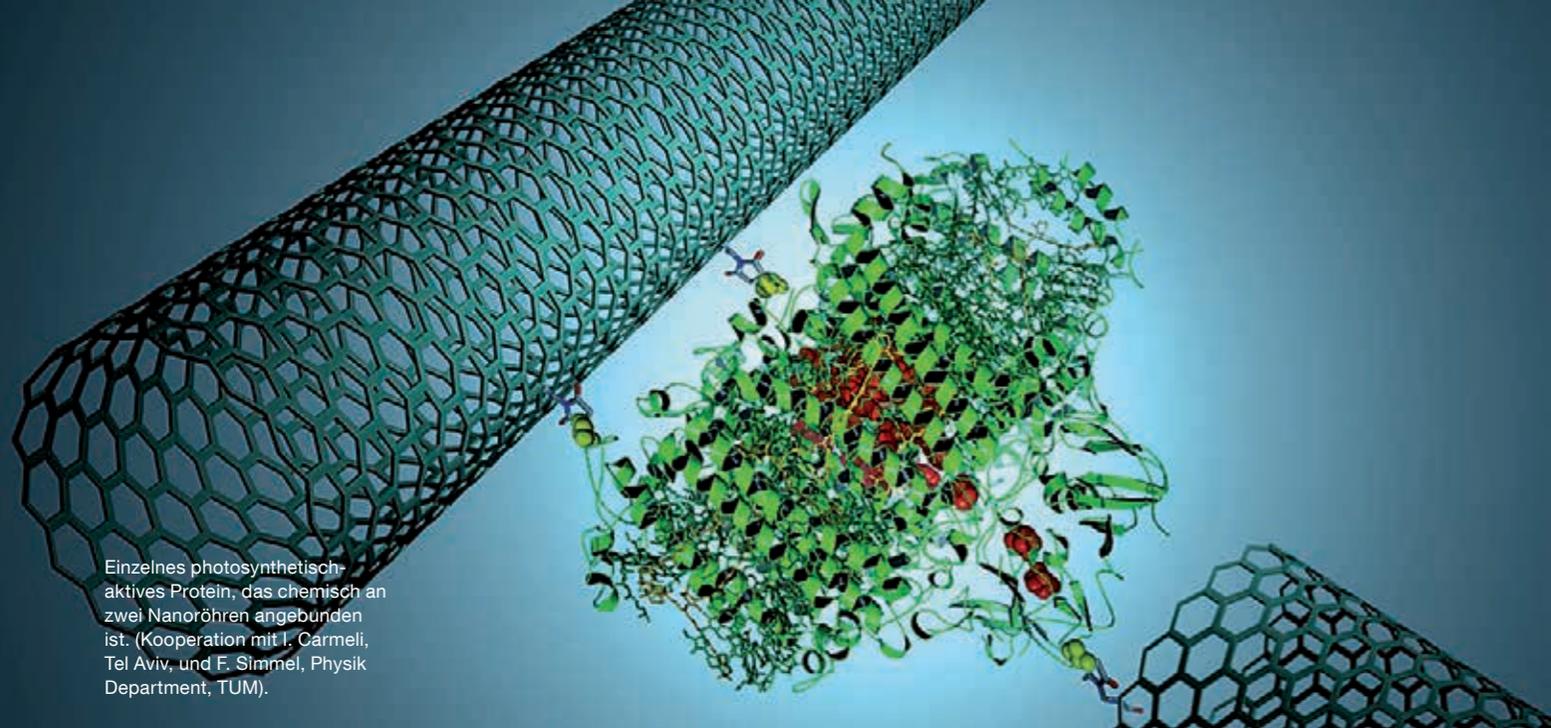
Eine bessere Qualität des optischen Nano-Resonators erlaubt es, einzelne Photonen für längere Zeiten im Resonator einzuschließen, bevor diese ihn wieder verlassen können. Ab einem bestimmten Punkt werden die vom Quantenpunkt erzeugten einzelnen Photonen hinreichend lange im Resonator eingeschlossen, um sogar vom Quantenpunkt wieder absorbiert zu werden. Hierdurch wird Energie periodisch zwischen Quantenpunkt und Resonator ausgetauscht. Dieser Prozess wird Vakuum-Rabi-Oszillation genannt und koppelt das Photonen-Feld des Resonators an den 1e-1h-Übergang im Quantenpunkt. Der Emittor und das Photon stellen einen speziellen und besonders nützlichen quantenmechanischen Zustand dar, der weder Photon noch Elektron-Loch-Paar, sondern eine besondere quantenmechanische Mischung aus beiden ist. Die Situation ist ähnlich der des Gedankenexperiments von Schrödingers Katze, welches durch Erwin Schrödinger, einem der Entdecker der Quantenmechanik, berühmt wurde. In diesem Experiment ist eine unglück-



Rasterelektronenmikroskopische Abbildung einer Photonischen-Kristall-Nanostruktur, die für optische Sensorik entwickelt wurde. Das Bauteil besteht aus zwei Wellenleitern, die innerhalb eines zweidimensionalen photonischen Kristalls definiert wurden und die durch einen Defektoresonator miteinander gekoppelt sind. Kleinste Verschiebungen der Resonanzwellenlänge des Resonators bieten eine hochempfindliche und lokale Messgröße um Gase, Flüssigkeiten und Biomoleküle auf der Sensoroberfläche optisch zu detektieren.



„Schrödingers Katzen“-Experiment im Festkörper basierend auf der starken Wechselwirkung von Licht und Materie in elektrisch kontaktierten Photonischen-Kristall-Defektoresonatoren. Die quantenmechanische Verschränkung zwischen Quantenpunkt und Resonator kann durch Anlegen einer elektrischen Spannung an- bzw. ausgeschaltet werden.



Einzelnes photosynthetisch-aktives Protein, das chemisch an zwei Nanoröhren angebunden ist. (Kooperation mit I. Carmeli, Tel Aviv, und F. Simmel, Physik Department, TUM).

liche Katze in einer Kiste eingesperrt und existiert in einem „schwebenden“ quantenmechanischen Zustand, wobei sie zugleich lebt und tot ist, solange keine Messung durchgeführt wird, d.h. nach ihr geschaut wird. Der zu gleichen Teilen Elektron-Loch-Paar- als auch Photonen-Charakter aufweisende Zustand in dem Experiment, dass am Walter Schottky Institut durchgeführt wurde, ist somit ein Festkörper-Analogon zu Schrödingers Katze. Dieses Experiment ist wichtig für aktuelle Forschungsgebiete wie etwa Quanteninformationsverarbeitung auf der Basis von Photonen oder die Versendung von quantenmechanischen Zuständen durch den Austausch verschränkter Photonen über weite Distanzen. Kürzlich konnte zudem gezeigt werden, dass es eine elektrische Kontaktierung der Photonischen-Kristall-Defektoresonatoren erlaubt, die Verschränkung solcher Zustände an- und auszuschalten.

Nano-photonische Sensoren

Nano-photonische Systeme auf Halbleiterbasis können außerdem als Sensoren benutzt werden. So können z.B. kleinste Änderungen des Brechungsindex in winzigen Volumina von Gasen oder Flüssigkeiten (kleiner als 1 Femtoliter) anhand der Änderung der optischen Eigenschaften der Nanostrukturen nachgewiesen werden. Es ist sogar möglich,

die Anwesenheit einzelner metallischer oder halbleitender Nanopartikel oder selbst einzelner biologischer Moleküle wie etwa Proteinen, DNS oder Viren optisch zu detektieren. Fluoreszenzmarker-freie optische Biosensorik stellt ein sehr schnell wachsendes Forschungsgebiet mit zahlreichen möglichen Anwendungen in medizinischer und klinischer Diagnostik, in der pharmazeutischen Entwicklung und in der Grundlagenforschung dar. Der gezielte Nachweis bestimmter Biomoleküle wie etwa DNS und Proteinen oder der Reaktionen von Antikörpern mit Antigenen ohne Verwendung von radioaktiven oder fluoreszierenden Markern würde so viele Vorsorgeuntersuchungen deutlich vereinfachen und empfindlicher gestalten. Weiterhin würde ein solches Verfahren die Untersuchung der Dynamik solcher Moleküle in Echtzeit ohne eine Beeinflussung durch Marker erlauben. Die am weitesten verbreitete Methode für marker-freie, optische Biosensorik ist der Nachweis über Änderungen der optischen Eigenschaften einer metallischen Oberfläche. Diese etablierte Technik benötigt jedoch typischerweise Flächen in der Größenordnung von Quadratmillimetern und ist somit nur schwer auf miniaturisierte „lab on a chip“-Anwendungen übertragbar. Wir haben zuvor bereits gesehen, dass photonische Kristalle die Kontrolle von Licht in winzigen Nano-Resonatoren ermöglichen. Für Anwendungen in der Biosensorik kann Licht auch in Photonischen-Kristall-Chips geführt werden, indem durch Weglassen einer langen

Reihe von Luftlöchern eine „Nano-Leiterbahn“ für Licht, ein sogenannter Wellenleiter realisiert wird. Zweidimensionale photonische Kristalle auf Siliziumbasis eignen sich hervorragend für solche „on-Chip“-basierte Biosensorik, da Silizium ungiftig ist und mit hoher Präzision bearbeitet werden kann. Forscher am Walter Schottky Institut verwenden solche Silizium-basierte photonische Kristalle, um empfindliche optische Biosensoren zu entwickeln. Ein Beispiel sind Photonische-Kristall-Chips aus SOI, in denen ein Defektoresonator in der Mitte zwischen zwei Photonischen-Kristall-Wellenleitern die Übertragung von Licht von einem Wellenleiter zum anderen erlaubt. Die Resonanzwellenlänge des Resonators reagiert extrem empfindlich auf kleinste lokale Änderungen der dielektrischen Konstante z.B. durch das Vorhandensein einzelner Biomoleküle in dessen Nähe, die zu Veränderungen der Übertragung des Lichtes zwischen den Wellenleitern führt. Der gesamte Chip wirkt daher als hochempfindlicher optischer Sensor.

Nano-photonische Hybridsysteme

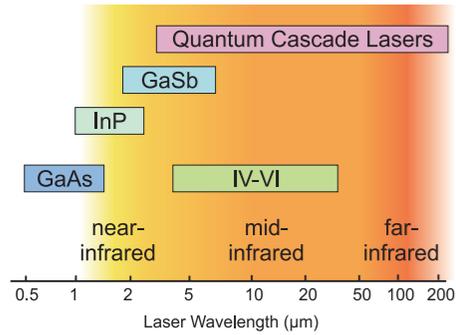
Um das Potenzial von organischen und anorganischen Nanosystemen wie Molekülen, Nanokristallen, Kohlenstoffnanoröhren und photosynthetischen Proteinen für optoelektronische Anwendungen ausschöpfen zu können, müssen derartige Nanosysteme verlässlich elektronisch kontaktiert werden können. Forscher des Walter Schottky Instituts untersuchen dazu die Möglichkeit, neuartige photoelektrische Systeme zu realisieren, die aus organischen und inorganischen Komponenten bestehen. Solche hybride Nanostrukturen können durch ausgefeilte Nanofabrikationstechniken wie chemische Funktionalisierung oder Selbstassemblierung und Nanostrukturierungsmethoden auf der Basis fokussierter Elektronen- bzw. Ionenstrahlen hergestellt werden. Die Integration einzelner Moleküle in solche hybride Nanosysteme erlaubt, hochempfindlich ihre Wechselwirkung mit der Umgebung zu studieren und zu kontrollieren. Ein

Beispiel stellt die Messung der Photoleitfähigkeit einzelner Moleküle dar, die Informationen über die optischen Anregungen der Moleküle, über Ladungs- und über Wärmetransport in ihnen gibt. Ferner können mit Hilfe solcher Messungen der ballistische Transport ohne Energieverlust sowie Spinphänomene in hybriden Nanosystemen detailliert studiert werden. Ein Schwerpunkt der Untersuchungen am Walter Schottky Institut stellt die Integration von Molekülen in größere Schaltkreise dar, wie z.B. die direkte chemische Verknüpfung von photosynthetischen Reaktionszentren mit Kohlenstoff-Nanoröhren. Dazu wird das Photosystem I, das in Chloroplasten und Cyanobakterien den photosynthetischen Elektrontransfer ermöglicht, als Reaktionszentrum verwendet. Die Einbindung solcher photoelektrisch aktiver Proteine in hybride nanoelektronische Schaltkreise hat für viele Anwendungen immense Vorteile, da die Effizienz der Umwandlung von Licht in elektrische Energie in solchen natürlichen Photosystemen höher ist als in inorganischen Nanosystemen, wie sie bis jetzt künstlich hergestellt werden können. Die ersten Ergebnisse zeigen, dass insbesondere die optischen Eigenschaften bei einer elektrischen Kontaktierung erhalten bleiben. Eines der großen Ziele der Forschungsarbeiten auf dem Gebiet nano-photonischer Systeme ist die Kombination von nano-elektrischen und nano-photonischen Strukturen. Diese Verbindung könnte den Weg zu einer integrierten Quantenphotonik eröffnen, in der Licht nicht nur Träger von Information ist, sondern auch zum Schalten in photonischen Transistoren verwendet werden kann. Die Realisierung von Transistoren, die auf der Basis einzelner Photonen arbeiten, oder auch von großen, auf der Grundlage von Licht funktionierenden Datenspeichern sind zur Zeit noch ein wissenschaftlicher Traum, obwohl einzelne Demonstratoren heute bereits existieren. Jedoch sind die dabei auftretenden Probleme nicht grundsätzlicher Art, sodass die Hoffnung besteht, dass mit der Entdeckung neuer optischer Phänomene in Nanostrukturen die Anzahl der Anwendungen von nano-photonischen Systemen stetig steigen wird.

Halbleiterlaser



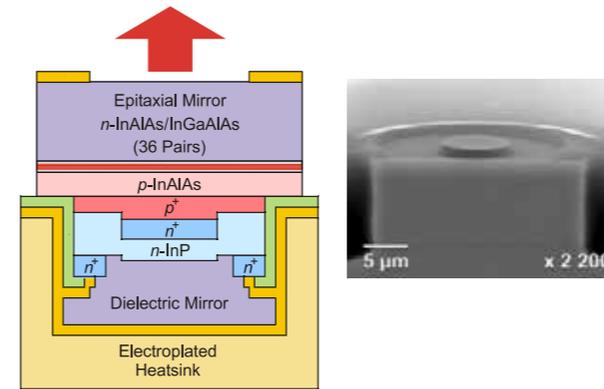
Halbleiterlaser



Halbleitermaterialien für Infrarot-Laser

Die Forschungsaktivitäten zu den Grundlagen der Halbleiterelektronik und -technologie am WSI orientieren sich vor allem am Bedarf für neue und verbesserte Halbleiterbauelemente in künftigen Systemanwendungen. Dies trifft insbesondere auf die Entwicklung neuartiger Halbleiterlaser zu, die als Schlüsselbauelemente in der Kommunikationstechnik, in der Sensorik aber auch in der Unterhaltungselektronik unverzichtbar sind. Daher ist unsere Forschung nicht nur auf die Entwicklung und Untersuchung neuer Halbleitermaterialien, die als Rohstoff für zahlreiche neue Bauelemente angesehen werden können, beschränkt, sondern befasst sich auch mit der Erforschung und Entwicklung von Bauelementen. Dabei werden sowohl neue Bauelementkonzepte, wie z. B. elektronisch abstimmbare Laserdioden, nanostrukturierte Laser oder Quantenkaskadenlaser realisiert als auch umfangreiche Modellrechnungen durchgeführt. Anschließend werden die Laser charakterisiert und die für die geplanten Anwendungen relevanten Bauelementeparameter eingehend untersucht.

Der Schwerpunkt unserer Laserforschung liegt auf Laserdioden im nahen und mittleren Infrarot, die in der optischen Nachrichtentechnik und in der Spurengasanalyse eingesetzt werden. Halbleiterlaser für die optische Nachrichtentechnik werden gewöhnlich bei Wellenlängen um 1,3 µm und 1,55 µm betrieben, wobei eine hohe Modulationsbreite in der Größenordnung von 10 GHz erforderlich ist. Damit lassen sich mit einer Laserdiode ca. 5.000 digitale Fernsehkanäle oder ca. 1.000 Breitband-DSL-Anschlüsse bedienen. In der Gassensorik und Spurengasanalyse ist die genaue Einhaltung der Wellenlänge des Lasers bezüglich der jeweiligen Absorptionswellenlänge des betreffenden Gases ($\pm 1\text{nm}$) sowie die Abstimmbarkeit der Wellenlänge (um einige Promille) zur Abtastung der Gasabsorption entscheidend. Typische Gase sind z. B. Methan, welches bei 1,7 µm absorbiert, oder Kohlendioxid, welches bei 2,0 µm oder 4,4 µm nachgewiesen werden kann. Gemeinsam ist allen genannten Anwendungen, dass die Laser stabil in einer vorgegebenen Polarisation und nur bei einer einzigen Wellenlänge bzw. Frequenz, im sogenannten Einmodenbetrieb, arbeiten müssen. Unterschiedliche Verbindungshalbleiter wie z. B. GaAs-basierte (AlGaAs), InP-basierte (AlGaInAs) oder GaSb-basierte (AlGaInAsSb) Materialsysteme sind erforderlich, um die verschiedenen Zielwellenlängen der jeweiligen Anwendungen zu erreichen. Zudem sind aufwendige Bauelementkonzepte und Nanotechnologien im Subwellenlängenbereich notwendig, um die Polarisationsstabilität und den Einmodenbetrieb zu erzielen und um die individuelle Anpassung anderer wichtiger Lasereigenschaften zu ermöglichen.

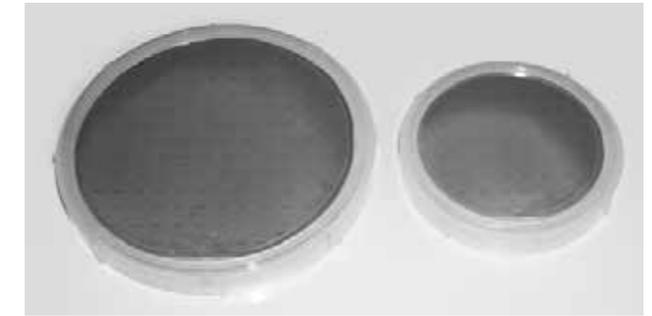


Schematischer Querschnitt und Elektronenmikroskop-Aufnahme eines VCSELs für die Breitbandkommunikation bei 1,55µm Wellenlänge.

Die Forschungsaktivitäten zu Halbleiterlasern gliedern sich in die drei Bereiche Breitband-Kommunikationslaser, Laser für die Gassensorik und Quantenkaskadenlaser.

