



20

Zwanzig Jahre
Fraunhofer IISB

20 Jahre Fraunhofer IISB in Erlangen

Erinnerungen
Entwicklungen
Erfolge



Fraunhofer Institut
Integrierte Systeme und
Bauelementetechnologie

Impressum

Herausgeber

Fraunhofer-Institut für Integrierte Systeme
und Bauelementetechnologie (IISB)
Schottkystraße 10
91058 Erlangen
Tel. 09131 761-0
Fax 09131 761-390
info@iisb.fraunhofer.de
www.iisb.fraunhofer.de

Redaktion

Dr. Eberhard Bär
Prof. Dr. Heiner Ryssel

Fotos und Abbildungen

Fraunhofer IISB
Fraunhofer IIS
Fraunhofer-Gesellschaft
Kurt Fuchs, Erlangen
Bayerische Staatskanzlei
Bundesministerium für Bildung und Forschung
Universität Erlangen-Nürnberg
Stadt Erlangen
Baumüller GmbH, Nürnberg

Druck

Roland Heßler, Erlangen

© Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der
angewandten Forschung e.V., München, 2005

Inhalt

Vorwort des Leiters des Fraunhofer IISB <i>Prof. Dr. Heiner Ryszel</i>	4
Grußwort des Präsidenten der Fraunhofer-Gesellschaft <i>Prof. Dr. Dr. h.c. Hans-Jörg Bullinger</i>	5
Grußwort des Bayerischen Ministerpräsidenten <i>Dr. Edmund Stoiber</i>	6
Grußwort des Staatssekretärs im BMBF <i>Prof. Dr. Frieder Meyer-Krahmer</i>	7
Grußwort des Rektors der Universität Erlangen-Nürnberg <i>Prof. Dr. Karl-Dieter Gröske</i>	8
Grußwort des Oberbürgermeisters der Stadt Erlangen <i>Dr. Siegfried Balleis</i>	9
Grußwort des Vizepräsidenten der IHK Nürnberg für Mittelfranken <i>Dipl.-Ing. Günter Baumüller</i>	10
1. Das Fraunhofer IISB in Erlangen	11
2. Meilensteine der Entwicklung des IISB	13
3. Erinnerungen an 20 Jahre IISB in Erlangen	16
4. Die Abteilungen des IISB	
<i>Technologiesimulation</i>	24
<i>Halbleiterfertigungsgeräte und –methoden</i>	30
<i>Technologie</i>	34
<i>Kristallzüchtung</i>	38
<i>Leistungselektronische Systeme</i>	43
5. Programm der Festveranstaltungen am 30. Juni und 1. Juli 2005	47

Vorwort
des Leiters des Fraunhofer-Instituts für Integrierte Systeme
und Bauelementetechnologie (IISB)
Prof. Dr. Heiner Ryssel



Die Erlanger Fraunhofer-Institute IIS und IISB feiern ihr 20-jähriges Bestehen. Im Namen des IISB begrüße ich Sie sehr herzlich dazu und hoffe, dass Sie bei uns eine interessante und anregende Zeit verbringen können.

Ich freue mich, Ihnen in dieser Festschrift einen Einblick in die Entwicklung und den aktuellen Stand des IISB geben zu können. Neben Meilensteinen und Erinnerungen aus 20 Jahren Instituts-geschichte finden Sie Beiträge aus den Abteilungen mit Bei-spielen früherer und aktueller Arbeiten. Vorangestellt sind Grußworte aus Wissenschaft, Politik und Wirtschaft, für die ich herzlich danke.

Wie kaum ein anderes Gebiet der Ingenieurwissenschaften hat sich die Mikroelektronik in den vergangenen 20 Jahren weiter-entwickelt. Das IISB hat zusam-men mit seinen Partnern aus Wirtschaft und Wissenschaft diesen Prozess aktiv mitgestaltet. Die Aufgabengebiete des IISB – insbesondere nach der Erweite-rung um die Abteilungen Kris-tallzüchtung und Leistungselekt-ronische Systeme – zeichnen sich durch ein breites Spektrum an Themen aus, die in interdisziplinärer Zusammenarbeit bearbeitet werden: Ein hoch qualifiziertes Team aus Elektrotechnikern, Werkstoffwissenschaftlern, Physikern, Chemikern, Informatikern, Mathematikern und Technikern verschiedener Fachrich-tungen arbeitet engagiert an Aufgabenstellungen, die von den Grundlagen der Kristallzüchtung über Prozesse und Fertigungsge-räte für die Nanotechnologie bis

hin zur Systementwicklung für die Leistungselektronik reichen.

Möglich waren die Erfolge des IISB nur durch die Förderung und Unterstützung von staatlicher und kommunaler Seite, durch Auftraggeber aus Industrie und von öffentlichen Stellen und durch die Kooperation mit unse-ren Partnern. Als sehr fruchtbar hat sich insbesondere die regio-nale Zusammenarbeit mit Wirt-schaft und Wissenschaft erwie-sen. Exemplarisch seien hier nur die Kooperation mit der Universi-tät Erlangen-Nürnberg und mit den zahlreichen Unternehmen der Region aus dem Bereich der Leistungselektronik genannt. Nicht zuletzt gilt mein Dank an dieser Stelle meinen Kolleginnen und Kollegen am IISB für ihren engagierten, dauerhaften und unermüdlichen Einsatz.

Die Gesamtheit all dieser Fakto-ren hat es dem IISB in den ver-gangenen 20 Jahren erlaubt, in wirtschaftlicher wie in wissen-schaftlicher Hinsicht sehr erfolg-reich tätig zu sein. Gerne blicke ich daher gemeinsam mit Ihnen zurück auf 20 Jahre Fraunhofer in Erlangen, vor allem aber auch in die Zukunft – auf die Weiter-entwicklung in einem Gebiet mit einer außerordentlichen Vielzahl an Herausforderungen und Chancen.

Grußwort
des Präsidenten der Fraunhofer-Gesellschaft
Prof. Dr. Dr. h.c. Hans-Jörg Bullinger



Die moderne Kommunikations- und Informationstechnik hat in nahezu allen Bereichen der Gesellschaft wie Industrie, Handel, Dienstleistungen, Verkehr, Verwaltung, Arbeit, Ausbildung, Gesundheitsversorgung, Umwelt, Wissen, Kultur und Unterhaltung zu grundlegenden Veränderungen geführt. Besonders sichtbar wird das durch die stetig steigende Nutzung des Internets und den raschen Ausbau der Mobilkommunikation. Dennoch stehen wir erst am Anfang des Übergangs zur Wissensgesellschaft, deren Existenz von der Verfügbarkeit moderner Technik abhängt. Viele Möglichkeiten erschließen sich erst Schritt für Schritt und gewissermaßen in einem ständig fließenden Entwicklungszyklus. Gesellschaft und Wirtschaft sind im globalen Umfeld auf uneingeschränkte Kommunikation und Information angewiesen, der Fortschritt und ihre Leistungsfähigkeit hängen davon ab.

Die Mikroelektronik stellt in dieser digitalen Revolution eine Schlüssel- und Querschnittstechnologie dar. Bereits seit den 70er Jahren hat die Mikroelektronik als einer der großen Forschungsschwerpunkte einen festen Platz in der Fraunhofer-Gesellschaft. In den 80er Jahren setzte ein Wettlauf der Bundesländer um die Mikroelektronik ein. Dieter Seitzer, der Erlanger Ordinarius für Technische Elektronik, schlug im Unterschied zu den Planungen in anderen Bundesländern ein Konzept vor, das sich auf die Unterstützung mittelständischer Mikroelektronikhersteller konzentrierte. Im Mittelpunkt stand die Entwicklung kundenspezifischer integrierter Schaltungen für mittelständische Unternehmen der Region. Am 1. Juli 1985

wurde die neue Arbeitsgruppe für Integrierte Schaltungen AIS in Erlangen in die Fraunhofer-Gesellschaft aufgenommen. Schon bald zeigte sich, dass dieses Konzept tragfähig war und von der Wirtschaft angenommen wurde. Inzwischen sind aus dieser Keimzelle sogar zwei Mikroelektronikinstitute der Fraunhofer-Gesellschaft in Erlangen entstanden. Beide sind auf einer ganzen Reihe von Arbeitsgebieten international führend. Wissenschaftliche Kompetenz und breite Akzeptanz in der Wirtschaft verknüpfen sich in Erlangen auf einzigartige Weise. So sind die beiden Institute zu regional und international gleichermaßen gefragten Partnern für Wissenschaft und Wirtschaft avanciert.

Die zentrale Aufgabe der beiden heutigen Fraunhofer-Institute in Erlangen besteht in der Weiterentwicklung von Mikroelektronik und Mikrosystemtechnik für neue, wettbewerbsfähige Produkte für vielfältige Anwendungen. Das reicht von der Kommunikationstechnik, Verkehrstechnik und Energietechnik bis hin zur Medizintechnik. Nicht zuletzt soll durch eine elektronische Assistenz die Lebensqualität des Menschen verbessert werden.

Fraunhofer IIS und Fraunhofer IISB in Erlangen können zu Recht stolz auf ihre Entwicklung in den vergangenen 20 Jahren sein. Sie haben nicht nur die Region, sondern auch die Fraunhofer-Gesellschaft erheblich bereichert. Wir freuen uns mit ihnen über ihren Erfolg. Nun gilt es, diesen Weg fortzusetzen und mit neuen Entwicklungen „Invented in Erlangen“ einen Beitrag zur Innovationsfähigkeit Deutschland zu leisten.