Breitbandlaser für die optische Nachrichtentechnik

Zur Nutzung der hohen Bandbreite faseroptischer Nachrichtensysteme sind breitbandig modulierbare und weit abstimmbare Laserdioden in den optischen Fenstern um 1,3 µm und 1,55 µm erforderlich. Dabei entspricht einer relativen Übertragungsbandbreite von nur 1% eine absolute Bandbreite von ca. 2.000 GHz, die beispielsweise von 200 äquidistant emittierenden Lasern mit 10 GHz Bandbreite abgedeckt werden könnte. Derartige Anwendung können optimal mit identischen, elektronisch abstimmbaren Breitbandlasern, die jeweils exakt auf den gewünschten Kanal eingestellt werden können, bestückt werden. Am WSI untersuchen wir dazu sogenannte VCSEL (vertical-cavity surface-emitting laser: oberflächenemittierende Laser) in den Wellenlängenbereichen um 1,3 µm und 1,55 µm. Diese Laser erreichen über 10 GHz Modulationsbandbreite und lassen sich über einen gewissen Wellenlängenbereich durchstimmen. Aufgrund der von der Glasfaserstrecke vorgegebenen Wellenlängen müssen diese Laser auf InP-Basis



Fertige 3- und 2-Zoll VCSEL-Wafer (VERTILAS GmbH)

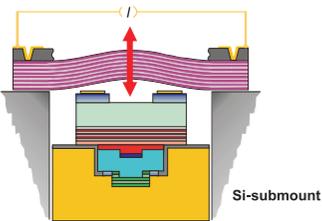
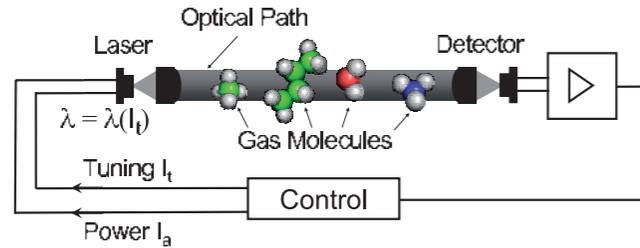
hergestellt werden, womit jede Wellenlänge im gesamten Wellenlängenbereich von 1,3 µm bis 2,3 µm erreicht werden kann. Moderne InP-VCSEL erzielen dabei inzwischen Modulationsbandbreiten bis zu 12 GHz mit Schwellenströmen für den Einsatz der Laseroszillation von unter 1 mA. Aufgrund ihrer geringen Abmessungen befinden sich ca. 20.000 VCSEL auf einer von unserer Ausgründung Vertilas GmbH fertig prozessierten 3-Zoll-InP-Scheibe.

Laser für die Infrarot-Gas-Sensorik

Der Nachweis und die Konzentrationsbestimmung von Gasen ist eine wichtige Methode in Umwelttechnik, Medizin, der Analyse von Verbrennungsprozessen und in vielen weiteren Anwendungen. Da die meisten Gase charakteristische Absorptionslinien im nahen und mittleren Infrarot aufweisen, kann die Konzentration kontaktlos mit optischen Methoden wie der Laser-Spektroskopie bestimmt werden. Dabei regt ein Laserstrahl die Resonanzen der Gasmoleküle an, wodurch er abgeschwächt wird, was sich in charakteristischen Einbrüchen im Transmissionsspektrum zeigt. Da die Resonanzwellenlängen und Absorptionskoeffizienten wie ein Fingerabdruck für jedes Gas charakteristisch sind, lassen sich Gassorte und -konzentration eindeutig bestimmen. Der

Halbleiterlaser

Prinzip eines Laser-Absorptions-Spektrometers für die Spurengasanalyse

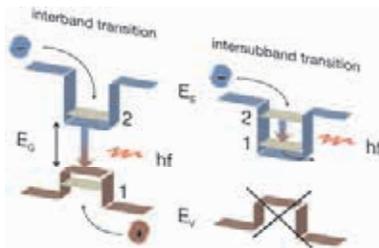


Abstimmbarer VCSEL mit mikromechanisch aktiviertem Bragg-Spiegel zur Wellenlängenabstimmung.

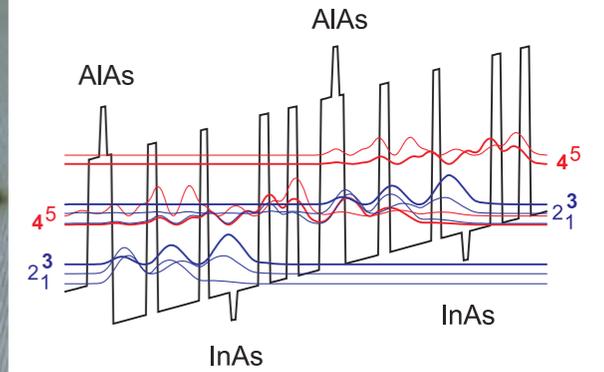
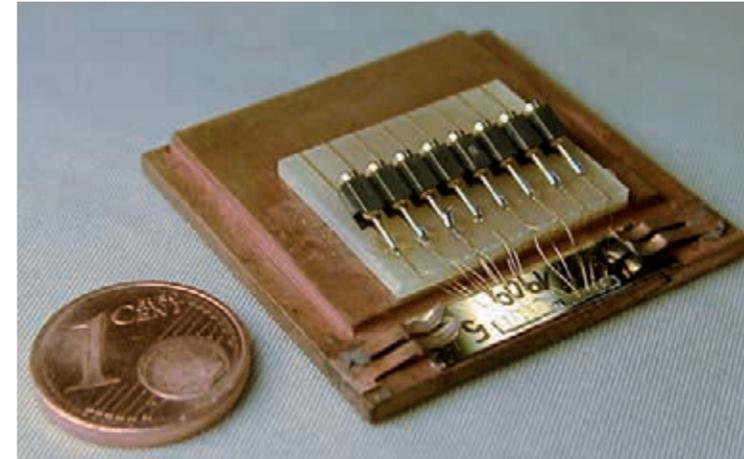
Einsatz dieser Technik ist jedoch noch in vielen Fällen durch die mangelnde Verfügbarkeit von Laserquellen mit passenden Emissionswellenlängen beschränkt. Aufgrund ihrer geringen Abmessungen, Robustheit und geringen Leistungsaufnahme erweisen sich Halbleiterlaser als besonders geeignet für diese Anwendungen. Am WSI werden daher Halbleiterlaser für die geforderten Wellenlängen mit den entsprechenden Halbleitermaterialsystemen entwickelt. Neben der passenden Wellenlänge müssen die Laser noch andere Eigenschaften aufweisen, um anwendungstauglich zu sein. Insbesondere dürfen sie nur in einer Mode, das heißt bei exakt nur einer Wellenlänge, emittieren und sie müssen sich elektronisch über einen gewissen Wellenlängenbereich durchstimmen lassen, um die jeweiligen Gaslinien vollständig überstreichen zu können. Am WSI wurde hierfür in Kooperation mit der Technischen Universität Darmstadt eine VCSEL-Struktur entwickelt, bei der über die thermische Ausdehnung aufgrund eines Abtaststroms der obere, mikromechanische Bragg-Spiegel auf und ab bewegt werden kann. Auf diese Weise kann die Resonatorlänge und damit die Laserwellenlänge durchgestimmt werden. Dabei ergibt bei einem 1,55 µm Laser eine kleine Änderung der Resonatorlänge von ca. 600 nm eine Abstimmung der Laserwellenlänge über mehr als 50 nm, entsprechend einer Frequenzverschiebung von 6 THz.

Quantenkaskadenlaser

Der Quantenkaskadenlaser (QCL) ist ein neuer Typ von Halbleiterlaser, der erstmalig im Jahr 1994 vorgestellt wurde. Im Gegensatz zu den konventionellen Band-Band-Laserdioden, in denen die Laserübergänge von einem Zustand im Leitungsband in einen Zustand im Valenzband erfolgen, basiert der Quantenkaskadenlaser auf Intersubbandübergängen, das heißt auf Übergängen innerhalb des Leitungsbandes. Zur Realisierung geeigneter Intrabandzustände sind aufwendige und vielschichtige Halbleiternanostrukturen, sogenannte Übergitterstrukturen, erforderlich. Durch den Einsatz von Intersubbandübergängen ergeben sich zwei entscheidende Vorteile gegenüber den Band-Band-Laserdioden. Zum einen hängt die Energiedifferenz zwischen den Laserniveaus und damit die Laserwellenlänge vorwiegend von

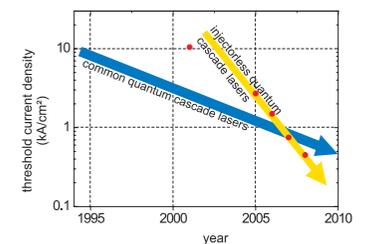


Schematischer Vergleich der Leitungs- und Valenzbandstruktur sowie der Laserniveaus in Band-Band-Lasern (links) und Quantenkaskadenlasern (rechts).

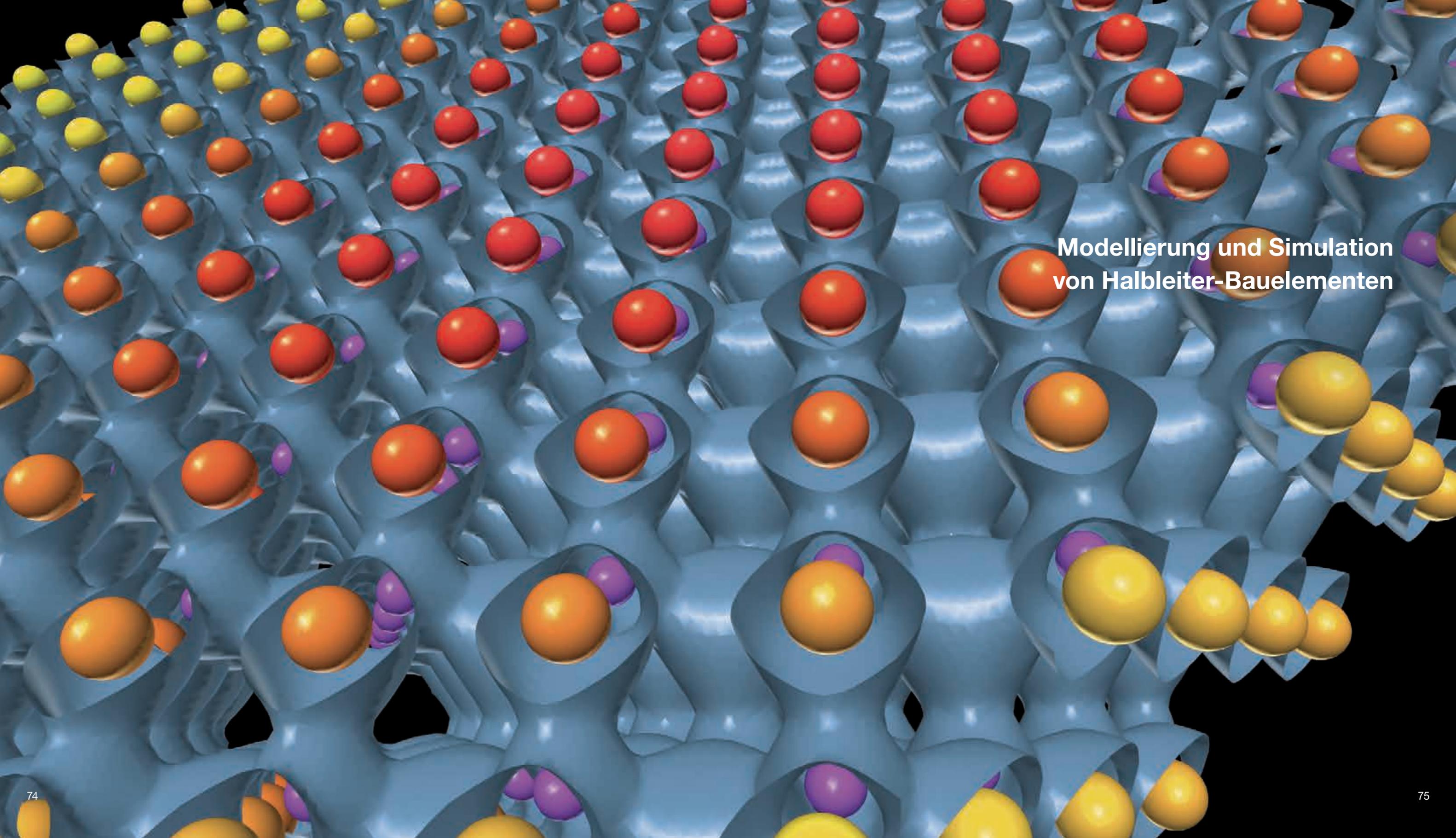


Leitungsbandverlauf eines am WSI entwickelten und hergestellten injektorlosen QCLs (rechts) und eine Kupferwärmesenke mit 8 aufgebauten Lasern (links).

der Auslegung des Übergitters ab und ist damit nicht mehr maßgeblich durch das verwendete Halbleitermaterialsystem festgelegt. Außerdem sind die Energiedifferenzen zwischen den Intrabandzuständen gewöhnlich kleiner als zwischen Leitungs- und Valenzband, weshalb die erzeugten Photonen eine kleinere Energie bzw. eine größere Wellenlänge, typischerweise im mittleren Infrarot, aufweisen. Daher werden Quantenkaskadenlaser vor allem in Messtechnik und Sensorik im mittleren und fernen Infrarot eingesetzt. Aber auch der Terahertz-Bereich mit Wellenlängen um 100 – 200 µm (1,5 – 3 THz) kann erreicht werden. Ein Problem aller Quantenkaskadenlaser war – insbesondere in den ersten Jahren – die Erreichung des Laserbetriebs bei oder etwas oberhalb der Raumtemperatur, was für den ungekühlten Betrieb in der Praxis entscheidend ist. Daher war eine deutliche Verringerung der anfangs sehr hohen Schwellenstromdichten ein vorrangiges Ziel der Forschungen an diesem Lasertyp. Am WSI werden seit ca. 10 Jahren Konzepte und Methoden zur Reduzierung der Schwellenstromdichte von Quantenkaskadenlasern untersucht. Mittels „Bandgap-Engineering“ und der Einführung neuer Quantenfilmstrukturen wurden verbesserte Quantenkaskadenlaser ohne die sonst üblichen Injektorzonen entwickelt. Aufgrund der damit verbesserten optischen Eigenschaften konnte die Schwellenstromdichten von anfangs ca. 2 kA / cm² auf unter ca. 0,4 kA / cm² verringert werden. Dieser Fortschritt konnte durch die Entwicklung neuartiger nanostrukturierter Übergitterstrukturen aus vier verschiedenen Halbleitermaterialien erzielt werden. Die schrittweise Verbesserung der Quantenkaskadenlaser und die Einführung neuer Bauelementkonzepte und -strukturen führte in den vergangenen Jahren damit zu einer eindrucksvollen Reduktion der Schwellenstromdichten. Im Vergleich mit den Standard-Quantenkaskadenlasern weisen unsere injektorlosen Laser mittlerweile die niedrigsten Schwellenstromdichten bei Raumtemperatur auf und sind mit Werten von unter 0,5 kA/cm² bestens für Anwendungen in der Messtechnik und Sensorik bei bzw. bis oberhalb Raumtemperatur geeignet.

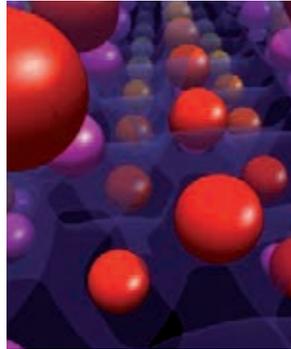


Zeitliche Entwicklung der Schwellenstromdichten üblicher und injektorloser QCLs.

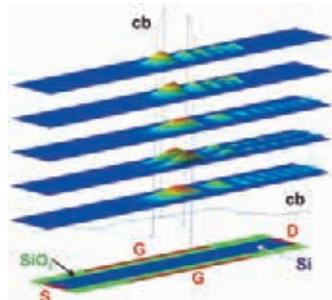


**Modellierung und Simulation
von Halbleiter-Bauelementen**

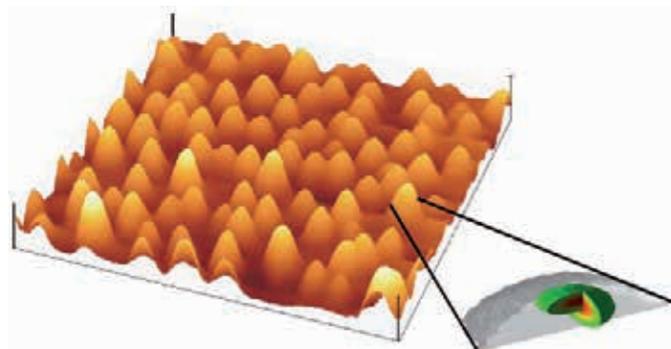
Modellierung und Simulation von Halbleiter-Bauelementen



Moderne Bauelemente können auf einer atomaren Skala manipuliert werden. Dies erfordert aber zuverlässige Modellierungs- und Simulationsverfahren.



Berechnete Elektronendichte in einem Silizium Nanotransistor mit Doppelelektrode. Gezeigt sind die einzelnen quantenmechanisch berechneten Energien der Elektronen. Die hellen Linien zeigen das elektrische Potenzialprofil, das die Elektronen spüren.



Berechnete Verteilung der negativen und positiven Ladungsdichte innerhalb von selbstassemblierten Quantenpunkten. Quantenpunkte bilden sich auf Halbleiteroberflächen ähnlich wie Wassertropfen auf nicht benetzenden Oberflächen, sind aber nur wenige Nanometer groß und können künftig als Einelektron-Speicher oder für die Erzeugung einzelner Photonen (Lichtquanten) eingesetzt werden.

Die theoretische Modellierung und damit zusammenhängende numerische Berechnungen sind unabdingbare Hilfsmittel bei der Entwicklung neuer Halbleiter-Bauelemente. Da man diese Chipkomponenten wegen der fortgeschrittenen Miniaturisierung weder sehen noch leicht manipulieren kann, bedarf es ausgefeilter Simulationen, um diese verstehen zu können, ihre Eigenschaften genau vorhersagen zu können, und um generell Nanoelektronik und Nanooptik in den Griff zu bekommen. Die Strukturgrößen moderner Bauelemente sind mittlerweile auf den Bereich einiger Nanometer geschrumpft, und sind damit bei der Größe einiger Atome oder kleiner Moleküle angelangt. In diesen Größen-Dimensionen gelten aber die wohlbekannten Naturgesetze des Makrokosmos nicht mehr. Stattdessen wird diese Nanowelt von den ebenso verblüffenden wie unanschaulichen Gesetzen der Quantenmechanik beherrscht. So verhalten sich winzige Objekte wie Elektronen manchmal wie elektromagnetische Wellen, dann wieder wie scheinbar normale Masseteilchen.

Obwohl wir heutzutage im Stande sind, diese merkwürdigen Quantenphänomene zu kontrollieren und in den letzten Jahren gelernt haben, damit gut und sicher umzugehen, müssen Nanometerbauelemente doch ganz anders betrieben und hergestellt werden als dies bei den derzeitigen industriell gefertigten Chips der Fall ist. Diese neuen Betriebsarten und Fabrikationsschritte befinden sich aber noch im Stadium der Grundlagenforschung und -entwicklung. Die theoretischen Forschungsarbeiten am Walter Schottky Institut stellen sich diesen Herausforderungen, neue Quanten-Bauelemente zu entwerfen und zu modellieren, um damit den Weg zu bereiten für die kommenden Generationen von leistungsfähigen und gleichzeitig energiesparenden elektronischen und optischen Bauelementen.

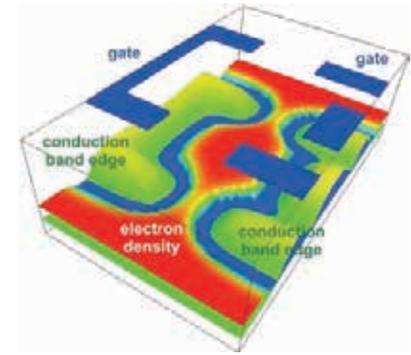
Die moderne Festkörperphysik erlaubt die genaue Berechnung der Bewegung jedes einzelnen Atoms in einem Halbleiter, und ganz allgemein die quantitative Berechnung der mechanischen, elektronischen und optischen Eigenschaften von Festkörpern. Jedoch sind diese Verfahren außerordentlich aufwändig und erfordern die Lösung vieler Millionen Gleichungen. Die methodische Herausforderung für den theoretischen Physiker besteht daher darin, numerische Verfahren zu entwickeln, mit denen man diese vielen Gleichungen effizient und in akzeptabler Zeit lösen kann, die physikalische Herausforderung besteht darin, die relevanten physikalischen Mechanismen zu identifizieren und die weniger relevanten zu eliminieren. In der Tat wurden am Walter Schottky Institut eine Reihe sehr genauer Methoden entwickelt, die

das Verhalten einiger Prototypen neuer Bauelemente zuverlässig voraussagen können, als auch einfache Modelle, die weniger genau sind, aber vielen Kollegen in der ganzen Welt helfen, ihre Entwürfe für Nanobauelemente rasch qualitativ einordnen und verstehen zu können.

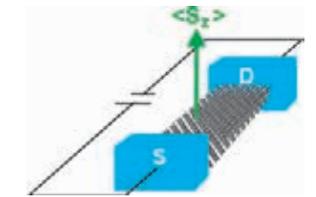
Eine von Wissenschaftlern des WSI entwickelte Software für die Berechnung von neuartigen Nanometer-Bauelementen, die sich als besonders nützlich herausgestellt hat, heißt nextnano. Dieses Softwarepaket wird mittlerweile weltweit routinemäßig von mehreren hundert industriellen und universitären Forschungsgruppen eingesetzt. nextnano ist ein flexibles Simulationswerkzeug für elektronische und optoelektronische Nanobauelemente, das die quantenmechanischen Eigenschaften von beliebig geformten und aus vielen Materialien bestehenden Halbleiterstrukturen berechnet – beschränkt nur durch die Vorstellungskraft und Originalität des Nutzers. Häufige Anwendungen umfassen Einelektron-Transistoren, lichtemittierende Dioden, Quantenkaskadenlaser, effiziente Solarzellen, organische Festkörper/Elektrolyt-Grenzflächen, Spintronik, Quantencomputer-Anwendungen und neue Materialien wie Graphen oder verdünnte Nitride.

Im Zusammenhang mit Forschungsprojekten, an denen mehrere Forschergruppen beteiligt sind, konzentrieren sich die theoretischen Modellierungen am WSI vorwiegend auf drei Themenkreise: Spintronik, halbleiterbasierte Quanteninformationsverarbeitung und Quantenkaskadenlaser. Jedes dieser Themen ist hochaktuell und an ihnen wird weltweit in vielen Gruppen intensiv geforscht.

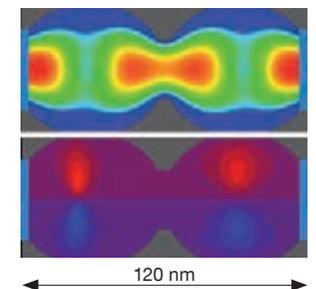
Das Gebiet der Spintronik (vgl. Kapitel 10) basiert auf einem besonders eigentümlichen quantenmechanischen Freiheitsgrad der Elektronen in der Nanowelt, der Spin heißt: während große Körper grundsätzlich in beliebige Richtung und mit beliebiger Geschwindigkeit gedreht werden können, haben Elektronen die Eigenschaft, sich nur mit einer festen Geschwindigkeit und Richtung drehen zu können; einzig der Drehsinn hat zwei Einstellmöglichkeiten – er kann im Uhrzeigersinn oder gegen den Uhrzeigersinn sein. Die wohlbekannte Erscheinung des Magnetismus mit seinen zwei Polen - die man üblicherweise Nord- und Südpol nennt – ist in der Tat eine Manifestation dieser zwei Einstellmöglichkeiten für den Drehsinn des Spins der Elektronen. Es besteht weltweit die Hoffnung, dass die Spintronik-Forschung letzten Endes zu neuen Logik-Chips und neuen Speicherbausteinen führt, die besonders energiesparend sind und nur einen Bruchteil der Energie heutiger Bauelemente umsetzen. Am WSI werden neuartige Spin-Bauelemente theoretisch entworfen, die auch ohne von außen angelegtes Magnetfeld funktionieren und nur auf dem sogenannten Spin-Bahn-Wechselwirkungs-Effekt basieren. Dieser Effekt tritt bei allen Halbleitern, die aus schwereren Elementen wie Indium oder Antimon aufgebaut sind, auf und wirkt auf die Elektronen ähnlich wie ein in den Festkörper eingebautes Magnetfeld. Unsere Rechnungen deuten darauf hin, dass man durch Anlegen einer elektrischen Spannung an Halbleiternanostrukturen bestimmter Form und Zusammensetzung den Spin der Elektronen in hohem Maße gleichrichten kann und damit Halbleiternanostrukturen eine Grundvoraussetzung für effiziente Spinbauelemente erfüllen.



Konturgraphik des elektrischen Potenzials (grün und blau) und der entsprechenden elektronischen Ladungsverteilung (rot) in einem Ein-Elektron-Transistor. Die Lage der oberen Metallelektroden („Gates“) ist in blau angedeutet.

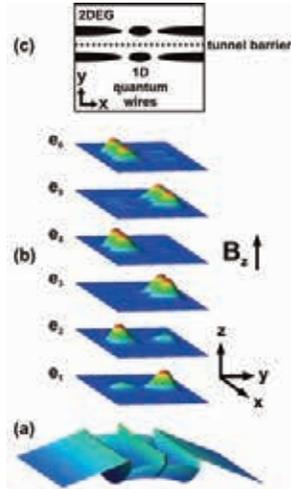


Schematisches Bild eines theoretisch entworfenen Spintransistors. „Source“ (S) und „Drain“ (D) bezeichnen die Metallkontakte. Das dazwischenliegende ultradünne Halbleitermaterial besteht aus weniger als 20 Atomlagen.



Konturgraphik der Spinausrichtung, die in einem zweidimensionalen Elektronengas des Halbleiters Galliumarsenid ohne äußeres Magnetfeld entsteht. Die doppelte Quantenpunkt-Geometrie, die den Elektronen durch darüber liegende Elektroden aufgeprägt wird, begünstigt diese Trennung der Spinausrichtungen im Halbleiter.

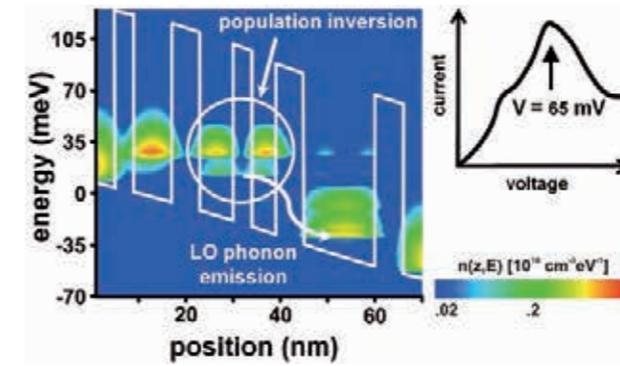
Modellierung und Simulation von Halbleiter-Bauelementen



Elektronendichte im tiefsten (e_1) und in höheren (e_2, e_3, \dots) Energiezuständen in zwei vertikal gekoppelten Nanodrähten in einem äußeren Magnetfeld B_z .

Die Quanteninformationsverarbeitung verfolgt das langfristige Ziel, festkörperbasierte Systeme zu entwickeln und zu bauen, die als massiv parallele Rechner, sogenannte Quantencomputer eingesetzt werden können. Derzeit sind praktisch realisierbare Quantencomputer noch außer Reichweite, aber es gibt am WSI und weltweit viele damit zusammenhängende konkrete Ideen und Konzepte wie Einzelphotonenquellen und Quantenkryptographie, die zumindest in Laborumgebungen bereits realisiert werden können. Ein Schlüsselement von Quantencomputern ist die kontrollierte Wechselwirkung zwischen mikroskopischen Objekten wie Elektronen, die quantenmechanischen Gesetzen gehorchen. Leider sind mikroskopische Objekte extrem empfindlich gegenüber der kleinsten Störung durch die Umgebung und müssen daher aufwändig geschützt werden. Ein essentieller Vorteil von Simulationen ist, dass man frei von solchen mühsamen Details idealisierte, perfekt ungestörte Systeme im Computer modellieren und damit die optimal erreichbaren Effekte studieren kann. Insbesondere kann man den Einfluss verschiedener Störungen einzeln zu- und abschalten und deren Wirkung daher kontrolliert studieren, bevor man diese Systeme versucht tatsächlich zu bauen. Man nennt die Wechselwirkung zwischen quantenmechanischen Objekten Verschränkung und eines der am WSI verfolgten Konzepte zur Realisierung verschränkter Elektronen basiert auf eng benachbarten Quantendrähten. Quantendrähte können mittels moderner Halbleitertechnologie, wie sie am WSI zur Verfügung steht, hergestellt werden: dabei werden Elektronen durch Miniatur-Elektroden gezwungen, sich in engen streifenförmigen Gebieten aufzuhalten, die nur wenige Nanometer breit sind. Entlang dieser Streifen, der „Nanodrähte“ wie man sie nennt, können sich die Elektronen frei bewegen und zum elektrischen Strom beitragen. Die Kopplung zwischen Elektronen in benachbarten Nanostreifen ist ebenfalls durch geeignete Elektroden kontrollierbar und bildet das Basiselement eines Quantencomputers, das sogenannte Quantenbit.

Quantenkaskadenlaser, wie schon in Kapitel 8 diskutiert, ermöglichen die Herstellung von intensiven Lichtquellen in einem sehr langwelligen Infrarot-Bereich, in dem es bisher keine leistungsfähigen Laser gibt. Die Frequenzen im Terahertz-Bereich (1 Terahertz ist 1 Million Megahertz oder 10^{12} Hertz), eignen sich ideal für die Detektion von Gasen und für die Identifikation von biologischen Molekülen in extrem niedrigen Dosen, mit sehr hoher Empfindlichkeit, und ohne Zeitverzögerung. Der aktive Teil eines Quantenkaskadenlasers besteht aus mehreren hundert nur wenige Nanometer dicken Schichten verschiedener Halbleiter. Im einfachsten Fall sind das abwechselnde Schichten von Galliumarsenid und Aluminiumarsenid. Elektronen im Galliumarsenid haben eine niedrigere Energie als Elektronen im Aluminiumarsenid. Daher stellt das letztere Material für Elektronen, die aus einem Metallkontakt bei Anlegen einer Spannung in eine Galliumarsenid-Schicht fließen, zunächst eine scheinbar unüberwindliche Barriere dar, womit solch eine Struktur isolierend und damit nutzlos wäre. Eine der erstaunlichsten Eigenschaften des durch die Quantenmechanik bestimmten Nanokosmos ist aber der sogenannte Tunneleffekt. Dieser erlaubt es Elektronen im übertragenen Sinne durch geschlossene Türen zu wandern, also in dem Fall durch die klassisch unüberwindlichen Aluminiumarsenid-Barri-

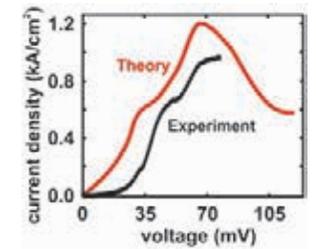


Konturgraphik der berechneten Elektronendichte in einem Quantenkaskadenlaser. Die Struktur besteht aus vielen abwechselnden Schichten von Galliumarsenid und Aluminiumarsenid. Das erstere Material wirkt als Potenzialfalle für die Elektronen, das zweite dagegen als Barriere, das die Elektronen in die Galliumarsenid-Bereiche zwingt. Das elektrische Potenzial, dem die Elektronen ausgesetzt sind, ist in weiß angedeutet. Wird eine äußere Spannung an die Struktur angelegt, können Elektronen durch die Barrieren von einer Galliumarsenid-Schicht zur nächsten durch den sogenannten Tunneleffekt gelangen. Die Elektronen kommen dann jeweils in einem höheren Energiezustand an, und fallen unter Aussendung von Licht in den verfügbaren niedrigeren Zustand. Anschließend geben Sie Wärme ab und können durch die angrenzende Barriere in die nächste Galliumarsenid-Schicht gelangen.

eren durchzutunneln und daher von einer Galliumarsenid-Schicht zur nächsten zu kommen. Dieser Effekt hat zur Erfindung des Quantenkaskadenlasers geführt, bei dem Elektronen durch „Kaskaden“ von Quantentälern und -bergen wandern und dabei immer wieder Energie in Form von Licht abgeben. Das Grundprinzip eines Lasers besteht in der Möglichkeit für Elektronen, von einem energetisch höheren Zustand in einen energetisch tieferen Zustand zu „fallen“ und die Überschussenergie in Form von Licht abgeben zu können. Die Quantenkaskadenstruktur wird sorgfältig so vorausberechnet und dann hergestellt, dass die Elektronen bei ihrer Wanderung durch die Kaskaden immer zunächst in einen höheren Zustand in den Galliumarsenid-Schichten ankommen und dort strahlend in einen tieferen Zustand übergehen. Bevor sie von dort durch den Tunneleffekt in die nächste Galliumarsenid-Schicht gelangen können, geben Sie die verbliebene Überschussenergie als Wärme ab, was den Prozess insgesamt gesehen beschleunigt. Es ist offensichtlich, dass eine solch komplexe Abfolge genau aufeinander abgestimmter Prozesse zuerst sorgfältig vorherberechnet und modelliert werden muss. Daraus wird eine Herstellungsrezeptur bestimmt, dann wird der fertige Quantenkaskadenlaser genau vermessen und geprüft, die Resultate fließen wieder zurück in die Modellierung, und so werden in vielen Optimierungszyklen schließlich effiziente Sensoren und Lichtquellen hergestellt.

Am Walter Schottky Institut wurde ein quantitatives Modell von Quantenkaskadenstrukturen im Terahertzbereich entwickelt, die alle relevanten quantenmechanischen Vorgänge im Nanometerbereich berücksichtigt. Dieses Modell hat uns ermöglicht, in Zusammenarbeit mit mehreren Forschergruppen im Hause und im In- und Ausland einen Beitrag zur erfolgreichen Herstellung und Optimierung von Quantenkaskadenlasern zu leisten.

Für alle Gebiete der modernen Physik und insbesondere der Halbleiterphysik gilt, dass der Fortschritt in Forschung und Entwicklung entscheidend von einer engen Zusammenarbeit zwischen innovativer experimenteller Arbeit und genauer theoretischer Modellierung und Vorhersage abhängt.



Berechneter elektrischer Strom durch einen Terahertz-Quantenkaskadenlaser als Funktion der angelegten elektrischen Spannung. Das Bild soll einen Eindruck geben, wie genau eine moderne theoretische Modellierung, wie sie am WSI entwickelt wurde, mit der Wirklichkeit, d.h. mit dem Experiment, übereinstimmt.

Elektrischer Nachweis der Spinorientierung
von Phosphor-Donatoren

Spintronik: Informationsverarbeitung auf der Basis von Spins

Computer basieren auf Elektronen als den Trägern von Information. So beschreiben die vorangegangenen Kapitel, wie in Halbleiterbauelementen Elektronen kontrolliert erzeugt und transportiert werden. Dabei wird insbesondere von der Tatsache Gebrauch gemacht, dass Elektronen eine Ladung tragen. Jedoch haben Elektronen auch noch eine weitere Eigenschaft, die bereits Mitte der 1920-er Jahre in der Atomphysik entdeckt wurde. In Atomen bewegen sich Elektronen um einen viel schwereren Atomkern, in etwa so wie die Planeten um die Sonne kreisen. Zusätzlich drehen sich fast alle Planeten noch um ihre eigene Achse, auf der Erde führt dies zu Tag und Nacht. Ganz ähnlich Elektronen: Auch sie besitzen eine Eigenschaft, die große Ähnlichkeit aufweist zur Drehung von Himmelskörpern um die eigene Achse. Diese Eigenschaft ist der Spin.

Festkörper mit gekoppelten Spins

Genau wie die sich drehende Erde ein großer Magnet ist, so wirkt jeder Spin wie ein kleiner Magnet! Diese mikroskopischen Magnete können in Festkörpern große Auswirkungen haben: Ordnen sich die Spins parallel an, kommt es zur Bildung von sog. Ferromagneten. Die magnetischen Eigenschaften von Magnetit sind bereits seit dem Altertum bekannt, seit dem Mittelalter wird die magnetische Kompassnadel benutzt. Heute finden Magnete zum Beispiel in Motoren und Transformatoren eine breite Anwendung. Jedoch auch aus der Informationsverarbeitung sind magnetische Materialien nicht mehr wegzudenken: So erfolgt die Speicherung auf Computerfestplatten in der Form kleinster magnetischer Bereiche, in denen entweder der Nord- oder der Südpol in eine bestimmte Richtung zeigt.

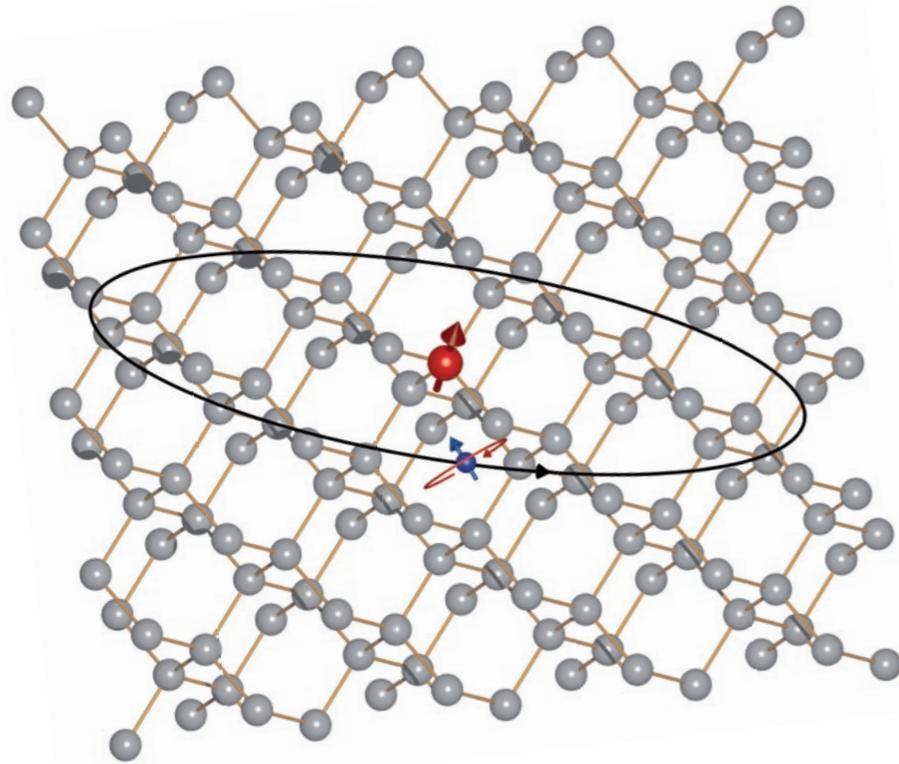
Die physikalischen Prozesse bei der Bewegung von Elektronen durch ferromagnetische Materialien und Schichtstrukturen werden in der Festkörperphysik intensiv untersucht. Streuprozesse zwischen den Spins von beweglichen, stromtragenden Elektronen und den Spins von ortsfesten, für den Magnetismus verantwortlichen Elektronen führen zu Effekten wie dem sog. Riesenmagnetwiderstand: In Schichtstrukturen, die zwei ferromagnetische dünne Filme beinhalten, ändert sich der Stromfluss je nach der relativen Ausrichtung der Nord- und Südpole der beiden magnetischen Schichten. Solche Effekte haben direkte Anwendungen in der Informationsverarbeitung und werden unter anderem in Leseköpfen von Festplatten ausgenutzt. Den hohen Stellenwert, den die Forschung auf diesem Gebiet hat, zeigt die Vergabe des Nobelpreises für Physik im Jahre 2007 an Peter Grünberg und Albert Fert für die Entdeckung und physikalische Beschreibung dieser Magnetowiderstandseffekte.