Grußwort
des Bayerischen Ministerpräsidenten
Dr. Edmund Stoiber



Spitzenforschung und eine schnelle und zielgerichtete Umsetzung der Ergebnisse in die Praxis sind heute Schlüssel für den wirtschaftlichen Erfolg. Dies gilt um so mehr, als wir uns angesichts der Globalisierung in einem bisher nie erlebten Wettbewerb befinden. Ein Hochlohnland wie Deutschland kann darin nur bestehen, wenn es weltweit begehrte Spitzenprodukte anbieten kann.

Bayern hat dabei in den letzten Jahren Maßstäbe gesetzt. Innovative Ideen und deren Umsetzung in einer produktiven Fertigung haben unser Land, das nur über wenige natürliche Ressourcen verfügt, auf vielen Gebieten an die Weltspitze gebracht. Einen wichtigen Beitrag dazu leisteten auch die beiden Fraunhofer-Institute in Erlangen, die ihr 20-jähriges Bestehen feiern können. Sie haben sich den schnellen Transfer von der Wissenschaft in die Wirtschaft zur zentralen Aufgabe gemacht und dadurch vielen Unternehmen geholfen, ehrgeizige Entwicklungsziele und damit Erfolg auf den Märkten zu erreichen. Sie schufen und sicherten damit auch hoch qualifizierte Arbeitsplätze nicht nur in den Instituten selbst, sondern auch bei den Kooperationspartnern in der Wirtschaft.

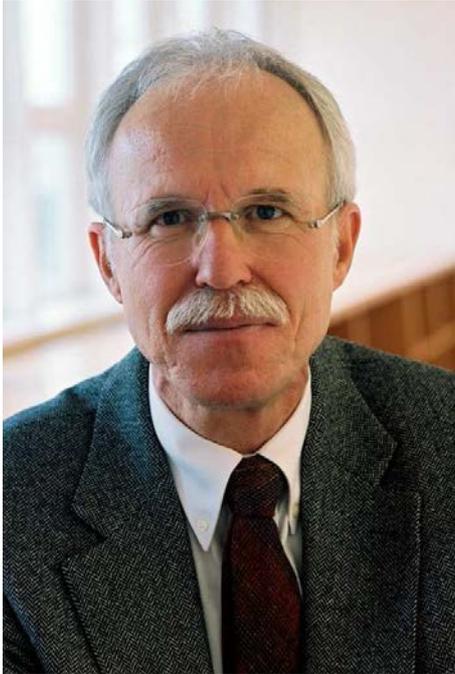
Die Bayerische Staatsregierung stand von Anfang an voll hinter den Aktivitäten der Fraunhofer-Gesellschaft. Mehr als 140 Millionen Euro an Landesmitteln sind in den letzten beiden Jahrzehnten in Projekte und Neubauten der Gesellschaft im Raum Erlangen-Nürnberg geflossen. Die Investitionen haben sich gelohnt. Heute ist der mittelfränkische

Raum ein wichtiges Zentrum der Mikroelektronik, dessen Herz in den renommierten Fraunhofer-Instituten für Integrierte Systeme und Bauelementetechnologie (IISB) und Integrierte Schaltungen (IIS) schlägt.

So haben Spitzentechnologien von Erlangen aus einen Siegeszug um die Welt angetreten. Am IIS wurde beispielsweise MP3 entwickelt, ein heute weltweit verbreitetes Komprimierungsverfahren für die Übertragung und Speicherung von Audiodaten. Mit seinen Arbeiten zur Kristallzüchtung oder zur Technologiesimulation liefert das IISB wesentliche Grundlagen für die Technik von morgen. In vielen Bereichen ist es deshalb keine Übertreibung: Wer wissen will, wie die Zukunft aussieht, muss nach Erlangen schauen – dort wird sie gestaltet!

Die beeindruckende Zwischenbilanz der Institute nach 20 Jahren gibt Mut für die weitere Arbeit. Alles Gute dazu!

Grußwort
des Staatssekretärs im Bundesministerium für Bildung und Forschung
Prof. Dr. Frieder Meyer-Krahmer



Der großartige Erfolg des Fraunhofer-Instituts für Integrierte Schaltungen IIS und des Fraunhofer-Instituts für Integrierte Systeme und Bauelementetechnologie IISB ist zugleich ein Beleg für die fruchtbare Zusammenarbeit von Wissenschaft, Wirtschaft und Politik. Schon die Gründung des Vorläufers der heutigen Institute, des Zentrums für Mikroelektronik und Informationstechnik, war wesentlich von der Überzeugung getragen, dass die Anwendungen der Mikroelektronik zum Innovationsmotor in Deutschland und Europa werden würden. Es war nahe liegend, die Bestrebungen möglichst bald in einen größeren fachlichen und organisatorischen Verbund zu überführen. Diesen fand man bei der Fraunhofer-Gesellschaft, wo der Erwerb neuer Kompetenzen durch eigene Vorlaufforschung und der Transfer der Forschungsergebnisse in die Wirtschaft Hand in Hand gehen. Die Umsetzung erfolgte dann zunächst am 1. Juli 1985 durch Schaffung von zwei Abteilungen in der Arbeitsgruppe für Integrierte Schaltungen. Aufgrund des starken Wachstums wurde später das Institut für Integrierte Schaltungen IIS gegründet und schließlich erfolgte die Überführung zu den beiden eigenständigen Instituten, wie wir sie heute kennen.

Diese bemerkenswerte Entwicklung war einerseits möglich, weil frühzeitig die Zeichen der technischen Entwicklung in der heutigen Nanoelektronik erkannt und die Umsetzung in wettbewerbsfähige Lösungen zur Aufgabe gemacht wurden. Um aus einer neuen Technik eine Innovation zu machen, bedurfte es auch der

Qualifizierung von Menschen, der Einbeziehung von Fragen der Produktion bis hin zu den Ausrüstern. Diese Verzahnung ist beiden Instituten im Bereich der Nanoelektronik und der darauf aufbauenden Systeme hervorragend gelungen. Sie haben damit zur Belebung der ganzen Region beigetragen, was besonders den kleinen und mittleren Unternehmen zugute gekommen ist. Das Bundesministerium für Bildung und Forschung hat durch die Schaffung der notwendigen Rahmenbedingungen und die Gestaltung der Forschungslandschaft seinen Beitrag zu dieser Entwicklung geleistet.

Markenzeichen und Erfolgsstory ist der Audio-Kompressionsstandard MP3. Hier wurden technische Kompetenzen und Lösungen frühzeitig genutzt, um internationale Standards zu prägen. Gleichzeitig war dies ein Markt, auf dem Deutschland bereit war, eine Vorreiterrolle zu übernehmen. Das belebte wiederum den europäischen Konsumelektronikmarkt. Heute ist MP3 praktisch mit jedem Wiedergabegerät möglich. Dieser Erfolg steht weder allein, noch ist er zufällig, sondern ist das Ergebnis eines weitsichtigen strategischen Ansatzes, an dem das Bundesministerium für Bildung und Forschung nicht unbeteiligt ist. Die Erfolge von IIS und IISB freuen mich deshalb um so mehr.

Ich wünsche den Instituten und besonders den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern, dass sie auch weiterhin so innovativ und erfolgreich sein mögen wie bisher!

Grußwort
des Rektors der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg
Prof. Dr. Karl-Dieter Gröske



Im Namen der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU) gratuliere ich dem Fraunhofer IISB herzlich zu seinem 20-jährigen Bestehen und zu 20 Jahren erfolgreicher Arbeit in Erlangen.

Im Rückblick auf diese 20 Jahre steht für mich außer Frage, dass das für Fraunhofer-Institute gerne gewählte Modell der Anknüpfung an universitäre Einrichtungen sich auch im Falle des Erlanger IISB als sehr fruchtbar erwiesen hat. Dies reicht von Aspekten der akademischen Ausbildung und der in Kooperation durchgeführten Ausbildung zum Mikrotechnologen, der gemeinsamen Nutzung von Einrichtungen über wissenschaftliche Forschungsprojekte bis hin zum Transfer der Ergebnisse angewandter Forschung in die industrielle Praxis im Rahmen von regionaler Vernetzung.

Die Breite der am IISB vertretenen wissenschaftlichen Disziplinen macht die Nähe zu und Kooperation mit den ingenieur- und naturwissenschaftlichen Instituten der FAU besonders interessant. Eine beachtliche Zahl von Promotionen, Studien- und Diplomarbeiten sowie zahlreiche wissenschaftliche Veröffentlichungen sind Beispiele für die Ergebnisse wissenschaftlicher Kooperation.

Die im Bereich der experimentellen Mikroelektronik im Vergleich zu anderen Gebieten der Elektrotechnik aufwändigen erforderlichen Laboreinrichtungen sind ein bedeutendes Feld der Kooperation zwischen der Universität und Fraunhofer in Erlangen. Der gemeinsam mit dem

IISB betriebene Reinraum der FAU wird mittlerweile auch von anderen Institutionen genutzt und gewinnt überregionale Bedeutung für die Nutzung zu Forschungs- und Ausbildungszwecken.