Anwendungen einzelner Spins

Typisch für Ferromagnete ist die parallele Ausrichtung einer großen Anzahl von Spins. Für zukünftige Anwendungen z.B. in der Quanteninformationsverarbeitung ist es aber notwendig, einzelne Spins zu positionieren, zu kontrollieren und ihre Orientierung auszulesen. Dabei macht man von der Tatsache Gebrauch, dass sich einzelne Spins in einem Magnetfeld in unendlich viele Richtungen orientieren lassen, ganz ähnlich wie eine Kompassnadel. Darüber kann im Prinzip mehr Information in einem einzelnen Spin gespeichert werden als in einem klassischen Bit, das nur die Information „0“ oder „1“ tragen kann. Diese Eigenschaft macht Spins ähnlich wie einige andere quantenmechanische Systeme (Atome, Ionen oder supraleitende Bauelemente) sehr interessant für die Verwendung in der neuartigen Quanteninformationsverarbeitung auf der Grundlage von sog. Quantenbits oder Qubits. Die speziellen quantenmechanischen Eigenschaften der Qubits kommen beim Auslesen wieder zum Vorschein: Während sich im Quantenbit zwar zwischenzeitlich mehr Information speichern lässt, erhalten wir beim Auslesen wieder nur die klassische Information „0“ oder „1“. Trotzdem lassen sich diese Qubits sehr sinnvoll verwenden, z.B. bei der Primzahlzerlegung oder dem Durchsuchen von Datenbanken. Bereits in der kommerziellen Realisierung sind Systeme, die eine sichere Datenkommunikation über quantenmechanische Verschlüsselungsverfahren erlauben.

Die physikalischen Eigenschaften von Halbleitern und die hoch entwickelte Halbleitertechnologie erlauben es, grundlegend neue, auf der Basis von einzelnen Spins arbeitende Bauelemente für die Quanteninformationsverarbeitung zu entwickeln. Zu den speziellen Vorteilen von Halbleitern für diese „Spintronik“ gehören

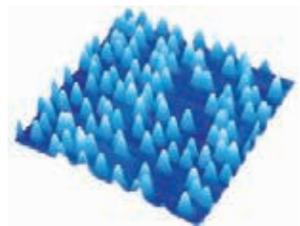
- die Realisierung künstlicher Atome in der Form von Quantenpunkten oder Donatoren, die wesentlich größere Ausdehnungen haben als natürliche Atome und daher einfacher zu positionieren und zu adressieren sind,
- die Möglichkeit, die Isotopenzusammensetzung der Halbleiter künstlich zu beeinflussen, um die Wechselwirkung der Spins der Elektronen mit denen der Atomkerne zu kontrollieren,
- die Initialisierung und das Auslesen von Spinzuständen über halbleiterspezifische Prozesse wie die optische Erzeugung und Vernichtung von Elektron-Loch-Paaren und
- die Integration von Bauelementen auf der Basis von Spins mit der existierenden Halbleiterelektronik.



Phosphor-Donator im Bohrschen Atommodell

Künstliche Atome

Der Durchmesser eines Atoms beträgt etwa 0,1 Nanometer oder 0,000 000 01 Zentimeter. Sollen die Elektronenspins natürlicher Atome für Spintronik verwendet werden, müssten Methoden gefunden werden, Atome mit dieser hohen Genauigkeit zu positionieren. Darüber hinaus müssten Verfahren entwickelt werden, die Spins mit einer entsprechend hohen Ortsauflösung kontrollieren und auslesen zu können. Beides ist schwierig zu realisieren. Daher ist es außerordentlich hilfreich, künstliche Atome herstellen zu können, deren Ausdehnung wesentlich größer ist.



Selbstorganisierte InGaAs-Quantenpunkte

Dies gelingt etwa mit Hilfe von Dotierung, zum Beispiel mit der Phosphordotierung von Silizium. Phosphor ist ein Element der V. Hauptgruppe des Periodensystems, und hat damit ein Elektron mehr als Silizium, das der IV. Hauptgruppe entstammt. Bei Zimmertemperatur geben Phosphordonatoren ihr zusätzliches Elektron an den Siliziumkristall ab (vgl. Kapitel 3). Bei tiefen Temperaturen aber bleibt das Elektron am Phosphoratom gebunden und bildet einen Zustand ganz ähnlich zu dem eines Elektrons im Wasserstoffatom. Der Durchmesser dieses wasserstoffähnlichen Zustandes im Siliziumkristall ist aber mit etwa 1 Nanometer bereits wesentlich größer als der Durchmesser eines natürlichen Atoms, der Spin des Elektrons am Phosphordonator ist daher wesentlich besser als Qubit geeignet.

Noch größere künstliche Atome lassen sich in der Form von Quantenpunkten realisieren. Quantenpunkte können als künstliche Atome angesehen werden, weil sie wie natürliche Atome eines oder mehrere Elektronen enthalten können. Selbstorganisierte Quantenpunkte

entstehen unter anderem beim Aufwachsen von InAs auf GaAs mittels Molekularstrahlepitaxie. Aufgrund der großen Gitterfehlpassung kommt es hier zu sog. Stranski-Krastanov-Wachstum, bei dem sich InGaAs-Quantenpunkte bilden, deren typischer Durchmesser etwa 10 Nanometer beträgt (siehe Kapitel 5).

Quantenpunkte können aber auch auf der Grundlage zweidimensionaler Elektronensysteme hergestellt werden. Hierzu werden sehr dünne metallische Elektroden auf die Oberfläche spezieller, wiederum mittels Molekularstrahlepitaxie hergestellter, Halbleiterheterostrukturen aufgebracht. Mit Hilfe dieser Elektroden wird das zweidimensionale Elektronengas eingeschränkt und die geometrische Struktur der Quantenpunkte erzeugt. Auch hier lassen sich künstliche Atome mit einem einzelnen Elektron realisieren. Diese Methode erlaubt darüber hinaus die direkte Integration von elektronischen Bauelementen wie sog. Quantenpunktkontakten zum Auslesen des Spinzustandes. Die typische laterale Ausdehnung dieser elektrostatisch definierten Quantenpunkten ist mit 100 Nanometern nochmals wesentlich größer als die der selbstorganisierten Quantenpunkte.

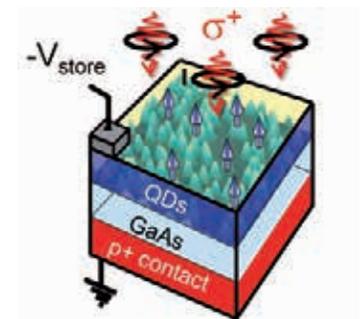
Erzeugung und Lebensdauer der Spinzustände

Für eine Verwendung in der Quanteninformationsverarbeitung müssen Spins zunächst in einem bekannten Zustand erzeugt werden. In selbstorganisierten Quantenpunkten ist dies u.a. kürzlich am Walter Schottky Institut gezeigt worden. Dazu wird speziell präpariertes Licht, dessen Schwingungsebene sich dreht, auf die Quantenpunkte eingestrahlt. Es entsteht ein Elektron-Loch-Paar, in dem die Spinorientierung beider Ladungsträger durch die Drehrichtung des Lichtes vollständig bestimmt ist. Dieses Elektron-Loch-Paar zerfällt binnen kurzer Zeit, und strahlt dabei wiederum Licht ab. Dieses Licht kann zwar hervorragend zur Messung der Spinorientierung benutzt werden, jedoch ist die Lebenszeit des Elektron-Loch-Paares so kurz, dass es nicht für die Durchführung von quantenlogischen Rechnungen verwendet werden kann. Positioniert man jedoch den Quantenpunkt in einer Diode, so kann durch Anlegen einer Spannung das Elektron-Loch-Paar aufgebrochen werden. Dabei wird ein einzelner, langlebiger Elektronenspin erzeugt.

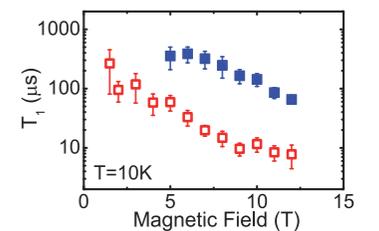
Wie lange bleibt solch ein Elektronenspin im Magnetfeld ausgerichtet? Wie eine Kompassnadel kann auch ein Spin in jeder beliebigen Richtung orientiert werden. Aber wenn wir lange genug warten, bewegt sich jede Kompassnadel zurück in den Zustand mit der niedrigsten Energie, sie zeigt nach Norden. Das geschieht auch mit Spins. Die Zeitskala, bevor die Spins in den Zustand mit niedrigster Energie zurückkehren, ist eine entscheidende Kenngröße, die die Verwendbarkeit von künstlichen Atomen als Qubit charakterisiert. Hier konnten Forscher des Walter Schottky Instituts zeigen, dass in InGaAs-Quantenpunkten diese sog. Relaxation mehr als 100 Mikrosekunden dauern kann, eine im Vergleich zu anderen Qubitsystemen sehr lange Zeit, bei denen häufig nur Nanosekunden erreicht werden.



Paar von elektrostatisch definierten Quantenpunkten



Speicherung von Elektronenspins in selbstorganisierten InGaAs-Quantenpunkten



Vergleich der Lebenszeit T_1 der Elektronenspins (blau) und der Lochspins (rot) in selbstorganisierten Quantenpunkten

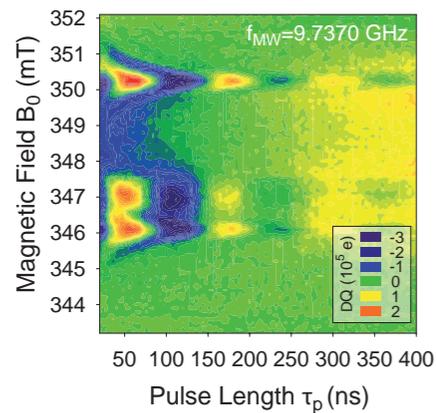
Spintronik - Informationsverarbeitung auf der Basis von Spins

Isotopenreine Halbleitermaterialien

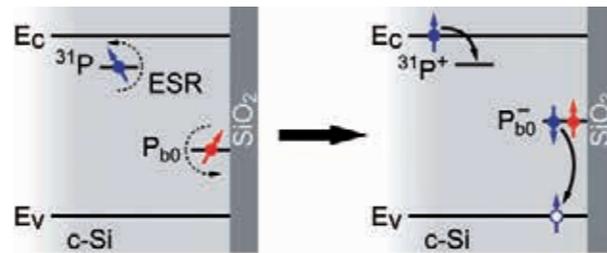
Relaxationsprozesse, die Spins in den Zustand niedrigster Energie überführen, basieren auf magnetischen Wechselwirkungen. Die Atomkerne aller stabilen Isotope der III. und der V. Hauptgruppe des Periodensystems haben selber einen Spin, sodass es hier zu Spin-Spin-Wechselwirkungen kommt zwischen dem Elektronenspin, der als Qubit benutzt wird, und den Spins der Atomkerne, die im Halbleiterkristall sitzen. In der IV. Hauptgruppe des Periodensystems gibt es jedoch Isotope von Kohlenstoff, Silizium und Germanium (z.B. ^{12}C , ^{28}Si und ^{70}Ge), die keinen Kernspin haben. In Halbleiterkristallen aus diesen Isotopen finden daher solche Spin-Spin-Wechselwirkungen nicht statt, sodass man hoffen kann, mit diesen Materialien nochmals längere Relaxationszeiten zu realisieren. Am Walter Schottky werden mit Hilfe von Molekularstrahlepitaxie einzigartige Heterostrukturen aus solchen kernspinfreien Isotopen hergestellt und die auf ihrer Basis hergestellten künstlichen Atome sowie Methoden zum Auslesen der Spinorientierung intensiv untersucht.

Kontrolle der Spins durch magnetische Resonanz

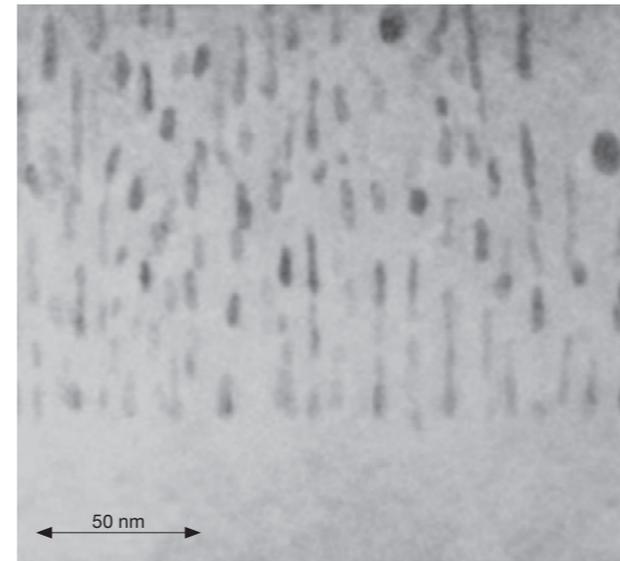
Schließlich müssen Spins gezielt kontrolliert werden, um mit ihnen rechnen zu können. Das gelingt mit Hilfe magnetischer Resonanz. Diese Methode ist wohl etabliert, scheinbar aber zu unempfindlich, um auch noch den Spinzustand auslesen zu können. Auch hier haben Forscher des Walter Schottky Instituts in den letzten Jahren Pionierarbeit geleistet: Mit Phosphor-Donatoren als Qubits in Silizium konnte ein völlig neues Ausleseverfahren für die Orientierung von Elektronenspins entwickelt werden, das auf der Bewegung von Elektronen zwischen Donatoren in Silizium und Zuständen an der Oberfläche von Siliziumkristallen beruht. Dieser Transport ist wie der oben besprochene Riesenmagnetwiderstand abhängig



Elektrischer Nachweis der Spinorientierung von Phosphor-Donatoren



Spinabhängiger Übergang von Elektronen zwischen einem Phosphor-Donator und einem Oberflächendefekt



Manganreiche Nanocluster in Germanium

von der relativen Orientierung der beteiligten Spins. Die charakteristischen Rabi-Oszillationen, die bei der Drehung der Spins mittels magnetischer Resonanz auftreten, zeigt das Titelbild dieses Kapitels. Diese, rein auf elektrischen Messungen beruhenden Methoden sind besonders wichtig für die Verwendung von Qubits auf der Basis von Silizium oder Germanium, da in diesen Materialien der optische Nachweis wie in den selbstorganisierten Quantenpunkten nicht möglich ist.

Ferromagnetische Halbleiter

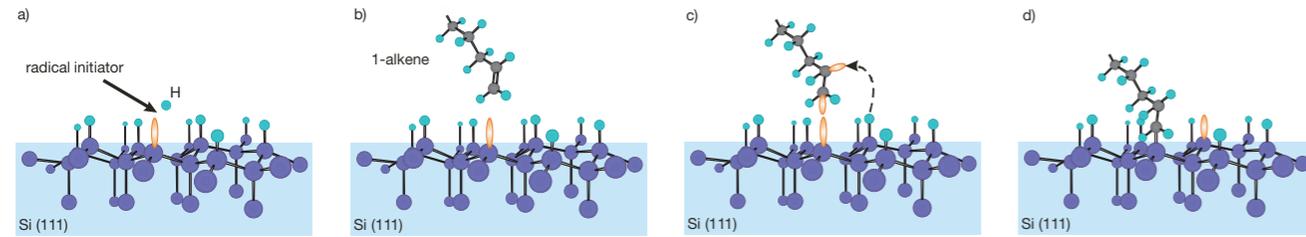
Schließlich würde die elektrische Messung der Spinorientierung nochmals wesentlich erleichtert, wenn bewegliche Elektronen in den Halbleiterbauelementen erzeugt werden können, deren Spins bevorzugt in einer Orientierung ausgerichtet sind. Derzeit erfolgt dies durch Abkühlen der Proben im Magnetfeld, könnte jedoch auch durch die Verwendung von ferromagnetischen Kontakten erreicht werden. Dazu werden auch am Walter Schottky Institut intensiv sog. verdünnte magnetische Halbleiter hergestellt und untersucht, in denen eine magnetische Ordnung der Spins der

beweglichen Elektronen durch eine Wechselwirkung mit magnetischen Ionen wie Mangan erreicht wird, die in Konzentrationen von einigen Prozent in den Halbleiter eingebracht werden. Beispiele für solche magnetischen Halbleiter sind GaMnAs, GaMnP oder auch GeMn. Wissenschaftlich besonders interessant sind dabei wiederum Fragen der Kopplung zwischen den beweglichen und stationären Spins, Verfahren der Kontrolle der magnetischen Eigenschaften z.B. durch elektrische Felder, Verspannung oder Einbringen von Wasserstoff sowie die Homogenität der magnetischen Ionen im Halbleiterkristall. Gerade in GeMn erlaubt es eine genaue Kontrolle der Wachstumsparameter in der Molekularstrahlepitaxie, manganreiche Nanocluster herzustellen, die als lokale Ferromagnete dienen und zu neuen Magnetowiderstandseffekten führen.

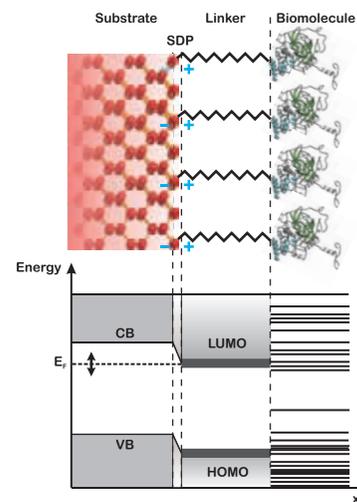
Unabhängig davon, ob wir in einigen Jahren für spezielle Anwendungen Computer auf der Basis von Quanteninformationsverarbeitung bauen können, rundet die physikalische Untersuchung des Spinfreiheitsgrades in Halbleitern das grundlegende Verständnis dieses aus der heutigen Zeit nicht mehr wegzudenkenden Materialsystems perfekt ab.

Elektro-optischer Aufbau mit integrierter Flusszelle für *switch*-DNA Messungen

Biosensoren und Bioelektronik



Schematische Darstellung der chemischen Modifikation einer (Wasserstoff-terminierten) Silizium-Oberfläche mit Alken Molekülen (Hydrosilylierungsreaktion).