Über die wechselseitige Kooperation hinaus sind das IISB und die FAU voll in die regionale Vernetzung im Raum Erlangen-Nürnberg eingebunden. Hier besteht eine einzigartige Forschungslandschaft zur Mikro- und Nanoelektronik mit 4 Universitätslehrstühlen und 2 Fraunhofer-Instituten, die sich ideal ergänzen, mit dem Förderkreis Mikroelektronik, der IHK sowie der lokalen Industrie in Form von Großfirmen und KMU als Partnern für FAU und IISB.

Ich bin davon überzeugt, dass in Fortsetzung seiner bisherigen Erfolge das Fraunhofer IISB auch die zukünftigen Herausforderungen des breiten Spektrums seiner Arbeitsgebiete meistern können und freue mich bereits jetzt auf viele weitere Jahre erfolgreicher Kooperation zwischen dem Fraunhofer IISB und der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen Nürnberg.

Grußwort
des Oberbürgermeisters der Stadt Erlangen
Dr. Siegfried Balleis



Die 20-jährige Entwicklung der Fraunhofer-Institute in Erlangen ist eine beeindruckende Erfolgsgeschichte, die ihresgleichen sucht. In nur zwei Jahrzehnten hat sich eine Mikroelektronik-Einrichtung entwickelt, aus der eine der weltweit renommiertesten Hochburgen geworden ist.

Die Stadt kann sich glücklich schätzen, zwei so erfolgreiche Einrichtungen an der Schnittstelle zwischen Forschung und wirtschaftlich erfolgreicher Produktinnovation zu haben und sieht sich heute mehr denn je in ihren seinerzeit großen Anstrengungen bestätigt, das „Zentrum für Mikroelektronik und Informationstechnik (ZMI)“ – die Keimzelle der heutigen Fraunhofer-Institute – nach Kräften finanziell zu unterstützen. Ein Blick zurück: Das 1984 gegründete ZMI, eine Technologie-Transfer-Einrichtung für die Unternehmen der Region, wird ein Jahr später von der Fraunhofer-Gesellschaft als befristete Arbeitsgruppe für Integrierte Schaltungen übernommen. Sie umfasst die beiden Abteilungen AIS-A für Angewandte Elektronik und AIS-B für Bauelementetechnologie. 1990 bzw. 1993 wurden beide Abteilungen in den Rang eigenständiger Fraunhofer-Institute erhoben.

Für Erlangen bedeutet diese fulminante Entwicklung einen Glücksfall. Die beiden Institute erweitern die Palette der universitären Forschungseinrichtungen ganz wesentlich und haben sich längst als wichtiger Motor für das Forschungsnetzwerk der Region profiliert. Die Start-ups, die aus der Zusammenarbeit zwischen Institut und Universität entstehen, sind auf mittelfristige

Sicht der Humus, der für die Entstehung neuer, zukunftssicherer Arbeitsplätze notwendig ist.

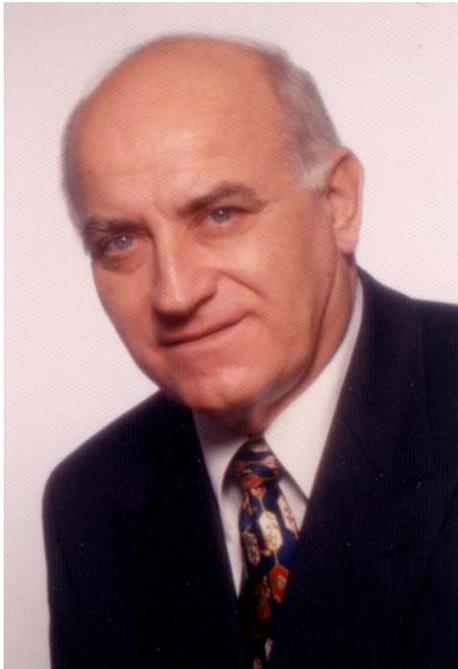
Weltweite Beachtung erlangte die zukunftsweisende Forschungsstätte nicht zuletzt durch die Erfindung von MP3, die in der gesamten Musikszene für Furore sorgte. Entsprechende Anerkennung für diese bahnbrechende Erfindung erhielten die Forscher mit der Verleihung des Deutschen Zukunftspreises 2000.

Mit Stolz können wir in Erlangen auf ein günstiges Klima für Wissenschaft und Forschung verweisen. Hochschule und Kommune haben immer etwas füreinander übrig gehabt und haben sich gegenseitig gefördert. Mein Dank gilt in diesem Zusammenhang auch dem Bund und dem Freistaat Bayern für die massive Unterstützung bei der Gründung der Erlanger Fraunhofer-Institute.

Entscheidend für den Erfolg der Institute sind allerdings vor allem das Engagement und das Können der Leitung sowie aller Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter. Mein besonderer Dank gilt an dieser Stelle den beiden Institutsleitern, Professor Heinz Gerhäuser und Professor Heiner Ryssel, sowie dem „Wegbereiter“ und ehemaligen Leiter, Professor Dieter Seitzer, deren Tatkraft, wissenschaftliches Gespür und organisatorische Kompetenz die Grundlage für die beispiellose Erfolgsgeschichte der Erlanger Fraunhofer-Institute bildeten.

Für die Zukunft wünsche ich, dass die Entwicklung des Fachgebiets so glänzend verläuft wie in den vergangenen zwei Jahrzehnten.

Grußwort
des Vizepräsidenten der IHK Nürnberg für Mittelfranken
Dipl.-Ing. Günter Baumüller



Ich freue mich, mit Ihnen „20 Jahre Fraunhofer“ in der Region Nürnberg feiern zu können. Beide Fraunhofer-Institute haben Weltruf und sind mit ihrem Renommee ein innovatives Aushängeschild für Ingenieurskunst der Metropolregion Nürnberg und – das weiß ich aus persönlicher Erfahrung – ein starker Partner der heimischen Industrie.

1983 – Die Geschichte begann

1983 haben im Rahmen der Interessengemeinschaft Hochschul- ausbau (IGH) findige Köpfe überlegt, den weißen Fleck in der Mikroelektronikforschung und -entwicklung in Nordbayern zu tilgen. Ein Arbeitskreis und eine Resolution entstanden und binnen kurzer Zeit wurden unter Führung unserer IHK von der Idee immer weitere Kreise angesteckt: Unternehmen, Politik, Verwaltung und Verbände. Neben dem notwendigen Ausbau der Universität durch zusätzliche Lehrstühle war das Ziel immer auch ein Institut, ähnlich einem Fraunhofer-Institut, das anwendungsnahe FuE-Ergebnisse liefert und eng mit der Wirtschaft zusammenarbeitet.

Im Juli 1983 erzielte die IHK- Pressemitteilung zum Ausbau der Mikroelektronikforschung an der Universität Erlangen-Nürnberg ein überwältigendes Echo in der Öffentlichkeit. Die Bayerische Staatsregierung reagierte äußerst positiv. Eine Voraussetzung für die Umsetzung war der Einsatz aller, d.h. eine von Wirtschaft *und* Staat getragene Finanzierung. Insbesondere der damalige IHK-Präsident Braun engagierte sich stark durch seine Motivation vieler Unternehmen der Region, sich durch Spenden zu betei-

gen. Kurze Zeit später konnten ein Förderkreis gegründet und insgesamt 10 Millionen DM in Geld- und Sachspenden zur Verfügung gestellt werden.

Dies ist ein hervorragendes Beispiel dafür, wie ein starker Wille, etwas wirklich durchzusetzen, zu einer schnellen Umsetzung führen kann. Gerade in der heutigen Zeit erinnern wir uns an den Mut und Erfolg der Initiatoren vor 22 Jahren.

Kooperation heute

Neben den direkten Projektkooperationen mit einer Reihe von Unternehmen gibt es ständige Kontakte mit der IHK und den Initiativen der Metropolregion Nürnberg. Unsere IHK ist auch heute noch Geschäftsstelle des Förderkreises für die Mikroelektronik und unterstützt somit die Arbeit der Fraunhofer-Institute und der Mikroelektronik-Lehrstühle der Universität. Die starke Vernetzung funktioniert außerdem in den Bereichen Leistungselektronik, Automatisierungstechnik (Initiative „Automation Valley Nordbayern“) oder im IT-Sektor über die Nürnberger Initiative für die Kommunikationswirtschaft.

Ziel ist es dabei nach wie vor, den Standortvorteil der „hellen Köpfe“ zu nutzen und innovative Projekte, Produkte und Ideen zu entwickeln. Für den Standort Deutschland ist dies die einzige Möglichkeit, sich im internationalen Wettbewerb durchzusetzen. Daran wollen und müssen wir ständig arbeiten.

1. Das Fraunhofer IISB in Erlangen



Das Fraunhofer-Institut für Integrierte Systeme und Bauelemente-technologie IISB entwickelt gemeinsam mit der Industrie neue Prozesse, Fertigungsgeräte und -verfahren der Halbleitertechnologie für die Mikro- und Nanoelektronik von der Kristallzüchtung bis zum Bauelement, stellt Simulationswerkzeuge und -dienstleistungen bereit und entwickelt leistungselektronische Bauelemente und Systeme.

Im Arbeitsgebiet **Technologie-simulation** werden leistungsfähige Simulationsprogramme zur Optimierung von Einzelprozessen und Prozessfolgen in der Halbleitertechnologie entwickelt. Halbleiterfirmen und andere Anwender werden durch Simulationen u.a. bei der Bauelemente-Entwicklung unterstützt.

Im Arbeitsgebiet **Halbleiterfertigungsgeräte und -methoden** werden Firmen bei der Entwicklung und Verbesserung neuer Fertigungsgeräte, Materialien und der zugehörigen Prozesse unterstützt (z.B. durch Integration von In-situ-Messtechniken und durch Minimierung der Kontamination).

Neue technologische Prozesse und Herstellungsmethoden für die Sub-100-nm-Technologie der Mikro- und Nanoelektronik und für moderne Leistungsbaulemente werden im Arbeitsgebiet **Technologie** entwickelt. Dies umfasst z.B. Nanostrukturen, alternative Speicherkonzepte und neue Materialien für Gate-Dielektrika.

Im **Arbeitsgebiet Kristallzüchtung** werden Firmen bei der Entwicklung und Optimierung von Anlagen und Prozessen zur Herstellung von Kristallen für die Mikroelektronik und Mikrolitho-

graphie unterstützt. Weitere Schwerpunkte sind die Entwicklung, Anwendung und Lizenzvergabe von Simulationsprogrammen zur Berechnung von Hochtemperaturanlagen und -prozessen sowie die Entwicklung und Anwendung von Messtechniken zur Bestimmung des Stoff- und Wärmetransportes bei Kristallzüchtungsprozessen.

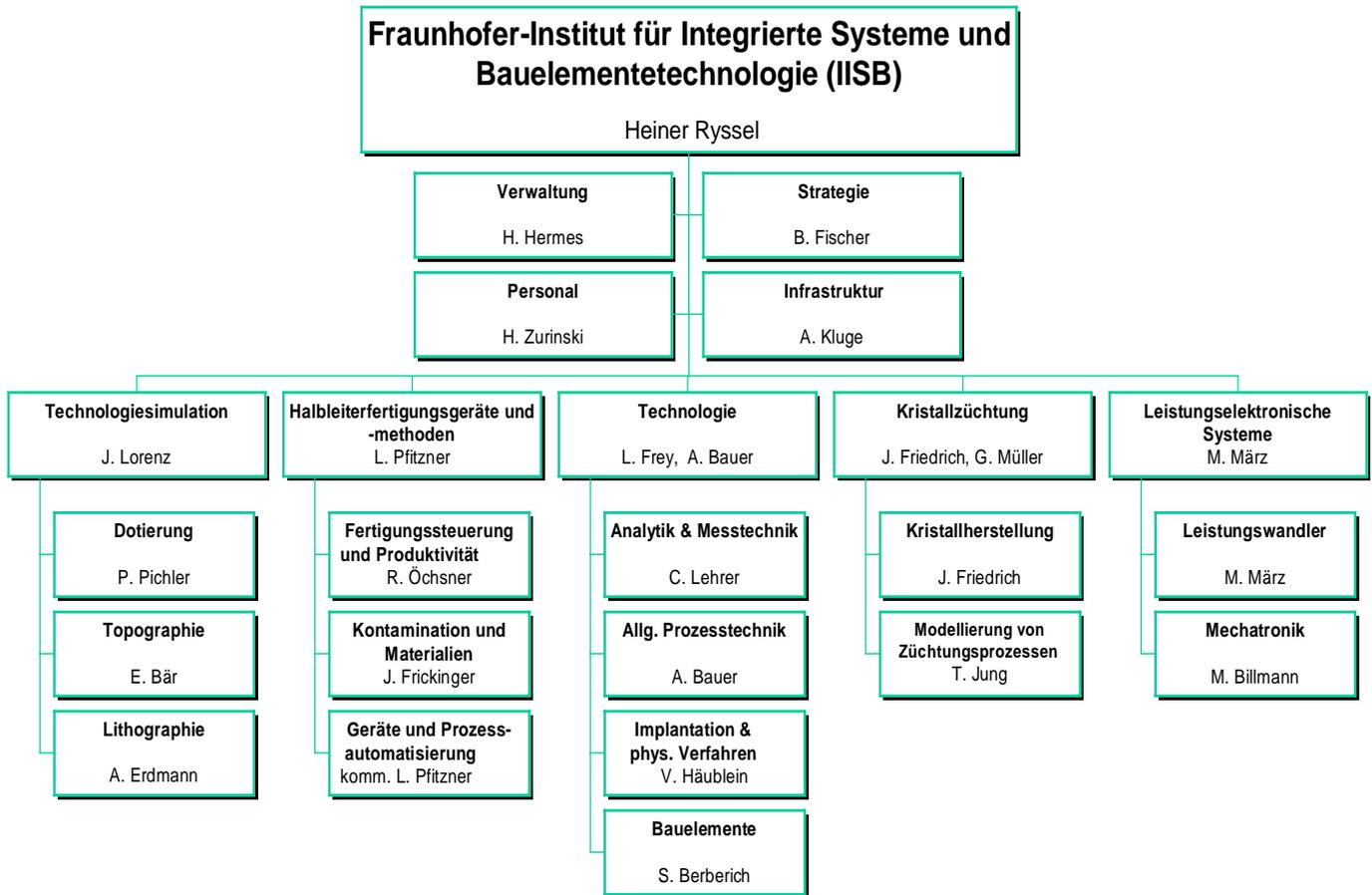
Im Arbeitsgebiet **Leistungselektronische Systeme** werden in enger Zusammenarbeit mit industriellen Auftraggebern Prototypen und Demonstratoren für leistungselektronische Systeme entwickelt.

Das IISB beschäftigt ca. 100 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter. Der Leiter des IISB, Prof. Heiner Rysel, ist gleichzeitig Inhaber des Lehrstuhls für Elektronische Bauelemente der Universität Erlangen-Nürnberg, mit dem das IISB eng zusammenarbeitet.

Besuchen Sie uns im Web, dort finden Sie weitere Informationen zu Ansprechpartnern, Downloads, Projektinformationen, Leistungsangebot etc.

www.iisb.fraunhofer.de

Das Fraunhofer IISB – Abteilungen und Gruppen



Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter

Das IISB beschäftigt ca. 100 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter (MA), davon (2004) 56 als wissenschaftliche MA, 27 als technische MA sowie 19 MA im Bereich der Verwaltung.

Betriebshaushalt

Der Betriebshaushalt des IISB (2004) beläuft sich auf ca. 8,4 Mio. Euro und setzt sich aus der Grundfinanzierung, aus Wirtschaftserträgen sowie aus Mitteln der öffentlichen Förderung (z.B. durch Bayern, den Bund oder die EU) zusammen.

Internationale Forschungsoperationen

Das IISB arbeitet eng mit zahlreichen Forschungsgruppen im Ausland zusammen, z.B. mit der Ungarischen Akademie der Wissenschaften, der Russischen

Akademie der Wissenschaften, der Universität Osaka, Japan, der Universität Temesvar, Rumänien, der Universität Trient, Italien, der Universität von Minnesota, USA. Zahlreiche Gastwissenschaftler, ausländische Studenten und Praktikanten haben sich am IISB zu Forschungs- und Lehrzwecken aufgehalten.

Promotionen, Diplom- und Studienarbeiten

Es wurden am IISB in Kooperation mit der Universität Erlangen-Nürnberg bislang 55 Promotionen und jeweils ca. 150 Diplom- und Studienarbeiten abgeschlossen.

Wissenschaftliche Veröffentlichungen

Von 1985 bis 2005 wurden von Mitarbeitern des IISB etwa 600 wissenschaftliche Veröffentlichungen erstellt.

Vorträge

Das IISB hat in zahlreichen Vorträgen seine Arbeiten im nationalen wie im internationalen Rahmen präsentiert, z.B. auf Konferenzen, Messen, Workshops etc. Auch als Veranstalter selbst ist das IISB äußerst aktiv, z.B. bei der Durchführung von Konferenzen, Workshops, Kursen etc. Näheres zu den Veranstaltungen des IISB finden Sie auf unseren WWW-Seiten („Veranstaltungen“ und „Archiv“).

Patente

Teilweise zusammen mit Industriepartnern besitzt das IISB mehr als 30 nationale und internationale Patente.