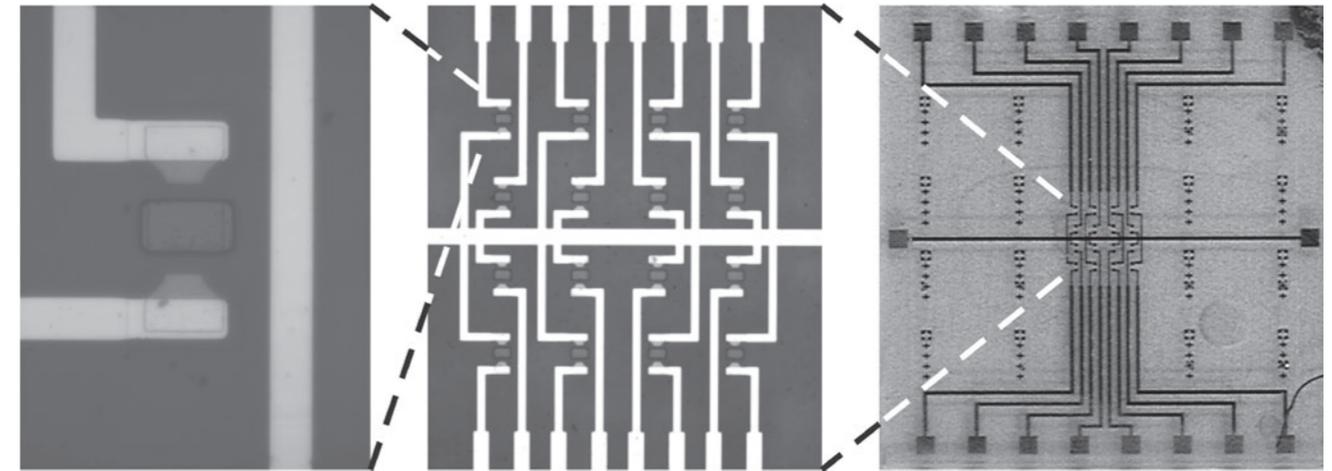


Schematische Darstellung der Grenzfläche zwischen einem Halbleiter und einem biologischen System.

Das zweite Jahrzehnt nach der Gründung des WSI kann man, in Analogie zur Erdgeschichte, als das Präkambrium bezeichnen – plötzlich kam „Leben“ auf den Festkörper. Die Kombination von anorganischen Materialien mit organischen Molekülen erregte großes Interesse am Institut und eine stetig wachsende Anzahl an Forschern begann sich diesen Hybridsystemen zu widmen. Mittlerweile befassen sich nahezu ein Viertel der wissenschaftlichen Mitarbeiter und Studenten am WSI auf die eine oder andere Weise mit Biophysik, Biochemie, Biotechnologie, Elektrochemie, etc. Der interdisziplinäre Charakter dieser Forschung wirft völlig neue und ausgesprochen interessante Fragen auf und macht das wissenschaftliche Leben am WSI deutlich bunter.

Biosensoren

Eine zentrale Zielrichtung der biologisch-orientierten Forschung am WSI ist die Entwicklung von Biosensoren. So wie der technologische Fortschritt im zwanzigsten Jahrhundert durch die Entwicklung der Mikroelektronik geprägt war, könnte das einundzwanzigste Jahrhundert vom Einfluss der Nano-Biotechnologie bestimmt werden. Dabei werden neue Methoden zur Detektion und Analyse von organischen Makromolekülen wie z.B. Nukleinsäuren, Antikörpern, Enzymen oder medizinisch relevanten Wirkstoffen wesentliche Werkzeuge für die Erforschung biologischer Prozesse darstellen. Eine ganz besondere Motivation für die Entwicklung von Biosensoren ist deren direkte Anwendbarkeit im medizinischen Alltag. So wie der Personal Computer Einzug in unseren Alltag gehalten hat, könnte die Vision von „persön-

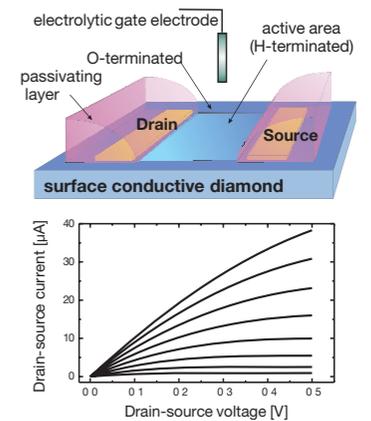


GaN Chip zur Aufnahme von Aktionspotentialen in lebenden Zellen.

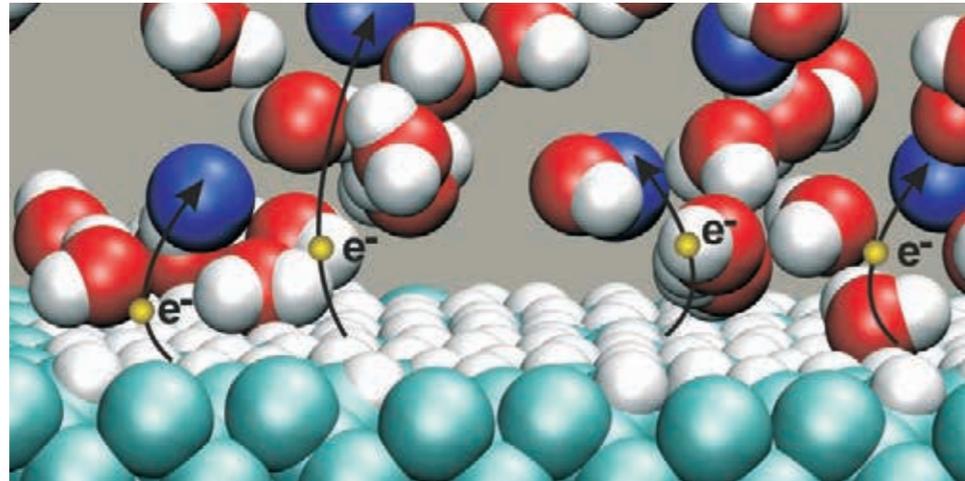
lichen Analysegeräten“ schon bald Realität werden: hier würden Bio-Chips und dazugehörige Auslesegeräte kontinuierlich zahllose Biomoleküle und molekulare Vorgänge im Körper überwachen und den Benutzer rechtzeitig bei Fehlfunktionen im Organismus warnen. So könnten Krankheiten vermieden oder bereits im Frühstadium behandelt werden. Aufgrund der heute verfügbaren hoch entwickelten Herstellungs-, Miniaturisierungs-, und Prozessierungstechniken stellen Festkörper-basierte Systeme, und allen voran Halbleiter, ideale Kandidaten für die Entwicklung von komplexen Analysegeräten dar.

Alles passiert an der Oberfläche

Um einem Halbleiter-Chip Biofunktionalität zu verleihen ist es notwendig, eine gut definierte Grenzfläche zwischen der Festkörperoberfläche und dem biologischen Milieu herzustellen. Die physikalischen und chemischen Eigenschaften von Grenzflächen sind allerdings besonders schwierig zu beherrschen, oder wie es Wolfgang Pauli ausdrückte: „Gott schuf den Kristall, seine Oberfläche wurde vom Teufel gemacht“. Den „Grenzflächenteufel“ zu zähmen ist ein Schlüssel zu einem funktionierenden Biosensor; deshalb befassen sich viele Forscher am WSI mit der Analyse und dem gezielten Einstellen von Oberflächeneigenschaften. Eine grundsätzliche Voraussetzung dabei ist einerseits, dass der Festkörper mit der biologischen Umgebung kompatibel ist, aber natürlich auch, dass das Bauelement in der Halbleiterfeindlichen Umgebung stabil bleibt und dauerhaft und verlässlich seinen Dienst verrichtet. Die Halbleiter/Bio-Grenzfläche muss jedoch viel mehr sein als bloß ein passiver Puffer zwischen



Schematische Darstellung eines solution-gate FET auf Diamant Basis und dessen typische Transistorkennlinien. SG-FETs können zur pH- und Ionen-Bestimmung eingesetzt werden. Außerdem können sie Plattformen für die Herstellung von DNA oder Enzym FETs sein.

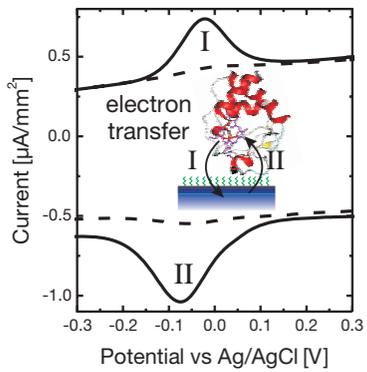


Atomare Darstellung der fest/flüssig Grenzfläche zur Veranschaulichung von Elektronentransfer Prozessen zwischen der Oberfläche und Molekülen in der Lösung.

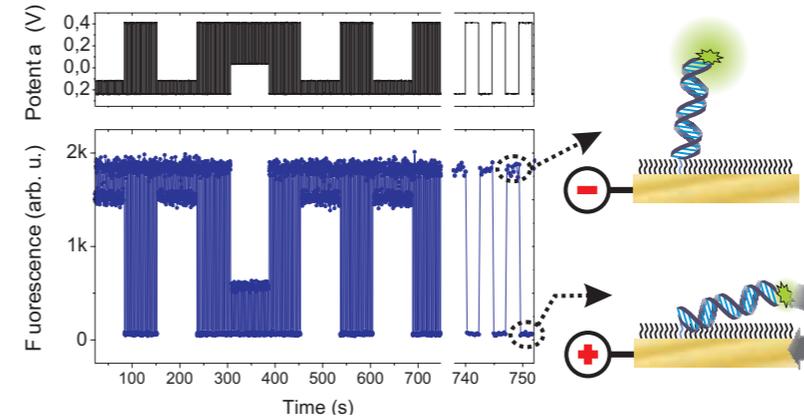
der flüssigen und festen Phase, sie ist das entscheidende Element, das der Oberfläche Funktionalität verleiht! Zu diesem Zweck werden Biomoleküle auf der Bauelementoberfläche immobilisiert, die als Erkennungseinheiten oder spezifische Fänger (Köder) für Ziel-Moleküle in der zu untersuchenden Lösung agieren. Die Art dieser auf der Oberfläche verankerten Fänger-Moleküle hängt von der Art des Sensors ab: einzelsträngige DNA-Moleküle vermögen komplementäre Ziel-DNA-Sequenzen in der Lösung zu binden (DNA-Chips); immobilisierte Antikörper können verwendet werden, um bestimmte Antigene oder andere Antikörper zu detektieren (Immunosensoren); Enzym-modifizierte Oberflächen können eingesetzt werden, um spezifische biologische Reaktionen zu katalysieren, die von Ziel-Molekülen in Gang gesetzt werden. Am WSI wird die Biofunktionalisierung einer Vielfalt von verschiedenen Materialsystemen mit spezifischen elektronischen Eigenschaften intensiv untersucht. Diese umfassen „konventionelle“ Halbleiter wie Silizium, aber auch exotischere Vertreter aus der Klasse der Halbleiter mit großer elektronischer Bandlücke, wie z.B. Gallium-Nitrid, Silizium-Karbid, und Diamant.

Von Oberflächen zu Biosignal-Wandlern

Nachdem eine funktionelle Bio-Grenzfläche mit spezifischen Rezeptoren für Ziel-Moleküle erzeugt wurde, muss eine Methode implementiert werden, die, sobald eine molekulare Bindung stattgefunden hat, dieses Ereignis in ein elektrisches Signal konvertiert, welches dann mit etablierten Verfahren ausgelesen und weiterverarbeitet werden kann.



Elektronischer Ladungstransfer zwischen einer Diamantelektrode und einem Redox-Protein, das an der Oberfläche angebunden ist. Die in dem cyclischen Voltammogramm ersichtlichen Oxidations(I)- und Reduktions(II)-Spitzen bestätigen die Funktionalität der verankerten Proteine.



Die Ausrichtung von DNA Molekülen auf einer Gold-Oberfläche wird durch das Anlegen elektrischer Felder geschaltet. Die Lichtemission von fluoreszenten Molekülen, die an das obere Ende der DNA gekoppelt sind, ist von der DNA Orientierung abhängig (stehende DNA: hell; liegende DNA: dunkel). Hier wurde die DNA-Ausrichtung durch das Anlegen elektrischer Spannungen so moduliert, dass die Moleküle im Takt des TUM-Logos Licht aussenden.

Eine Vielzahl an physikalischen oder chemischen Effekten können als solche Signalumsetzer (Wandler) eingesetzt werden, von denen viele am WSI neu entwickelt oder untersucht werden. Darunter fallen elektrische Feldeffekte, elektrochemische Ladungstransfer-Reaktionen, oder das Beobachten von Veränderungen der dynamischen Bewegung von Molekülen. Halbleiter sind besonders leistungsfähige Substratmaterialien, da ihre elektrischen und optischen Eigenschaften gezielt eingestellt und sie leicht mit Mikro-Schaltkreisen kombiniert werden können. Nano-strukturierte Bauelemente, wie in Kapitel 5 diskutiert, können genauso verwendet werden. Ausgewählte Beispiele hierfür sind 2-dimensionale leitfähige Schichten, 1-dimensionale Nano-Drähte, oder sogar 0-dimensionale Quanten-Punkte. Diese Architekturen eröffnen neuartige Anwendungen mit oft stark erhöhter Detektions-Empfindlichkeit. Darüber hinaus können hoch-integrierte Bio-Chips hergestellt werden, bei denen unzählige Mikro- oder Nano-Bauelementen zu Sensorfeldern zusammengefasst sind. Am WSI wurden beispielsweise neuartige Ionen-selektive Feldeffekt-Transistoren (IS-FET) und Enzym-FETs (EnFET) entwickelt. Mit Solution-Gate FETs (SG-FET), die auf elektrisch leitenden Diamant-Substraten und AlGaIn/GaN Transistoren mit hoch-beweglichen Elektronensystemen basieren, haben Forscher am WSI Pionierarbeit auf dem Gebiet der EnFETs geleistet und erfolgreich die Detektion von Penicillin und dem Neurotransmitter Acetylcholin gezeigt. Desweiteren wird die elektronische Kopplung von SG-FETs an Zellen entwickelt; die hervorragende Bio-Kompatibilität von GaN und Diamant könnte hier ausgesprochen vielversprechende *in-vitro* und auch *in-vivo* Anwendungen ermöglichen. Eine ausgesprochen wichtige Komponente bei der Entwicklung und dem Verständnis von Sensorkonzepten ist die theoretische Modellierung. Der Nano-Bauelemente Simulator

Biosensoren und Bioelektronik



Gebundene Proteine verlangsamen die Dynamik von DNA Molekülen, die mit hochfrequenten elektrischen Wechselfeldern auf Oberflächen geschaltet werden. So ist die Bestimmung der Proteingröße auf einem Chip möglich.

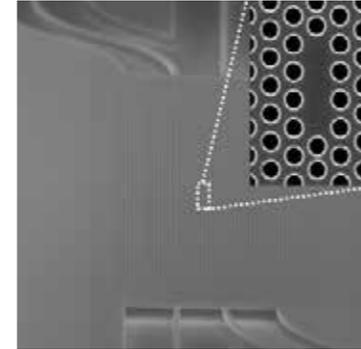
nextnano³ (der detaillierter in Kapitel 8 diskutiert wird) ist in der Lage, ein breites Spektrum verschiedener Eigenschaften zu berechnen, zum Beispiel das elektrische Verhalten komplizierter Heterostrukturen, die aus Festkörpern, Bio-Grenzflächen und Elektrolytlösungen bestehen.

Ein detailliertes Verständnis der fest/flüssig Grenzfläche ist entscheidend für eine genaue Modellierung. Besonders relevante Fragestellungen betreffen zum Beispiel den Ladungstransfer über eine Grenzfläche, die Adsorption von Ionen, Ladungsaufbau und Bildung von elektrochemischen Doppelschichten, etc. Hierzu werden verschiedenste experimentelle und theoretische Ansätze am WSI verfolgt, um ein besseres Verständnis für diese komplexen Grenzflächen zu erlangen, die vor allem im Falle der Halbleiter mit großer Bandlücke noch größtenteils unerforscht sind.

Neben elektronischen Detektionsverfahren werden auch optische Phänomene für die Sensorik erforscht, wo zum Beispiel photonische Kristalle zum Einsatz kommen (siehe auch Kapitel 6). Speziell platzierte „Defekte“ in periodischen Loch-Feldern in Halbleiter-Membranen erzeugen sehr scharfe Resonanzen in deren optischen Spektren. Wenn Biomoleküle in der Nähe der Defektstellen an die Oberfläche anbinden, verschieben sich die spektralen Resonanzen deutlich, so dass die Molekülbindung sensitiv mit hoher Ortsauflösung nachgewiesen werden kann.

Aktive Bio-Oberflächen

Über Sensorikkonzepte hinaus konzentrieren sich die Bemühungen am WSI darauf, aktive Bio-Grenzflächen zu schaffen und neue Strategien zur effizienten Manipulation von Biomolekülen auf Festkörpern zu entwickeln. Diese Untersuchungen enthüllen das Verhalten von Biomolekülen in Kraftfeldern auf - oder in nächster Nähe zu - Oberflächen. Beispielsweise wurde die licht-induzierte Bewegung von DNA auf photo-adressierbaren Elektroden aus amorphem

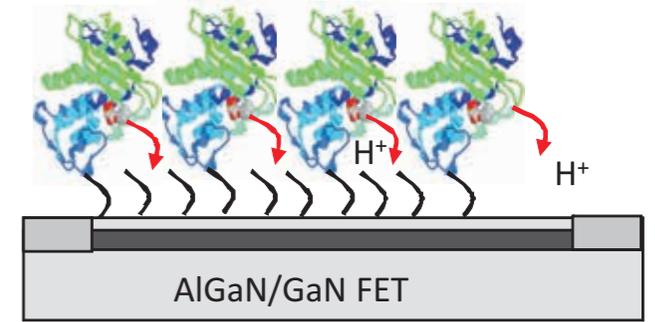


Ein optischer Biosensor, der auf einem photonischen Kristall in einer Silizium-Membran basiert.

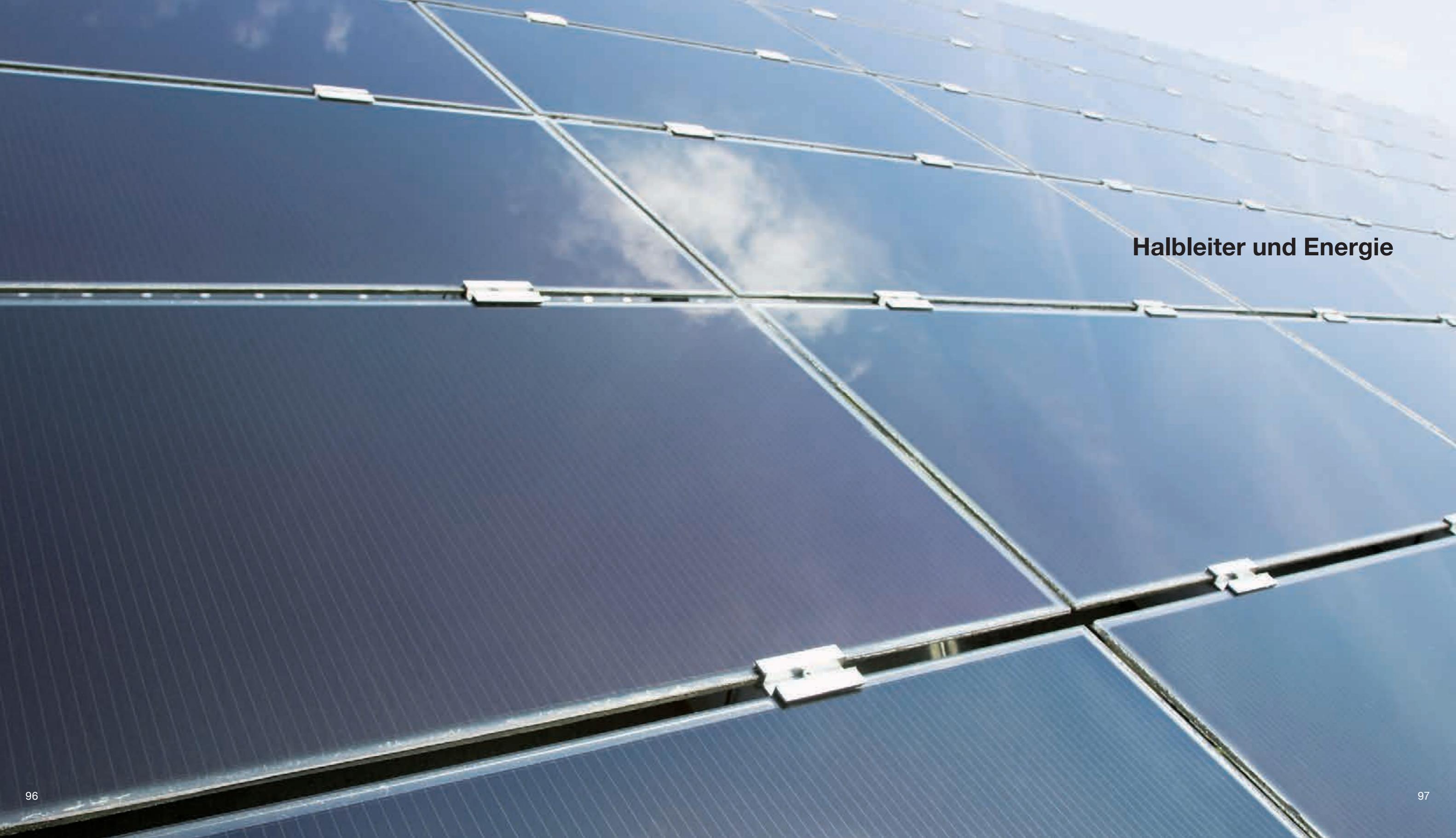
Silizium demonstriert. Ausserdem haben WSI Mitarbeiter schaltbare DNA Schichten entwickelt (*switchDNA* Methode). Dabei werden kurzreichweitige (einige nm) Felder an elektrisch polarisierten Grenzflächen benutzt, um kurze DNA Moleküle mit hoher Effizienz auszurichten. Gleichzeitig kann die Gestalt bzw. Orientierung der Moleküle mit optischen Verfahren (Fluoreszenz-Energietransfer) in Echtzeit bestimmt werden und so wertvolle Informationen über die Wechselwirkungen von geladenen Makromolekülen in stark polarisierter Umgebung gewonnen werden. Werden die DNA Moleküle mit hohen Frequenzen bewegt (geschaltet), erhält die Bio-Oberfläche eine völlig neue Funktionalität: es konnte gezeigt werden, dass Proteine, die an Rezeptoren am obere Ende der DNA anbinden, die Dynamik des Schaltvorganges verlangsamen. Der Grad der Verlangsamung hängt von der Größe des angebondenen Proteins ab – daher kann die Methode benutzt werden, um die Größe von Ziel-Molekülen auf einem Chip zu bestimmen.

Ausblick

Auch in der Zukunft wird die Präparation organisch/anorganischer Heterostrukturen und Bio-Grenzflächen mit gezielt einstellbaren Eigenschaften ein zentrales Thema der Forschung am WSI bleiben. Ein eingehendes Verständnis der Wechselwirkungen zwischen Festkörpern und biologischen Systemen wie Nukleinsäuren, Proteinen oder ganzen Zellen ist eine entscheidende Voraussetzung für das Design der Bauelemente von morgen. Mit Hilfe nanotechnologischer Untersuchungstechniken wird die Forschung am WSI der Visualisierung, Charakterisierung und Manipulation von einzelnen Molekülen gewidmet sein, zum Beispiel bei der Erforschung von Ladungstransfer zu und von einzelnen Proteinen mittels elektrochemischer Rastertunnelmikroskopie. Halbleiter-Nanostrukturen werden auch dazu eingesetzt werden biologische Prozesse nachzubilden, beispielsweise anhand des Durchtritts von Biomolekülen durch künstliche Nanoporen.



Die Oberfläche eines Galliumnitrid-Biosensors ist mit Penicillinase-Enzymen funktionalisiert. Die Anwesenheit von Penicillin wird durch Messung des elektrischen Stromes in einem 2-dimensionalen Elektronengas im Halbleiter detektiert.



Halbleiter und Energie

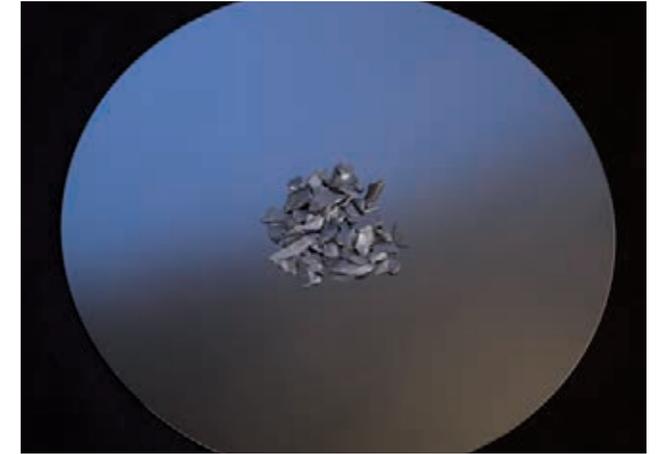
Halbleiter und Energie

Eine der größten Herausforderungen in der Zukunft wird ohne Zweifel die nachhaltige und umweltverträgliche Versorgung einer wachsenden Erdbevölkerung mit billiger und für alle verfügbarer Energie sein. Die meisten Energie-Szenarien fordern insbesondere eine drastische Reduktion des globalen CO₂-Ausstoßes um mehr als 50% bis zum Jahr 2050, um die drohende Klimaerwärmung einigermaßen begrenzen zu können. Auch auf diesem für uns und insbesondere für unsere Kinder im wahrsten Sinne des Wortes lebenswichtigen Gebiet leisten Halbleiter schon heute einen wichtigen Beitrag, der in den nächsten Jahren und Jahrzehnten noch stark zunehmen wird.

Ein für uns alle augenfälliges Zeichen dieser Entwicklung ist das starke Wachstum der Photovoltaik, also des Einsatzes von Halbleiter-Solarzellen in Deutschland, Europa und der gesamten Welt. Der weltweite Stand der Produktion von Solarzellen wird dabei in W_{peak} (Watt-Spitzenleistung) gemessen und gibt an, welche elektrische Leistung die jeweilige Fläche von Solarzellen unter optimaler Bestrahlung durch die Sonne abgeben kann. Im Jahr 1990 lag die Weltjahresproduktion von Solarzellen noch bei bescheidenen 100 Megawatt, was in etwa der Leistung eines einzelnen kleineren Kohlekraftwerkes entspricht. Bis 2000 war die Jahresproduktion immerhin auf etwa 1 Gigawatt angewachsen, also der Leistung eines typischen Kernkraftwerkes. In den vergangenen Jahren hat sich das Wachstum der Solarzellenproduktion weiter beschleunigt, auf eine Zunahme um mehr als 30% pro Jahr. 2007 wurden so bereits Solarzellen mit einer Leistung von 6 Gigawatt installiert. Dies hat unter anderem dazu geführt, dass im Jahr 2006 erstmals mehr Silizium für die Herstellung von Solarzellen verwendet wurde als für die Produktion von Computer-Chips und anderen elektronischen Bauteilen. Auch in den kommenden Jahren kann mit einem weiteren starken Wachstum der Solarzellenproduktion gerechnet werden. Dabei sind die Herstellungskosten von Solarzellen und der damit erzeugten Energie stark gesunken, während die Kosten konventioneller Energieträger ebenso stark zugenommen haben. Es wird erwartet, dass etwa zwischen 2020 und 2030 elektrische Energie aus Solarzellen an guten, sonnigen Standorten kostengünstiger sein wird als konventionell erzeugte elektrische Energie.

Aber bereits heute hat Strom aus Solarzellen für bestimmte Anwendungen deutliche Vorteile gegenüber anderen Stromquellen. Das liegt daran, dass Solarzellen ohne bewegliche Teile auskommen und daher vollkommen wartungsfrei sind. Außerdem benötigen Solarzellen keine zusätzlichen Betriebsmittel und verursachen also keine weiteren Kosten. Einmal installiert, verrichten moderne Solarmodule klaglos mehr als 30 Jahre lang ihre Arbeit. Die Energie, die zu ihrer Herstellung notwendig war, haben sie dabei je nach Standort bereits nach zwei bis fünf Jahren wieder von der Sonne eingefangen, und am Ende ihrer Lebensdauer können sie ohne Schäden für die Umwelt entsorgt und wiederverwertet werden. Dies macht Solarzellen besonders geeignet für den Einsatz an Orten ohne Netzversorgung oder für die Integration in andere Systeme, vom Taschenrechner bis zur Gebäude-Fassade.

Wie in Kapitel 3 bereits dargestellt, besteht das Herz einer jeden Solarzelle aus einer Halbleiterschicht, die das Sonnenlicht einfängt und direkt in elektrischen Strom umwandelt. Dafür ist wie in der Mikroelektronik momentan Silizium das Halbleiter-Material der Wahl. Wie gut eine Solarzelle das einfallende Sonnenlicht dabei in elektrische Energie umwandelt, wird durch ihren Wirkungsgrad gemessen. Der aktuelle Weltrekord für den Wirkungsgrad von Silizium-Solarzellen liegt bei etwa 25%, d.h. ein Viertel der Sonnenenergie wird in elektrische Energie umgewandelt. Dies ist nur knapp unter dem maximalen theoretischen Wirkungsgrad von etwa 30%, der mit Silizium prinzipiell erreicht werden könnte. Um allerdings solch hohe Wirkungsgrade zu realisieren, muss man die besten verfügbaren Silizium-Einkristalle verwenden und zusätzlich einen beträchtlichen technologischen Aufwand betreiben. Beides kann man sich in der Massenproduktion von kostengünstigen Silizium-Solarzellen nicht leisten. Solche Massenprodukte werden daher heute aus weniger hochwertigem „polykristallinem“ Silizium hergestellt, das aus einer unregelmäßigen Anordnung von kleineren, miteinander verschmolzenen Silizium-Kristallen besteht. Dabei gilt aber leider wie bei anderen Produkten auch für Silizium-Solarzellen die Regel „billiger = schlechter“. Polykristalline Solarzellen aus der aktuellen Fertigung erreichen daher auch nur Wirkungsgrade zwischen 15 und 20%. Verwendet man statt polykristallinem Silizium das noch ungeordnete „nanokristalline“ oder „amorphe“ Silizium, so sinkt der Wirkungsgrad sogar auf Werte um 10% ab. Dafür kann man diese sehr ungeordneten Silizium-Varianten aber auch in Form von sogenannten Dünnschicht-Solarzellen verwenden, die nur noch ein Hundertstel der Menge an Silizium benötigen, welche für die Herstellung von polykristallinen Silizium-Solarzellen notwendig ist. Angesichts der zunehmenden Knappheit des Rohstoffes Silizium ist dies also trotz des viel geringeren Wirkungsgrades durchaus eine interessante Alternative für bestimmte Photovoltaik-Anwendungen. So werden Solarzellen aus amorphem Silizium schon seit vielen Jahren zur Stromversorgung von Taschenrechnern oder Uhren verwendet, da für diese spezielle Anwendung wegen des geringen Stromverbrauchs hohe Wirkungsgrade überhaupt nicht notwendig sind.

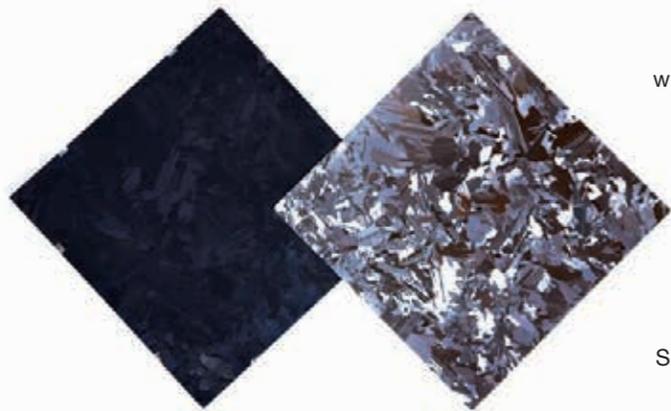


Silizium: Rohstoff und Grundlage der Photovoltaik

Die Tatsache, dass Silizium-Solarzellen aus der aktuellen Produktion mit Wirkungsgraden zwischen 10 und 20% deutlich hinter dem maximal erreichbaren Wert von 30% zurück bleiben, zeigt aber auch gleichzeitig, dass hier noch ein großes Verbesserung-Potential existiert. Dieses Potential kann nur durch intensive Forschungs- und Entwicklungsarbeiten erschlossen werden. Ein aktuelles Beispiel ist die Entwicklung einfacher Verfahren zur Unterdrückung der Reflexion von Licht durch die Oberfläche von Silizium. Die gut polierte Oberfläche einer Silizium-Scheibe reflektiert mehr als ein Drittel des einfallenden Sonnenlichtes. Dies ist der Grund, warum eine solche Scheibe wie ein relativ guter Spiegel wirkt. Das reflektierte Licht dringt aber nicht mehr in den Halbleiter ein und kann damit auch nicht zur Solarstrom-Erzeugung beitragen. Ohne entsprechende Gegenmaßnahmen würde dadurch der maximal erreichbare Wirkungsgrad einer Silizium-Solarzelle von den oben genannten 30% auf unter 20% absinken: ein drastischer Verlust! Deswegen verwenden alle heutigen Solarzellen eine mehr oder minder ausgeklügelte Strategie zur Verminderung der Licht-Reflexion.

Ein besonders effizientes Verfahren zur nahezu vollständigen Unterdrückung der optischen Reflexion von Silizium, das gleichzeitig noch preisgünstig und kompatibel mit der Massenproduktion von Silizium-Solarzellen ist, wurde kürzlich am Walter Schottky Institut entwickelt. Dieses Verfahren beruht auf einem einfachen nasschemischen Ätzprozess, der durch kleinste Metall-Nanopartikel auf der Silizium-Oberfläche katalysiert wird. Innerhalb weniger Sekunden

Halbleiter und Energie

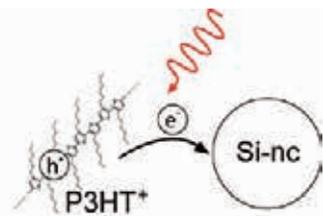


wird dadurch auf der Silizium-Oberfläche eine dünne Nanostrukturierung erzeugt, welche einfallendes Sonnenlicht zu mehr als 97% einfängt. Eine so behandelte Oberfläche erscheint für den Betrachter nahezu schwarz, so dass die Bezeichnung „black silicon“ durchaus angemessen ist. Ein wesentlicher Vorteil dieser von uns entwickelten Methode ist, neben der Kompatibilität mit der Massenproduktion, dass sie ohne große Modifikation auf einkristallines, polykristallines, nanokristallines und sogar auf amorphes Silizium angewendet werden kann.

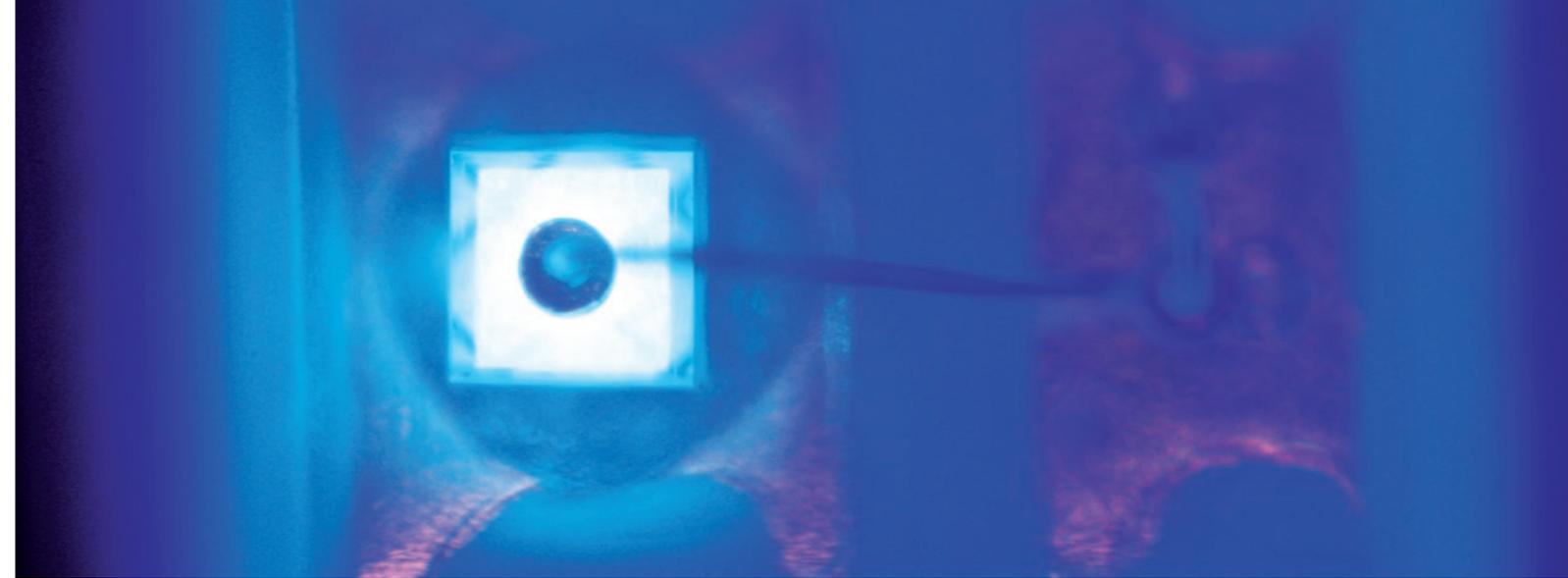
„Schwarzes Silizium“:
Verringerung der Licht-Reflexion durch Nanostrukturierung

Neben Silizium finden noch viele andere Halbleitermaterialien in heutigen Solarzellen Verwendung. So werden z.B. die in Kapitel 4 erwähnten Verbindungshalbleiter wie GaAs oder InP für besonders hocheffiziente Solarzellen in der Satellitentechnik eingesetzt. Andere Verbindungen wie CdTe oder CuInSe₂ („CIS“) werden für die Herstellung moderner Dünnschicht-Solarmodule benutzt. Denkt man aber an einen großtechnischen, globalen Einsatz von Photovoltaik im Umfang von mehreren 100 Gigawatt in der Zukunft, so spielen neben dem Wirkungsgrad auch Fragen der Verfügbarkeit, des Preises und der Umweltverträglichkeit der verwendeten Rohstoffe eine sehr wichtige Rolle. So sind z.B. Gallium und Indium relativ selten vorkommende Metalle, deren ausreichende Verfügbarkeit zu vernünftigen Preisen keinesfalls selbstverständlich ist. Selbst Silizium als zweithäufigstes Element der Erde mit einer Jahresproduktion von mehr als 60.000 Tonnen in 2007 ist durch den Solarzellen-Boom zwischenzeitlich knapp geworden, was zu einem starken Anstieg des Marktpreises für Roh-Silizium geführt hat.