2. Meilensteine der Entwicklung des IISB

Juli 1983	Interessengemeinschaft Hochschulausbau; Vorschläge der Region durch IHK-Präsident Konsul Senator Walter Braun an Ministerpräsident Franz Josef Strauß: Ausbau der Mikroelektronik an der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU) notwendig.
November 1983	„Förderkreis für den Ausbau der Mikroelektronik an der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg e.V.“ wird gegründet (heute: Förderkreis für die Mikroelektronik e.V.).
März 1984	Der Förderkreis und die IHK Nürnberg für Mittelfranken gründen das Zentrum für Mikroelektronik und Informationstechnik (ZMI GmbH), Geschäftsführer: Prof. Dieter Seitzer. Aufnahme der Arbeit des ZMI in der Artilleriestraße.
April 1984	Bayerischer Ministerrat beschließt Ausbau der Mikroelektronik in Erlangen: Stiftungslehrstuhl „Elektronische Bauelemente“ (LEB).
August 1984	Einweihung des ZMI am 1.8.1984 mit Staatsminister Anton Jaumann.
Oktober 1984	Bauantrag für den Neubau Mikroelektronik für LEB/FAU.
1985	Gründung der GeMeTec GmbH, München, durch Mitarbeiter des heutigen IISB (Innovative Geräte zum Prozessmonitoring in der Halbleiterfertigung).
März 1985	Prof. Heiner Ryssel wird am 25.3.1985 Inhaber des Stiftungslehrstuhls für Elektronische Bauelemente (LEB). Der LEB ist vorübergehend in der Artilleriestraße mit einer Büro- und Laborfläche von 1400 m ² untergebracht.
Juli 1985	Das ZMI wird unter Hinzunahme der Arbeitsgruppe von Prof. Ryssel von der Fraunhofer-Gesellschaft zunächst auf 5 Jahre befristet in Form einer Fraunhofer-Arbeitsgruppe übernommen: „Arbeitsgruppe für Integrierte Schaltungen AIS“, bestehend aus den beiden Abteilungen Angewandte Elektronik (AIS-A), Am Wetterkreuz, und Bauelementetechnologie (AIS-B), Artilleriestraße. Die gemeinsame Leitung haben Prof. Dieter Seitzer und Prof. Heiner Ryssel. An der AIS-B erfolgt die Gründung der heutigen IISB-Abteilungen Technologiesimulation, Halbleiterfertigungsgeräte und -methoden, sowie Technologie.
Oktober 1988	Der FhG-Senat beschließt die Gründung des Fraunhofer-Instituts für Integrierte Schaltungen IIS aus der AIS-A; die AIS-B wird fortgeführt.
Februar 1989	Genehmigung der Hauhaltsunterlage für den Bau des LEB-Reinraumlabor durch den Bayerischen Landtag.
Oktober 1989	Der FhG-Senat beschließt die Erweiterung des IIS ab 1993 durch die Arbeitsgruppe Bauelementetechnologie (AIS-B) als Institutsbereich IIS-B.
Juni 1990	Grundsteinlegung für das LEB-Reinraumlabor und das LEB-Institutsgebäude am 27.6.1990 mit Staatsminister Hans Zehetmeier.
Juli 1990	Umwandlung der AIS-A in das Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltungen (IIS).
Februar 1991	Richtfest LEB-Reinraumlabor am 7.2.1991.
Juni 1991	Richtfest LEB-Institutsgebäude am 27.6.1991.
Mai 1992	Einweihung des LEB-Reinraumlabor am 15.5.1992.
November 1992	Grundsteinlegung des neuen Institutsgebäudes für das IIS-B durch Staatsminister August Lang am 13.11.1992.
Juni 1993	Richtfest Institutsgebäude IIS-B am 21.6.1993.
Juni 1993	Am 21.6.1993 stirbt Konsul Hans Georg Waeber, Förderer der Mikroelektronik in Erlangen. Sein Nachfolger als Vorsitzender des Förderkreises wird Dr. Dietrich Ernst.

Juli 1993	<p>Das Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltungen IIS wird um den Bereich Bauelementetechnologie unter der Leitung von Prof. Heiner Ryszel erweitert.</p> <p>Damit ergeben sich neue Bezeichnungen:</p> <p>Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltungen IIS-A, Bereich Angewandte Elektronik (Prof. Dieter Seitzer, Dr. Heinz Gerhäuser);</p> <p>Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltungen, Bereich Bauelementetechnologie IIS-B (Prof. Heiner Ryszel).</p>
September 1994	Einweihung des neuen Institutsgebäudes des IIS-B in der Schottkystraße durch Staatsminister Otto Wiesheu am 22.9.1994.
Oktober 1995	10-Jahresfeier von IIS-A und IIS-B, 10. bis 13.10.1995.
Mai 1996	Besuch der Arbeitsgruppe für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie der CDU/CSU-Bundestagsfraktion am IIS-B, 30.5.1996.
November 1998	Verleihung der Wilhelm-Exner-Medaille an Prof. Heiner Ryszel, Wien, 24.11.1998.
Herbst 1999	Gründung der IISB-Abteilung Kristallzüchtung.
1999	Zusage der Einrichtung eines Kompetenzzentrums Mechatronik am IIS-B im Rahmen der High-Tech-Offensive der Bayerischen Staatsregierung.
1999	Ausgründung der Isiltec GmbH (Wafer-Reclaim), Erlangen, durch Mitarbeiter des Fraunhofer IIS-B und des Fraunhofer IPA.
Januar 1999	Prof. Heiner Ryszel wird zum Fellow des IEEE ernannt.
April 2000	Gründung der IISB-Abteilung Leistungselektronische Systeme.
Herbst 2002	Inbetriebnahme der Pilotlinie zum Wafer-Reclaim am IIS-B.
Oktober 2002	FhG-Senatsbeschluss vom 22.10.2003 zur Eigenständigkeit von IIS-A und IIS-B als IIS und IISB ab 1.1.2003.
Januar 2003	<p>1.1.2003: Aus den beiden Institutsbereichen IIS-A und IIS-B entstehen zwei nun auch formal eigenständige Institute:</p> <p>Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltungen IIS, Leitung Prof. Heinz Gerhäuser, Erlangen-Tennenlohe</p> <p>Fraunhofer-Institut für Integrierte Systeme und Bauelementetechnologie IISB, Leitung Prof. Heiner Ryszel, Erlangen.</p>
März 2003	Die NanoWorld Services GmbH (Weltmarktführer Nanosonden, Standort Mutterkonzern in Neuchâtel, Schweiz), seit Juli 2002 mit ihrer FuE-Abteilung am IISB, verlegt ihre deutschen Aktivitäten komplett ans IISB.
März 2004	Festveranstaltung zu 20 Jahren Förderkreis für die Mikroelektronik e.V., 12.3.2004.
September 2004	Neue IISB-Außenstelle „Zentrum für Kfz-Leistungselektronik und Mechatronik“ (ZKLM) in Nürnberg nimmt ihren Betrieb auf.
Februar 2005	Gründung „Technologiezentrum Halbleitermaterialien“ (THM) in Freiberg (Sachsen) als gemeinsame Einrichtung von Fraunhofer IISB, Erlangen, und Fraunhofer ISE, Freiburg, 2.2.2005.
Juni 2005	Offizielle Eröffnungsfeier der IISB-Außenstelle „Zentrum für Kfz-Leistungselektronik und Mechatronik“ (ZKLM), 10.6.2005, Nürnberg.
Juni/Juli 2005	Feierlichkeiten anlässlich des 20-jährigen Bestehens von Fraunhofer IIS und Fraunhofer IISB in Erlangen, 30.6.-2.7.2005.

Fraunhofer in Erlangen – Aufbruch und Wachstum

Aufbruch

Die Geschichte der Erlanger Fraunhofer-Institute ist gleichzeitig die Geschichte fruchtbarer Zusammenarbeit von Wissenschaft, Wirtschaft und Politik. Auf Initiative der Industrie- und Handelskammer Nürnberg und der Universität Erlangen-Nürnberg, und mit der Unterstützung der Städte Nürnberg, Fürth und Erlangen sowie mit umfangreichen Spendengeldern der regionalen Industrie und der Förderung durch den Freistaat Bayern wurde in Erlangen ein Mikroelektronikschwerpunkt geschaffen.

Die Anstöße für eine mehr als 20-jährige Kooperation gaben der damalige IHK-Präsident Walter Braun und Prof. Nikolaus Fiebiger, Präsident der Universität Erlangen-Nürnberg. Dies führte 1983 zur Gründung des „Förderkreis für den Ausbau der Mikroelektronik an der Universität Erlangen-Nürnberg“, der insbesondere auch den kleinen und mittleren Unternehmen zugute kommt.

Die Motivation für Wirtschaft und Wissenschaft kam aus dem Nachholbedarf, den Europa und die Bundesrepublik bei den Anwendungen der Mikroelektronik hatte. Auch die Politik hat zu Anfang der 80er Jahre die japanische und amerikanische Herausforderung rechtzeitig erkannt und die Initiative, Erlangen zu einem Zentrum der Mikroelektronik-Forschung zu machen, als geeigneten Schritt zur Erwidern unterstützt.

1984 erfolgte die Gründung des Zentrums für Mikroelektronik und Informationstechnik, eine GmbH, dessen Geschäftsführer Prof. Dieter Seitzer war, zugleich Inhaber des Lehrstuhls für Technische Elektronik an der Universität Erlangen-Nürnberg. Das Bestreben, die ZMI GmbH in einen größeren fachlichen Verbund einzubeziehen, führte zu Kontakten mit der Fraunhofer-Gesellschaft. Das Fraunhofer-Modell für angewandte Forschung sieht den gleichzeitigen Transfer von Know-how in die

Wirtschaft und den Erwerb neuer Kompetenzen durch eigene Vorlaufforschung vor.

Am 1. Juli 1985 übernahm die Fraunhofer-Gesellschaft die ZMI GmbH als Abteilung „Angewandte Elektronik“ mit 22 Mitarbeitern in die Arbeitsgruppe für Integrierte Schaltungen AIS. Die Leitung hatte Prof. Dieter Seitzer, unterstützt wurde er von seinem Stellvertreter Dr. Heinz Gerhäuser. Eine zweite Abteilung „Bauelementetechnologie“ mit 15 Mitarbeitern unter der Leitung von Prof. Heiner Ryssel wurde gleichzeitig gegründet.

Wachstum

Die Abteilung Angewandte Elektronik verzeichnete ein starkes Wachstum, dem die Fraunhofer-Gesellschaft mit der Gründung eines eigenständigen Instituts für Integrierte Schaltungen IIS am 2. Juli 1990 Rechnung trägt. 1993 wurde auch die Abteilung Bauelementetechnologie als weiterer selbständiger Bereich in das Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltungen IIS aufgenommen.

Nach stetigem Wachstum werden am 1. Januar 2003 aus den beiden Institutsbereichen IIS-A und IIS-B zwei eigenständige Institute: das Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltungen IIS unter Leitung von Prof. Heinz Gerhäuser und das Fraunhofer-Institut für Integrierte Systeme und Bauelementetechnologie IISB unter der Leitung von Prof. Heiner Ryssel.



Prof. Heiner Ryssel und Prof. Heinz Gerhäuser, die Institutsleiter des IISB bzw. IIS, nach der Trennung der Institute im Jahr 2003

3. Erinnerungen an 20 Jahre IISB in Erlangen



Der bayerische Staatsminister für Unterricht und Kultus, Prof. Hans Maier, unterzeichnet am 6. April 1984 den Vertrag für den ersten Stiftungslehrstuhl (den LEB) in Bayern. Von links: Prof. Seitzer, Förderkreisvorsitzender Waeber, Kultusminister Maier, IHK-Präs. Braun, FAU-Präsident Prof. Fiebiger, Dr. Vorndran, Regierungspräsident v. Mosch



Die Baustelle in der Artilleriestraße im Jahr 1985



Einzug in der Artilleriestraße im Sommer 1985



Führung durch die Reinräume in der Artilleriestraße anlässlich der Einweihung der AIS-B durch den Bayerischen Staatsminister für Unterricht und Kultus Prof. Maier



Grundsteinlegung für die Technologiehalle am 27. Juni 1990

Staatsminister Zehetmaier



Staatsminister August Lang (links) und Prof. Ryssel bei der Grundsteinlegung für den IIS-B-Neubau am 13. November 1992



1993 entsteht der Neubau für das IIS-B.





Richtfest für den Neubau des IIS-B am 21. Juni 1993

Oben links: der Dekan der Technischen Fakultät Prof. Mughrabi bei seiner Ansprache

Links: Fraunhofer-Vorstand Dr. Wiese im Gespräch mit Prof. Ryssel



Instituts- und Abteilungsleiter des IIS-B 1993. Von links: Lorenz (Technologiesimulation), Pfitzner (Halbleiterfertigungsgeräte), Institutsleiter Ryssel, Burte (Technologie)



Einweihung des IIS-B-Neubaus durch Staatsminister Dr. Otto Wiesheu (Bildmitte) am 22. September 1994



10-Jahrfeier des IIS-A und IIS-B vom 10. bis 13. Oktober 1995. Von links: Prof. Seitzer, Prof. Ryssel, Staatsminister Dr. Wiesheu, Fraunhofer-Vorstand Dr. Wiese, Dr. Gerhäuser, Dr. Lendrott



Besuch der Arbeitsgruppe für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie der CDU/CSU-Bundestagsfraktion am IIS-B, 30. Mai 1996



Verleihung der Wilhelm-Exner-Medaille an Prof. Heiner Ryszel, Wien, 24. November 1998



Die Chairmen der „13th International Conference on Ion Implantation Technology“ (IIT 2000) in Alpbach, Tirol: Jozsef Gyulai, Hans Glawischnig, Heiner Ryszel (von links)



Verleihung des Waerber-Innovationspreises durch Dr. D. Ernst
 Linkes Bild, von links: Dr. C. Kalus (SiGMA-C GmbH), Dr. D. Ernst, Dr. A. Erdmann (IIS-B), 21. März 2002
 Rechtes Bild, von links: Dr. M. Kurz, Dr. M. Metzger, F. Jurma-Rotariu, M. Hainke, Dr. T. Jung, A. Pusztai (Mitarbeiter/ehemalige Mitarbeiter der Abteilung Kristallzüchtung des IISB bzw. des Erlanger Kristall-Labors), Dr. D. Ernst, 11. Juli 2003

Verleihung des Wissenschaftspreises des „Stifterverbandes für die Deutsche Wissenschaft“ an Mitarbeiter des Fraunhofer IISB und der Firma Schott Lithotec im Rahmen des „Fests der Forschung“ der Fraunhofer-Gesellschaft am 22. Oktober 2003 in Duisburg. Die IISB-Mitarbeiter (von links): Prof. G. Müller, Dr. J. Friedrich, A. Molchanov, O. Gräbner, G. Ardelean



Lange Nacht der Wissenschaften am IISB, 25. Oktober 2003. Prof. Georg Müller (links), Abteilungsleiter für Kristallzüchtung, erklärt Besuchern die Züchtung von Siliciumkristallen.



Das IISB stellt aus auf der SEMICON Europa 2004 in München, 20.-22. April 2004: Die Angebote und Ausstellungsstücke des IISB und seiner Kooperationspartner NanoWorld Services und Isittec stießen auf lebhaftes Interesse.



Gebäude in der Landgrabenstraße in Nürnberg, in dem die Außenstelle des IISB, das „Zentrum für Kraftfahrzeug-Leistungselektronik und Mechatronik“, im September 2004 ihre Arbeit aufgenommen hat



Prof. Heiner Ryszel (IISB), die sächsische Staatsministerin für Wissenschaft und Kunst, Barbara Ludwig, und Prof. Joachim Luther (ISE) bei der feierlichen Gründung des Technologiezentrums Halbleitermaterialien Freiberg am 2. Februar 2005 in Freiberg



Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter des IISB vor dem Haupteingang des Institutsgebäudes in der Schottkystraße in Erlangen, 3. Juni 2005

4. Die Abteilungen des IISB

Abteilung Technologiesimulation

Prozess-Simulation in immer höheren Dimensionen für immer kleinere Abmessungen

Dr. Jürgen Lorenz

Die Prozess-Simulation stellt gewissermaßen eine virtuelle Halbleitertechnologie dar: Die Herstellungsprozesse eines Halbleiterbauelementes, seiner elektrischen Verbindungen oder anderer Teile einer integrierten Schaltung werden mittels physikalischer Modelle und numerischer Algorithmen auf einem Rechner nachgebildet. Das so per Simulation virtuell im Rechner erzeugte Bauelement kann anschließend mittels eines Bauelementesimulationsprogramms, welches das elektrische Verhalten berechnet, gewissermaßen ausgemessen werden. Man erfährt so, ob der betrachtete Prozessfluss zu den gewünschten Bauelementeigenschaften führt. Um hier letztlich zutreffende Aussagen machen zu können, sind jedoch zunehmend komplexere physikalische Modelle und Algorithmen für jeden Schritt der Simulation erforderlich.

Die Entwicklung der Prozess-Simulation seit Gründung des Instituts spiegelt in vielfacher Weise diejenige der Mikro- und Nanoelektronik wider: Einerseits erforderten rasant steigende Anforderungen grundlegende Verbesserungen an den Simulationsprogrammen und den in ihnen verwendeten Modellen. Andererseits ermöglichte erst der rasante Anstieg von verfügbarer Rechenleistung und Speicherplatz überhaupt die Entwicklung und breite Anwendung solcher

mittlerweile sehr komplexen Programme.

Die Geschichte der Prozess-Simulation in der Fraunhofer-Gesellschaft reicht über die Gründung des IISB hinaus zurück und ist doch untrennbar mit dem Institut verbunden: Für seine Arbeiten zur Ionenimplantation am damaligen Fraunhofer IFT in München benötigte der spätere Institutsleiter des IISB, Dr. Heiner Ryssel, ein Verfahren, mit dem er implantierte Dotierungsprofile bestimmen konnte. Damals verfügbare Methoden konnten lediglich die elektrisch aktive Dotierung bestimmen. Damit mussten die implantierten Dotierungsprofile vor der Messung thermisch ausgeheilt werden, und die gemessenen Profile hingen von der Art dieser Ausheilung ab. Um dies zu verstehen, entwickelten Ryssel und Mitarbeiter das erste Prozess-Simulationsprogramm in Europa, fast zeitgleich mit der Konkurrenz an der Stanford University in den USA. So entstand bereits 1978 der eindimensionale Prozess-Simulator ICECREM, mit dem Ionenimplantation, Diffusion und Oxidation simuliert werden konnten. ICECREM stand damals für „Ingenieurmäßiger Casten zur Eingabe in den Computer von Ryssels Einfällen aus München“, und wird in weiter-

entwickelter Form heute noch zu Ausbildungszwecken verwendet. Die Prozess-Simulation entstand in der Fraunhofer Gesellschaft also als Nebenprodukt eines Technologieprojekts – wie sich mittlerweile gezeigt hat aber ein sehr zukunftsweisendes und wertvolles Nebenprodukt!