Als mögliche Alternative werden deswegen große Hoffnungen auf organische Solarzellen gesetzt, bei denen Silizium durch Kohlenstoff und Wasserstoff als wesentliche chemische Bestandteile ersetzt wird. Halbleiter aus organischen Verbindungen wie halbleitenden Polymeren oder bestimmten organischen Molekülen werden weltweit seit vielen Jahren erforscht und haben inzwischen in der Form von organischen Leuchtdioden („OLEDs“) Marktreife erreicht. Solarzellen aus organischen Halbleitern befinden sich allerdings mit bisher demonstrierten Wirkungsgraden von 5% im Labormaßstab noch in den photovoltaischen Kinderschuhen. Eine derzeit viel diskutierte Lösung könnte in der Kombination von konventionellen anorganischen und organischen Halbleitern liegen. Solche „Hybrid-Solarzellen“ haben das Potential, die jeweiligen Vorteile organischer und anorganischer Halbleiter in einem goldenen Mittelweg hinsichtlich Preis, Verfügbarkeit, Wirkungsgrad und Langzeitstabilität zu vereinen. Hierzu ist allerdings noch sehr viel grundlegende Forschungsarbeit zu leisten. Das Walter Schottky Institut arbeitet auf diesem neuen Forschungsgebiet aktuell zusammen mit einem Partner aus der Industrie an der Klärung der Frage, wie Elektronen als Träger des elektrischen Stromes unter Einwirkung von Licht zwischen organischen und anorganischen Halbleitern transferiert werden können und welche grundlegenden Designkriterien für die Realisierung einer hybriden Solarzelle wichtig sind.



Transfer optisch angeregter Elektronen zwischen Silizium-Nanopartikeln und organischen Molekülen in einer hybriden Solarzelle



Leuchtdioden: Die zweite Halbleiter-Revolution hat begonnen!

Halbleiter helfen aber nicht nur bei der Energiegewinnung, sondern auch beim Sparen von wertvoller Energie. So erlaubt inzwischen die Halbleiter-Elektronik durch ausgeklügelte Steuer- und Regelungstechnik in nahezu allen Bereichen des wirtschaftlichen und privaten Lebens, energierelevante Prozesse zu optimieren und unnötige Energieverluste zu vermeiden. Als typisches Beispiel seien etwa die Netz- und Ladegeräte für mobile elektronische Geräte wie Handys oder Laptop-Computer genannt. Hier ist es inzwischen selbstverständlich geworden, dass solche Geräte fast nichts mehr kosten, sehr leicht sind, überall auf der Welt eingesetzt werden können und dabei ihre Aufgabe mit sehr geringen Energieverlusten erledigen. Ermöglicht wurde dies durch die Ablösung der alten Netzteiltechnik auf der Basis von schweren Transformatoren durch moderne Halbleiter-Schaltungen. In Zukunft sind hier noch weitere Verbesserungen durch den breiten Einsatz von Halbleitern mit großer Bandlücke wie Siliziumkarbid (SiC) oder Galliumnitrid (GaN) zu erwarten.

Ein noch viel größeres Einsparungspotential bietet allerdings die Beleuchtungstechnik! Derzeit benutzt der größte Teil der Menschheit noch altmodische und äußerst ineffiziente Lichtquellen wie Kerosinlampen oder die seit mehr als 100 Jahren kaum verbesserte Glühlampe des Thomas A. Edison, um der Nacht einige zusätzliche Stunden für Arbeit oder Freizeit abzuringen. Dabei erzeugen diese alten Lichtquellen hauptsächlich Abwärme statt Licht, und so werden etwa

25% der gesamten auf der Erde erzeugten elektrischen Energie, die heute allein für Beleuchtungszwecke verwendet wird, buchstäblich verheizt. Aber auch hier wird die Halbleiter-Technologie in den kommenden Jahren grundlegende Veränderungen bewirken. Mit der Entwicklung von effizienten grünen und blauen Leuchtdioden auf der Basis des Halbleiter-Materials Galliumnitrid in den letzten zehn Jahren stehen nunmehr Halbleiter-Lichtquellen mit höchsten Wirkungsgraden für die drei Grundfarben rot, grün, und blau zur Verfügung, aus denen alle anderen Farben sowie rein weißes Licht durch additive Farbmischung erzeugt werden können. Auch an dieser Entwicklung waren und sind Wissenschaftler des Walter Schottky Institutes beteiligt: sei es bei der Optimierung der Herstellungsmethoden für neue Halbleiter-Materialien, der Untersuchung grundlegender Fragen wie der Dotierung dieser Materialien oder bei der Entwicklung Laser-gestützter Herstellungsverfahren, die heute in der Massenproduktion von Hochleistungs-Leuchtdioden eingesetzt werden. Es wird zwar noch einige Jahre dauern, bis dieser Optimierungsprozess abgeschlossen ist und die Preise für Leuchtdioden durch die zunehmende Massenproduktion wirklich für jedermann erschwinglich sein werden. Aber auch hier wird die effiziente und Ressourcen-schonende Halbleiter-Technologie letztlich die alte Vakuumröhren-Technologie des vorigen Jahrhunderts ablösen. Die zweite Halbleiter-Revolution hat bereits begonnen!

Leben am Walter Schottky Institut





Präsentation der neuesten Reinraum-Kollektion



Im Winter finden Lehrstuhlseminare im Zillertal und der Wildschönau statt.



Das bewährte Organisationsteam des Walter Schottky Instituts, hier nach der Veranstaltung der MSS6-Konferenz in 1993.



Das Sommerfest ist das größte Fest des Schottky Instituts, mit Vorträgen ehemaliger Doktoranden, Fußball- und Volleyball-Turnier und Grillen bis tief in die Nacht.



Bereits das 10-jährige Bestehen des Schottky Instituts wurde mit einem wissenschaftlichen Symposium gefeiert.



Öffentlichkeitsarbeit wird groß geschrieben am WSI, von Vorlesungen für Schüler bis zum jährlichen Tag der offenen Tür, bei dem jeweils etwa 500 Gäste durch das Haus geführt werden.



Die Weihnachtsfeier mit Posaunenchor, Kammerkonzerten und kabarettistischen Einlagen bringt die verborgenen künstlerischen Begabungen des Instituts zum Vorschein. Der Höhepunkt des Abends sind aber Lob und Tadel des Nikolaus.



Nach bestandener Prüfung werden die frischen Doktoren mit Doktorhut und Talar um das Institut gefahren.



Leben am Walter Schottky Institut

Der Wandertag im Herbst führt in die Münchner Hausberge, den Chiemgau oder Tirol.





Das WSI in Zahlen

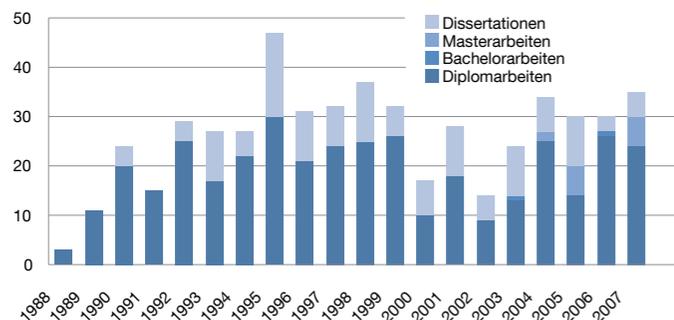
Das WSI in Zahlen

Und nun zu einigen Zahlen und Fakten ... Die statistische Beschreibung einer Organisation wie des Walter Schottky Instituts gibt nicht nur einen Eindruck ihrer Entwicklung, ihres Wachstums und ihrer Leistungen, sondern veranschaulicht auch wie menschliche und akademische Faktoren zusammenwirken, um die Erfolge hervorzubringen, derer sich das Schottky Institut in den letzten zwanzig Jahren erfreut. Statt nur Listen und Tabellen mit Personal- und Studentenzahlen, Forschungsmitteln, Veröffentlichungen, Ehrungen und Preisen wiederzugeben, möchten wir hier ein historisches Profil des WSI in Zahlen zeichnen.

Unser Institut, unsere Mitarbeiter und unsere Studenten

Seit Aufnahme des Forschungsbetriebes im Mai 1988 verfügt das WSI über eine Gesamtfläche von 2400 m², aufgeteilt in Labors, Werkstätten und Büros für Wissenschaftler und Verwaltung. Das bayerische Wissenschaftsministerium schuf drei Lehrstühle. Davon ist ein Lehrstuhl in der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik angesiedelt, zwei Lehrstühle gehören zur Fakultät für Physik der TUM. So wurde und wird sichergestellt, dass die Forschungsgebiete am Walter Schottky Institut sowohl grundlegende Fragen der Halbleiterphysik umfassen, sich aber auch neuen physikalischen und technologischen Ansätzen zuwenden, die zur Entwicklung und Verwirklichung innovativer Bauelemente führen. Die Zahl der Wissenschaftler am Walter Schottky Institut ist stetig gestiegen. Heute umfasst das WSI die Forschungsgruppen von Gerhard Abstreiter, Markus-Christian Amann, Martin S. Brandt, Anna Fontcuberta i Morral, Jonathan J. Finley, Alexander Holleitner, Reinhard Scholz, Martin Stutzmann, und Peter Vogl mit insgesamt etwa 140 Mitarbeitern, einschließlich Nachwuchsgruppenleitern, wissenschaftlichem und technischem Personal, Postdoktoranden und Gastwissenschaftlern, Sekretärinnen, Doktoranden sowie Diplom- und Master-Studenten. Insgesamt 30 Stellen werden vom Freistaat Bayern finanziert, während praktisch alle Doktorandenstellen aus eingeworbenen Forschungsmitteln stammen.

Von Beginn an wurde der relative kleine Kern permanenter Wissenschaftler durch das Lebenselixir aller erfolgreichen Forschungsinstitute, die Studenten, verstärkt. Von diesen haben inzwischen etwa 350 ihre Diplom- bzw. Masterarbeiten am WSI erfolgreich angefertigt. Im



gleichen Zeitraum haben 130 Doktoranden ihre Dissertationen abgeschlossen. Alle diese Studenten haben in kurzer Zeit nach Abschluss ihrer Arbeiten interessante und zukunftsstrahlende Arbeitsplätze gefunden. Etwa 70% der ehemaligen Doktoranden sind in der „high-tech“-Industrie beschäftigt. 20% blieben im akademischen Bereich, ein Drittel von ihnen sind jetzt Professoren an Universitäten oder Direktoren von Forschungsinstituten. Etwa 10% gingen in andere Tätigkeitsfelder wie das Patent- und Beratungswesen. Die Gesamtzahl der Diplom- und Doktorarbeiten am WSI stieg dabei von weniger als 20 pro Jahr in den frühen 1990ern auf über 30 in den letzten Jahren. Seit 1997 werden fast alle Dissertationen in einer Buchserie veröffentlicht und sind so auch der breiten wissenschaftlichen community zugänglich. Gegenwärtig umfasst diese Serie 93 Bände. Die Herausgabe dieser Buchreihe stellt eine der vielen Leistungen des Vereins zur Förderung des Walter Schottky Instituts der Technischen Universität München e.V. dar, der 1997 mit dem Ziel gegründet wurde, die Verbindungen zu früheren Institutsmitgliedern und Kollegen aufrecht zu halten und zu stärken.

Forschungsfinanzierung

In den letzten 20 Jahren hat sich das Walter Schottky Institut den Ruf erworben, zur Weltspitze im Bereich der Herstellung und Charakterisierung erstklassiger Halbleiterheterostrukturen zu gehören und führend in der Halbleiter-Nanowissenschaft tätig zu sein. Etwa 60-70% des jährlichen Gesamthaushalts unseres Instituts (ungefähr 4-5 Mio. €) entstammt eingeworbenen Drittmitteln aus verschiedenen Quellen wie etwa der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG), dem Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), dem Freistaat und der Europäischen Union. Darüber hinaus kommt etwa ein Viertel der Forschungsmittel aus Industriekooperationen mit Partnern wie z.B. der Degussa AG, Fujitsu Laboratories, Siemens und BMW. Die gesamten Drittmitteleinnahmen für die Jahre 2004 bis 2006 betragen 11,3 Mio. €. Dazu kommen noch sieben Projekte, die im Rahmen des Exzellenzclusters „Nanosystems Initiative Munich“ (NIM, www.nim.de) gefördert werden, sowie Projekte in der Internationalen Graduiertenschule „Materials Science of Complex Interfaces“ (Complnt, www.compint.ph.tum.de) und in der TUM „International Graduate School of Science and Engineering“ (IGSSE, www.igsse.de).

Die gerade genannte Nanosystems Initiative Munich gehört zu den ersten fünf Exzellenzclustern in den Naturwissenschaften, die im Oktober 2006 durch die Exzellenzinitiative des Bundes zur Förderung ausgewählt wurden. Innerhalb von NIM kooperieren im Raum München Wissenschaftler aus den Gebieten Physik, Biophysik, Physikalische Chemie, Biochemie, Pharmazie, Biologie, Elektronik und Medizin mit dem Ziel, künstliche multifunktionale Nanosysteme zu entwickeln. Sechs Projektleiter aus dem Walter Schottky Institut beteiligen sich mit insgesamt sieben Projekten an NIM. Darüber hinaus gibt es seit Oktober 2007 eine Forschungsgruppe, die von NIM finanziert am Walter Schottky Institut angesiedelt ist und von Alexander Holleitner geleitet wird. Diese neue Gruppe trägt die Verantwortung für den Aufbau

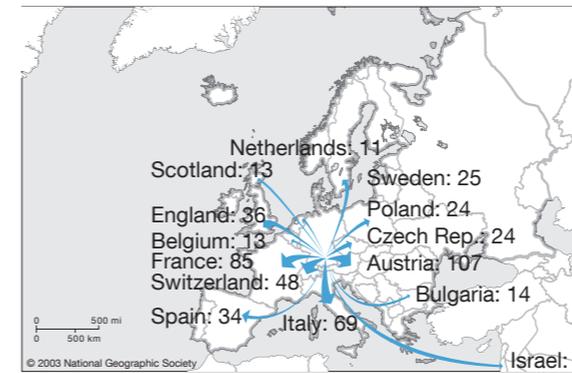


einer verbesserten Infrastruktur für die Herstellung von Nanostrukturen mit Hilfe fokussierter Elektronen- bzw. Ionenstrahlen. Die Kosten dieser Anschaffungen in Höhe von 1,6 Mio. € werden ebenfalls aus dem Exzellenzcluster bestritten. Um einen ganz akuten Engpass in der Qualität und Quantität insbesondere der zur Verfügung stehenden Laborflächen zu überwinden und die steigende Zahl unabhängiger Nachwuchsgruppen unterbringen zu können, wurde Ende 2007 eine bauliche Erweiterung des WSI mit Gesamtkosten von ca. 14 Mio. € bewilligt. Diese Kosten tragen Bund und Freistaat Bayern jeweils zur Hälfte. Die Planung für das neue Gebäude, das den Namen Center for Nanotechnology and Nanomaterials (CNN) tragen wird, ist nahezu abgeschlossen. Dieser Forschungsneubau, der unmittelbar neben dem WSI errichtet wird, soll 2010 fertiggestellt werden. Das CNN wird eine Gesamtfläche von 2000 m² umfassen, aufgeteilt in Laboratorien, Büros und Seminarräume und wird einen 600 m² großen Reinraum beinhalten, in dem Geräte für die Herstellung von Nanostrukturen wie auch verschiedenste Apparaturen zu ihrer Untersuchung betrieben werden können. Ungefähr die Hälfte der Laborfläche wird Nachwuchsgruppen zur Verfügung stehen.

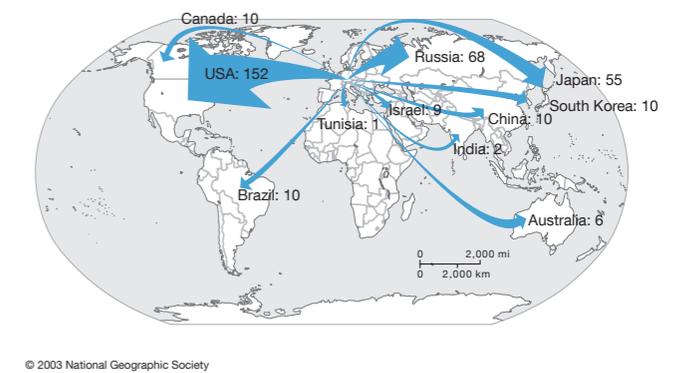
Nationale und internationale Zusammenarbeiten

Die Erfolge des WSI insbesondere auf dem Gebiet des Wachstums von Halbleitermaterialien und -heterostrukturen und der Herstellung von Nanostrukturen haben zu einer großen Zahl nationaler und internationaler Kooperationen geführt. Diese Kooperationen betreffen insbesondere das Wachstum und die Modifikation hochreiner Halbleiter wie Si, Ge, Arseniden, Antimoniden, Nitriden, Phosphiden, Oxiden und ferromagnetischer Halbleiter (siehe Kapitel 4) sowie die Herstellung niedrigdimensionaler Nanostrukturen (Kapitel 5 und 6). Dabei kam es zu vielfachem Austausch von Mitarbeitern, Studenten und Fachwissen mit anderen Forschungsgruppen und Industriefirmen aus vielen Ländern. So hat das WSI in den letzten 20 Jahren mehr als 1000 wissenschaftliche Arbeiten mit anderen deutschen Gruppen gemeinsam publiziert, hinzu kommen viele hundert Veröffentlichungen mit Kollegen aus über 40 anderen Nationen. Durch solche weltweiten Verbindungen ziehen die Wissenschaftler des WSI und ihre Kooperationspartner großen Nutzen aus dem offenen und freien Austausch von Information, der kennzeichnend für die moderne Wissenschaft ist.

European Collaborations (1987 - May 2008)



International Collaborations (1987 - May 2008)



Anzahl gemeinsamer Veröffentlichungen des Walter Schottky Instituts und anderer Gruppen in Europa (links) und außerhalb Europas (rechts).
Quelle: ISI Web of Science, Mai 2008.

Start up-Firmen

Zum Selbstverständnis der Wissenschaftler des Walter Schottky Instituts gehört es, wenn möglich aus neuen wissenschaftlichen Konzepten innovative Produkte zu entwickeln. Über die Jahre wurden viele Patente aus dem WSI erfolgreich angemeldet. Zusätzlich wurden drei Firmen von WSI-Wissenschaftlern auf der Grundlage ihrer Forschungsarbeiten am Institut gegründet.

Dr. Karl Eberl gründete die Firma MBE-Komponenten GmbH (www.mbe-components.com) im Jahre 1989, nachdem er als erster Doktorand seine Dissertation am WSI unter Anleitung von Gerhard Abstreiter abgeschlossen hatte. Thema seiner Doktorarbeit waren Heterostrukturen aus SiGe. Er erkannte einen Markt für spezielle Komponenten und Systeme, die für die Herstellung von Halbleiterheterostrukturen durch Epitaxie benötigt werden. Seine ersten Produkte waren Sublimationszellen für Silizium und Kohlenstoff sowie Hochtemperatur-Effusions-Zellen für die Molekularstrahlepitaxie. Seine Firma wächst und floriert jetzt schon seit nahezu 20 Jahren.



Die VERTILAS GmbH, die ihren Sitz im Technologie- und Gründerzentrum gate auf dem Garchingener Forschungsgelände hat, wurde im Dezember 2001 von Mitgliedern des Lehrstuhls für Halbleitertechnologie des WSI gegründet. Die Firma entwickelt und produziert neuartige Laserdioden für die optische Kommunikation, Sensoren und Messmethoden. Mit ihren neuentwickelten Laserdioden im Wellenlängenbereich zwischen 1,3 und 2 Mikrometern ist VERTILAS einer der weltweit führenden Anbieter auf dem Gebiet der VCSEL in diesem Wellenlängenbereich. Im Gegensatz zu herkömmlichen Laserdioden emittieren sie senkrecht zur Waferoberfläche, daher der Name VCSEL für „vertical cavity surface emitting laser“. Diese VCSEL bestechen durch ihre Einsatzmöglichkeiten für den Datentransfer mit sehr hohen Bit-



Das WSI in Zahlen

raten (bis zu 10 GBit/s), sowie durch ihr kleines Volumen, geringen Schwellstrom und niedrige Leistungsaufnahme. Wie in Kapitel 8 diskutiert, bilden langwellige VCSEL das Herzstück der zukünftigen optischen Nachrichten-Kommunikation. Es wird erwartet, dass dadurch ein kostengünstiger direkter Anschluss von Privatkunden an Glasfaser-Kommunikationsnetze ermöglicht wird. Über die Anwendungen in der Kommunikationstechnik hinaus ermöglichen die langwelligen VCSEL der Firma VERTILAS eine Vielzahl hochempfindlicher optischer Messverfahren wie z.B. die Bestimmung von Verunreinigungen in der Atmosphäre.

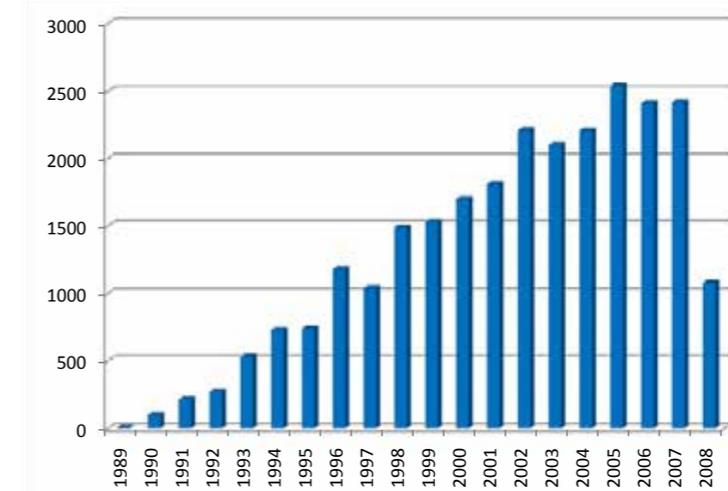


Während sich experimentelle Erfolge in neuen Bauelementen niederschlagen können, lassen sich theoretische Erkenntnisse in der Form von Simulationsprogrammen ebenfalls kommerziell verwerten. Nach Abschluss seiner Promotion bei Peter Vogl begann Stefan Birner mit der Vermarktung von nextnano³, einem Programmpaket zur Simulation der physikalischen und elektronischen Eigenschaften realistischer Hetero- und Nanostrukturen (www.nextnano.de). Wie in Kapitel 9 besprochen, ist dieses sehr vielseitige Programmpaket geeignet, unter Benutzung der Quantenmechanik die elektronischen Eigenschaften beliebiger Halbleiternanostrukturen zu berechnen. Darüber hinaus kann auch der elektrische Stromfluss durch solche Strukturen bestimmt werden, in naher Zukunft gilt das auch für die optischen Eigenschaften. Erst kürzlich hat die Firma nextnano³ Fördermittel des BMBF im Rahmen des Programms EXIST-SEED erhalten, mit dem Start up-Firmen gefördert werden.

Veröffentlichungen

Einen objektiven Eindruck der wissenschaftlichen Produktivität jedes Forschungsinstituts liefern die Zahlen an Veröffentlichungen in der wissenschaftlichen Literatur sowie deren Akzeptanz in der internationalen Wissenschaftlergemeinschaft. Seit der Eröffnung im Jahre 1988 sind über 1600 Veröffentlichungen unter Beteiligung des Walter Schottky Instituts erschienen. Diese bemerkenswerte Zahl entspricht etwa 1 bis 2 Publikationen pro Woche. Diese 1600 Veröffentlichungen wurden inzwischen über 27.000 mal zitiert (Quelle: ISI Web of Science). Darunter sind 77 Veröffentlichungen in Physical Review Letters, 228 in Applied Physics Letters, 231 in Physical Review B und 17 in Science, Nature, Nature Materials und Nature Physics. Die Anzahl an Zitierungen dieser Arbeiten steigt jährlich, bis Mai wurden allein im Jahre 2008 Veröffentlichungen des WSI bereits über 1300 mal von anderen Wissenschaftlern in deren Arbeiten erwähnt.

Neben den wissenschaftlichen Veröffentlichungen erwachsen aus neuen Ideen und am WSI entwickelten Technologien zahlreiche Patente. Von den etwa zwei Patenten pro Jahr werden viele bereits kommerziell verwertet. Beispiele sind der „high-electron mobility transistor“ (HEMT), zu dem grundlegende Arbeiten in den 1990er Jahren am WSI durchgeführt wurden, und Leuchtdioden aus Gruppe-III-Nitriden, die von der Firma Osram mittels eines am WSI entwickelten „laser lift-off“-Verfahrens produziert werden.



Anzahl an Zitierungen von Veröffentlichungen des Walter Schottky Instituts pro Jahr

Preise für Wissenschaftler und Studenten

Die hohe Qualität der wissenschaftlichen Arbeit am Walter Schottky Institut spiegelt sich auch in der großen Zahl von Preisen und Auszeichnungen wider, die unseren Studenten und Wissenschaftlern verliehen wurden. Im Lauf der letzten zwanzig Jahre wurden unsere Absolventen mit mehr als zwanzig Preisen für herausragende Forschung auf verschiedenen internationalen Konferenzen der Halbleiterphysik ausgezeichnet. So gehen z.B. bei der im Jahre 2008 stattfindenden 29. Internationalen Halbleiterphysikkonferenz (ICPS) in Rio de Janeiro zwei von nur acht Auszeichnungen für die besten Arbeiten junger Forscher an Doktoranden des WSI, bei einer Gesamtteilnehmerzahl von über 1300. Doktorandinnen und Doktoranden unseres Institutes erhielten dreimal den Preis des Bundes der Freunde der TU München, der für die beste Dissertation aus der Fakultät für Physik in jedem zweiten Jahr vergeben wird sowie andere Auszeichnungen wie mehrfach den Chorafas-Preis, den Edison-Preis der Firma General Electric und den Corbett-Preis der Internationalen Konferenz über Defekte in Halbleitern. Insgesamt bezeugen diese Preise die ausgezeichneten Fähigkeiten und die Hingabe aller unserer Doktorandinnen und Doktoranden, die uns stolz machen.

Mehr als zehn hochrangige Preise gingen an ältere Mitglieder des Institutes. Dazu gehört der angesehene Walter-Schottky-Preis der Deutschen Physikalischen Gesellschaft (DPG), der an Wissenschaftler aus der Festkörperphysik verliehen wird, die das 40. Lebensjahr noch nicht vollendet haben. Es passt zum Namen unseres Instituts, das dieser Preis an drei seiner Mitglieder ging: 1986 an Gerhard Abstreiter, 1988 an Martin Stutzmann und 2007 an



Jonathan Finley. Gerhard Abstreiter erhielt eine ganze Reihe weiterer hochrangiger Preise, darunter insbesondere 1987 den Gottfried Wilhelm Leibniz-Preis der DFG, 1998 den vom britischen Institute of Physics und der DPG gemeinsam verliehenen Max-Born-Preis sowie 2006 den Friedrich Wilhelm Joseph von Schelling-Preis der Bayerischen Akademie der Wissenschaften. Markus-Christian Amann wurde, gemeinsam mit Markus Ortsiefer, einem seiner Doktoranden, 2004 mit dem Karl-Heinz-Beckurts-Preis ausgezeichnet. Dieser Preis wird von der gleichnamigen Stiftung für hervorragende Leistungen auf dem Gebiet der Grundlagenforschung, und zusätzlich für die Kommerzialisierung neuer Ideen auf höchstem technischem Niveau verliehen.

Rufe auf Professuren

Die hervorragenden wissenschaftlichen Leistungen führen auch immer wieder dazu, dass Mitglieder des Instituts Rufe an deutsche und ausländische Universitäten erhielten, und zwar bis heute mehr als zwanzig mal. Während viele dieser Rufe angenommen wurden und Teil der Karriere junger Wissenschaftler sind, sind wir jedoch auch froh, dass einige Professoren es vorgezogen haben, ihre Forschungs- und Lehrtätigkeit am Walter Schottky Institut fortzusetzen. Auch dies spricht für die Leistungsfähigkeit des Instituts.

Lehre

Entscheidender Teil des Universitätslebens ist die Vermittlung aktueller Forschung an die Studierenden. Alle wissenschaftlichen Mitarbeiter des Walter Schottky Instituts nehmen aktiv und mit Freude an der Lehre teil. Dazu gehören Grundvorlesungen, Vorlesungen im Hauptstudium wie Festkörperphysik und Fortgeschrittene Quantenmechanik und Spezialvorlesun-

gen zu Grundlagen der Halbleiterphysik, Optoelektronik, Theoretischer Festkörperphysik, Nanophotonik, Physik niedrigdimensionaler Systeme, Biophysik, Quantencomputing, Erneuerbaren Energien und Quantenoptik. Die Doktoranden beteiligen sich intensiv an der Lehre durch die Leitung von Übungsgruppen und Praktika, die vielfach direkt in den Labors des WSI stattfinden. Dabei kommen häufig neue Techniken zum Einsatz, ganze Vorlesungen können zu beliebiger Zeit im Internet aufgerufen und mitverfolgt werden. Die Vorlesungen werden durch die Fachschaft, die Vertretung der Physik-Studenten an der TU München, evaluiert. Dabei erhalten Vorlesungen von Mitgliedern des WSI immer nur gute bis sehr gute Bewertungen. Häufig drücken sich diese Ergebnisse durch die Verleihung der „Goldenen Kreide“ aus, die die Studenten selbst jedes Semester für die besten Vorlesungen vergeben. Mitglieder des WSI haben in den letzten Jahren 14 dieser Auszeichnungen erhalten. Vorlesungen aus dem WSI erhielten damit im Durchschnitt doppelt so viele Auszeichnungen wie Vorlesungen in der gesamten Fakultät. Diese direkte Auszeichnung durch die Studierenden der TU München ist uns Freude und Ansporn.

Lehrstuhlinhaber und Gruppenleiter – Kontaktadressen



Gerhard Abstreiter
abstreiter@wsi.tum.de
Tel. 089.289.12770

- Strukturelle, elektronische und optische Eigenschaften von Halbleiter-Nanostrukturen
- Molekularstrahlepitaxie für hochreine Heterostrukturen
- Selbstassemblierung von Halbleiter-Quantenpunkten und -Quantendrähten
- Neuartige Bauelemente für Nanoelektronik, Optoelektronik, Quanten-Information-Technologie und Biosensorik



Dominique Bougeard
bougeard@wsi.tum.de
Tel. 089.289.12777

- Si-basierende Molekularstrahlepitaxie
- Magnetische Halbleiter
- Isotopenreine Si/SiGe-Heterostrukturen
- Si-basierende Spintronik



Jonathan J. Finley
finley@wsi.tum.de
Tel. 089.289.12776

- Nano-Photonik
- Halbleiter-Nanostrukturen
- Quantenoptik
- Spintronik



José A. Garrido
garrido@wsi.tum.de
Tel. 089.289.12766

- Elektronische Eigenschaften von Diamant
- Organische Halbleiter
- Biosensorik und Bioelektronik
- Halbleiter-Elektrochemie



Markus-Christian Amann
mcamann@wsi.tum.de
Tel. 089.289.12780

- Epitaxie der III-V-Verbindungshalbleiter
- Oberflächenemittierende Laserdioden
- Quantenkaskadenlaser
- Modellierung und Berechnung optoelektronischer Bauelemente
- Mikrowellen-Halbleiterbauelemente



Martin S. Brandt
brandt@wsi.tum.de
Tel. 089.289.12758

- Halbleiterspektroskopie
- Elektronische, optische und magnetische Eigenschaften von Defekten
- Spinphysik und magnetische Resonanz
- Ferromagnetische Halbleiter
- Nanostrukturen auf der Basis von Silizium



Anna Fontcuberta i Morral
annafm@wsi.tum.de
Tel. 089.289.12779

- Nanotechnologie
- Halbleiter-Nanodrähte
- Optische Spektroskopie
- Molekularstrahlepitaxie



Alexander Holleitner
holleitner@wsi.tum.de
Tel. 089.289.12775

- Experimentelle Halbleiternanophysik
- Optoelektronik und Elektronik auf der Nanometerskala
- Nanolithographie
- Spintronik

Lehrstuhlinhaber und Gruppenleiter – Kontaktadressen



Ralf Meyer
meyer@wsi.tum.de
Tel. 089.289.12790

- Epitaxie von III/V-Verbindungshalbleitern
- Abstimmbare Laser-Dioden
- Einzelphotonenquellen
- Mikrowellen-Halbleiterbauelemente



Reinhard Scholz
reinhard.scholz@wsi.tum.de
Tel. 089.289.12752

- Theorie der Exzitonen und spektroskopischen Eigenschaften von Molekülkristallen
- Theorie der elektronischen Bandstruktur anorganischer Halbleiter



Martin Stutzmann
stutz@wsi.tum.de
Tel. 089.289.12760

- Großflächige Elektronik
- Photovoltaik
- Bioelektronik
- Sensoren und Aktuatoren
- Halbleiter mit großer Bandlücke



Peter Vogl
vogl@wsi.tum.de
Tel. 089.289.12750

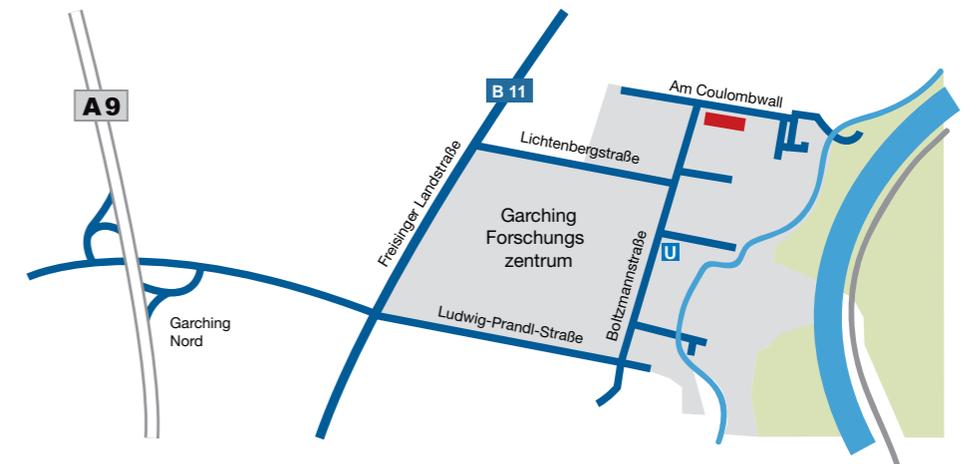
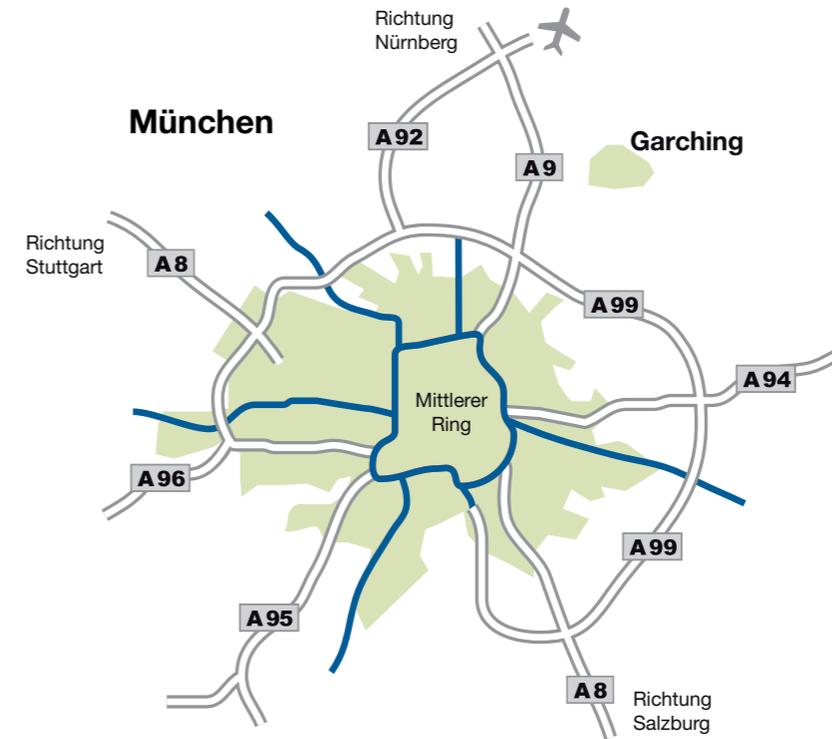
- Theorie von halbleiterbasierter Quanteninformationsverarbeitung
- Theorie neuer Spinbauelemente mit und ohne Magnetfeldern
- Nichtgleichgewichts-Greensfunktionentheorie von Quantenkaskadenlasern
- Mesoskopische Theorie elektronischer und optischer Eigenschaften von Nanostrukturen



Ulrich Rant
rant@wsi.tum.de
Tel. 089.289.12778

- Elektrische Manipulation von DNA auf Oberflächen
- Metallisierte DNA
- Nano-Plasmonik
- Biosensoren

Walter Schottky Institut – Technische Universität München
Am Coulombwall 3 · 85748 Garching · Fax: 089.289.12737, 089.3206620



Herausgeber:

Walter Schottky Institut
Technische Universität München

Redaktion:

Prof. Dr. Martin Brandt, Prof. Dr. Jonathan Finley, Dr. Ralf Meyer

Autoren:

Prof. Dr. Gerhard Abstreiter, Prof. Dr. Markus-Christian Amann,
Prof. Dr. Martin Brandt, Prof. Dr. Jonathan Finley, Dr. Anna Fontcuberta i Morral,
Dr. José Garrido, Prof. Dr. Alexander Holleitner, Dr. Ralf Meyer, Dr. Ulrich Rant,
Prof. Dr. Martin Stutzmann, Prof. Dr. Peter Vogl

Grafiken:

Walter Schottky Institut

Fotos:

Walter Schottky Institut

Luftaufnahme:

FOTAG Luftbild, München, www.FOTAG.de

Gestaltung:

ediundsepp Gestaltungsgesellschaft, München

Druck:

Druckerei Joh. Walch GmbH & Co. KG,
Im Gries 6, 86179 Augsburg

Auflage:

1400