Damals waren eine Reihe von Schwierigkeiten zu lösen, die angesichts des Leistungszuwachses von Computern in den letzten 20 Jahren heute kaum vorstellbar sind: Anfangs gab es noch keinen hinreichend leistungsfähigen Institutsrechner, und ICECREM wurde deshalb zunächst auf dem damaligen „Großrechner“ des Leibniz-Rechenzentrums (LRZ) in München entwickelt – mit drastischen Konsequenzen: Der Rechner verfügte über keine virtuelle Speicherplatzadressierung, so dass das gesamte Programm in den physikalischen Hauptspeicher von damals 640 KByte passen musste. Notgedrungenerweise musste deshalb selbst für diesen damals nur eindimensional rechnenden Simulator um jedes einzelne Bit gekämpft werden, was zu einem aus heutiger Sicht recht abenteuerlichen Programmierstil zwang. Der Verfasser dieses Artikels, der damals in der numerischen Mathematik seine Diplomarbeit zur Flugbahnopti-



Bild 1: Magnetplatte aus dem ersten Institutsrechner des IISB (1985): System Industries 9751, Kapazität 474 MByte unformatiert, Abmessungen ca. 26 cm · 44 cm · 48 cm

mierung erstellte, bewahrt als Andenken an den „Großrechner“ des LRZ zuhause ein Programm seiner Diplomarbeit in Form des damals üblichen Lochkartenstapels auf – eine Karte pro Programmzeile. Für unseren aktuellen dreidimensionalen Lithographiesimulator mit gut 300 000 Zeilen wäre ein solcher Stapel flach aufeinander gelegter Lochkarten mit mehr als 100 m Höhe das höchste Bauwerk Erlangens.

Mit Gründung des IISB waren die Bedingungen für die Entwicklung wissenschaftlicher Software schon deutlich besser: Wir verfügten über die damals weit verbreitete VAX11/750 von Digital Equipment, die immerhin schon über virtuellen Speicher und Terminals als Bildschirmarbeitsplätze verfügte. Allerdings lag der Listenpreis für die damals maximal möglichen 8 MByte Hauptspeicher bei etwa 125 000 DM, und eine Magnetplatte von 400 MByte war nicht nur so groß wie heute ein PC (Bild 1) sondern kostete auch etwa 100 000 DM – beides mittlerweile unvorstellbar angesichts der heutigen Memorysticks von bis zu einigen GByte Kapazität für etwa 100 Euro. Dies zeigt nicht nur drastisch die Entwicklung der Mikroelektronik in den letzten zwei Dekaden entsprechend dem Moore'schen Gesetz sondern auch, dass die Simulation damals sehr viel geringere Möglichkeiten hatte als heute.

Die Prozess-Simulation konnte und musste damals mit relativ einfachen Modellen auskommen: Zum Beispiel wurden für die Simulation der Diffusion von Dotierungsatomen Differentialgleichungen verwendet, die auf den Fick'schen Gleichungen beruhen und mittels analytischer Ausdrücke Abhängigkeiten der Diffusionskoeffizienten vom elektrischen Feld und von der Dichte von Gitterleerstellen und Zwi-

schengitteratomen annähernten. Während sich die damals verwendeten Bauelemente von mehr als einem Mikrometer Kanallänge hiermit gut beschreiben ließen, ist für die heutigen Bauelemente mit Gatelängen von weniger als 100 Nanometern mit ihren sehr flachen pn-Übergängen die Lösung von großen Systemen gekoppelter Diffusions-Reaktionsgleichungen für Dotierungen, Punktdefekte sowie ihre verschiedenen Agglomerate nötig. Bei der damaligen eindimensionalen Prozess-Simulation lieferten äquidistante Gitter mit maximal 400 Punkten eine hinreichend genaue Lösung – entsprechend müssten bei der heutigen dreidimensionalen Simulation etwa 100 Millionen Diskretisierungspunkte verwendet werden. Da dies nicht möglich ist, wurde und wird seitdem viel Arbeit in die Entwicklung und Implementierung effizienter Verfahren u.a. zur Gittergeneration und –adaptation gesteckt.

Das erste Programm des IFT zur zweidimensionalen Prozess-Simulation wurde 1980 erstmals in einer Veröffentlichung in IEEE TCAD vorgestellt. Als der Verfasser dieses Artikels sich 1983 der Gruppe anschloss, wurde gerade mit der Entwicklung eines ersten zweidimensionalen Prozess-Simulationsprogramms begonnen, das vollständige Prozessabläufe simulieren konnte: COMPOSITE – Complete Modeling Program of Silicon Technology. Nach Gründung des IISB (damals AIS) wurden die Arbeiten in Erlangen verstärkt weitergeführt, und führten Ende 1985 zu einer ersten viel beachteten Veröffentlichung in IEEE TCAD. Die Simulation vollständiger Prozessabläufe erforderte weit höhere Rechenleistungen und brachte für das Institut die nächste Rechnergeneration mit sich: einen innovativen Parallel-Vektorrechner der Firma ALLIANT, der damals zum gleichen Preis wie die übli-

che VAX ein Vielfaches an Rechenleistung brachte. Zu diesem Zeitpunkt versuchte die Halbleiterindustrie noch mit eindimensionalen Simulatoren auszukommen oder eigene hausinterne zweidimensionale Simulatoren für wenige Prozess-Schritte zu entwickeln. Der Ansatz von COMPOSITE, einerseits die Dotierungsschritte Implantation, Diffusion und Oxidation und andererseits die Topographieschritte Lithographie, Abscheidung und Ätzen in einem Simulator zu vereinigen und damit die Simulation durchgängiger Prozessabläufe zu ermöglichen, war damals singulär und ist heute noch ein zentraler Wettbewerbsvorteil für das IISB: Moderne Bauelemente sind immer mehr durch nicht ideale Prozesse und damit auch nicht idealisierte Geometrien bestimmt.

Während die bisherigen Arbeiten zur Prozess-Simulation weitgehend mit Förderung durch das BMBF und in kleinerem Ausmaß durch die Industrie durchgeführt wurden, erfolgte Ende der 80er Jahre eine Erweiterung, die seitdem für die Arbeiten der Abteilung von entscheidender Bedeutung ist: Das IISB schloss sich einem Konsortium an, das die europäische Kompetenz auf dem Gebiet der Prozess- und Bauelementesimulation bündeln und einen umfassenden europäischen Prozess- und Bauelementesimulator entwickeln sollte. Nach zweijähriger Vorbereitung konnte 1989 das entsprechende Projekt „STORM – Process Modeling and Device Optimization for Submicron Technologies“ unter Koordination durch das damalige CNET (Meylan bei Grenoble) begonnen werden. Dies war für das IISB und insbesondere seine Abteilung Technologiesimulation der Beginn umfassender europäischer Kooperationen, auf die weiter unten noch eingegangen wird. Unter anderem war es das erste gemeinsame Projekt mit

STMicroelectronics und IMEC. Bei STORM handelte es sich mit einer Förderung von gut 5 Mio. ECU für 9 Partner über 4 Jahre um ein für heutige Verhältnisse auf dem Gebiet der Simulation relativ großes Projekt. Das Endergebnis von STORM war ein sehr leistungsfähiger zweidimensionaler Simulator, in den unter anderem Weiterentwicklungen verschiedener Module aus COMPOSITE eingingen. Leider konnte das Gesamtsystem nicht kommerzialisiert werden, da einer der Projektpartner seine zentralen Beiträge exklusiv an ein Softwarehaus lizenzierte, das letztlich die Kommerzialisierung blockierte. Außerdem wurde innerhalb von STORM die erste Version eines dreidimensionalen Lithographiesimulators, damals durch das Fraunhofer ISIT, entwickelt, auf den weiter unten noch eingegangen wird.

Diese Erweiterung der Aktivitäten der Technologiesimulation auf die europäische Ebene erfolgte kurz vor der deutschen Wiedervereinigung, welche einschneidende Konsequenzen für die bisherige Förderung durch das BMBF hatte, da dessen Mittel weitgehend für Aktivitäten in den neuen Bundesländern benötigt wurden. Auch im Bereich „Basic and Long Term Technologies“ (BLR) des JESSI Programms, an dem das Institut stark beteiligt war, wurde die Förderung stark auf die europäische Ebene verla-

gert. Zwei zu dieser Zeit akquirierte europäische Verbundprojekte haben sich als prägend und repräsentativ für die weitere Entwicklung erwiesen: Zum einen das Projekt ADEQUAT („Advanced Developments for 0.25 Micron CMOS Technologies“), zum anderen PROMPT („Process Optimization in Multiple Dimensions for Semiconductor Technology“). Das vom IMEC koordinierte ADEQUAT war zusammen mit seinen Nachfolgeprojekten das bei weitem wichtigste Projekt zur CMOS-Technologie innerhalb von JESSI BLR. Ziel war die Entwicklung von Prozessschritten und -modulen für 0,35- μm - und 0,25- μm -CMOS-Logik-Technologien. Neben Aktivitäten der Abteilung Technologie trug hier die Technologiesimulation mit Arbeiten zur Entwicklung physikalischer Prozessmodelle sowie zu ihrer Anwendung für die Unterstützung der Technologieentwicklung zum Erfolg des Projekts bei. ADEQUAT und seine Nachfolgeprojekte haben entscheidend dazu beigetragen, dass Europa den in der Mitte der 80er Jahre vorhandenen technologischen Rückstand gegenüber Japan und den USA aufgeholt hat. Aufgrund seiner fachlichen Ergebnisse ist die Abteilung seither in den meisten der zentralen europäischen Verbundprojekte zur Entwicklung von CMOS-Technologien vertreten, in dem es die Entwicklung von Technologien

und Bauelementen durch die Anwendung der Simulation unterstützt. Aktuell gilt dies für die beiden zur Zeit einzigen integrierten Projekte im Bereich Nanoelektronik: NANOCMOS zur Entwicklung von Prozessmodulen und Bauelementearchitekturen für den 45-nm-Technologieknoten, sowie MoreMoore zur Entwicklung der EUV-Lithographie.

Mit dem von Februar 1994 bis Juni 1996 bearbeiteten Projekt PROMPT initiierte das IISB die europäischen Arbeiten auf dem Gebiet der dreidimensionalen Prozess-Simulation. PROMPT war das erste einer langen Reihe von Simulationsprojekten, die seither vom IISB koordiniert wurden. Das Konsortium bestand aus den Partnern Fraunhofer IISB und ISIT, ETH Zürich, GPS, GRESSI (Zusammenschluss von CNET und LETI), ISE AG, ISEN, SGS Thomson, SIGMA-C sowie TU Wien. Die enorme Bedeutung der dreidimensionalen Prozess-Simulation wurde bereits 1995 eindrucksvoll dadurch untermauert, dass an einem vom IISB in Verbindung mit der führenden Simulationskonferenz SISPAD 95 organisierten Workshop zur dreidimensionalen Prozess-Simulation mehr als hundert Wissenschaftler aus allen wichtigen Ländern teilnahmen. PROMPT und seine Nachfolgeprojekte führten dazu, dass es qualifizierten Forschern am IISB und einigen anderen Einrichtungen nunmehr möglich ist, aktuelle Bauelemente, wie sie in NANOCMOS entwickelt werden, dreidimensional zu simulieren. Dies ist umso wichtiger, als das elektrische Verhalten derartiger Bauelemente von dreidimensionalen Effekten zunehmend so stark beeinflusst wird, dass eine sinnvolle Simulation nur noch dreidimensional möglich ist. Selbst schon im einfachen Fall des in Bild 2 gezeigten konventionellen CMOS Transistors mit so

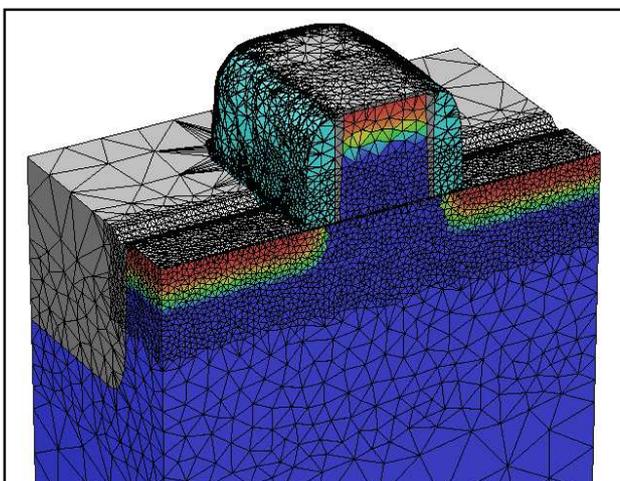


Bild 2: 3D-Geometrie und Dotierungsverteilung eines STI-Transistors (in Kanalrichtung aufgeschnitten)

genannter „Shallow Trench Isolation“ führen die an der Kante des mit Oxid gefüllten Grabens (grau) fast unvermeidlichen so genannten „Microtrenches“ sowohl durch eine veränderte Streuung implantierter Ionen als auch durch Oberflächeneinflüsse auf die Ladungsträger zu einer erheblichen Verschiebung der Kennlinie. Noch viel stärker sind die dreidimensionalen Effekte bei aktuellen Bauelementen wie dem FinFET, bei denen Source und

Drain durch einen schmalen Siliciumsteg auf einem vergrabenen Oxid verbunden sind: Hier fließt wie in Bild 3 gezeigt bei einer Kanallänge von 50 nm im Falle eines undotierten Kanals der Strom direkt unter der Gatelektrode, die den Kanal von drei Seiten aus steuert. Demgegenüber fließt der Leckstrom in der Mitte des Fins.

Die Skalierung mikro- und nanoelektronischer Bauelemente

hin zu immer kleineren Strukturen erfordert eine immer bessere Kontrolle der verwendeten Prozesse sowie ein drastisch verbessertes Verständnis der zugrundeliegenden Physik, z.B. um die benötigten sehr flachen pn-Übergänge bei gleichzeitig sehr hoher Aktivierung zu erreichen. Die Prozess-Simulation ist hier insbesondere mit der Entwicklung prädiktiver physikalischer Modelle für Diffusion und Aktivierung gefordert, um unter anderem besondere transiente Effekte nach Implantationsschritten minimieren zu können. Dies ist ein weiteres Arbeitsgebiet, auf dem das IISB herausragende Ergebnisse erzielt hat: Die vom IISB koordinierten europäischen Projekte RAPID und FRENDETECH haben zu einer drastisch verbesserten Simulation von Diffusion und Aktivierung geführt. Dies kommt unter anderem in der über 500 Seiten starken, im Springer Verlag erschienenen Habilitationsschrift des verantwortlichen Gruppenleiters Dr. Peter Pichler sowie in seinem eingeladenen Vortrag auf der IEDM 2004 zum Ausdruck. Bild 4 zeigt als Beispiel die Simulation der Übersättigung mit Eigenzwischengitteratomen nach Ionenimplantation und Ausheilsschritten bei verschiedenen Temperaturen: Nachdem die benötigten Modellparameter aus Experimenten bei 600 und 800 °C bestimmt worden sind, ergeben die Simulationen auch für andere Ausheiltemperaturen (hier 700 und 740 °C) eine sehr gute Übereinstimmung mit dem Experiment.

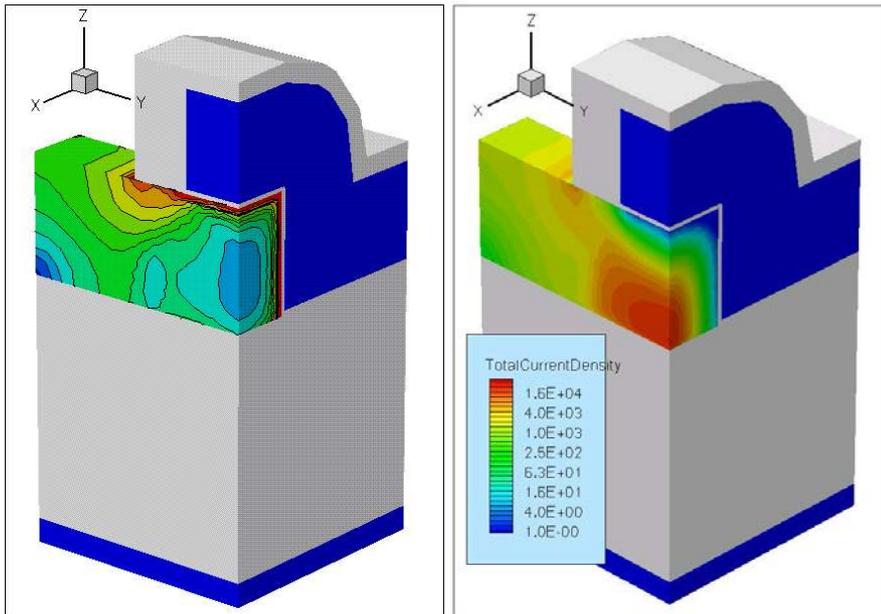


Bild 3: Stromverteilung in einem NMOS-FinFET-Transistor mit 50 nm SOI-Dicke und 50 nm Kanallänge. Links eingeschalteter, rechts ausgeschalteter Transistor. Gezeigt ist ein Viertel des Transistors.

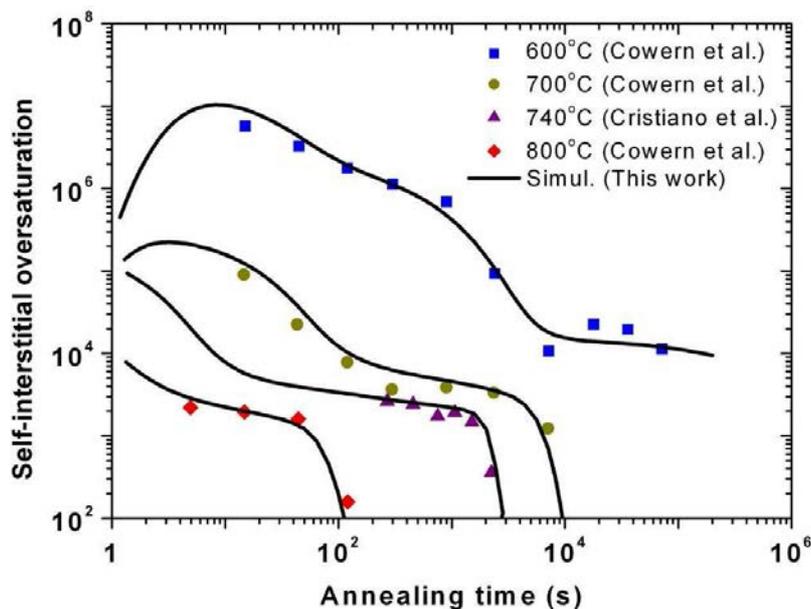


Bild 4: Kalibrierung von Parametern für die Nukleation von Interstitialkomplexen mittels Genetischem Algorithmus bei 600 °C und 800 °C, anschließend gute Vorhersage der Interstitial-Übersättigung auch bei 700 °C und 740 °C

Seit ihrer Gründung ist die Abteilung bestrebt, den industriellen Nutzen der Simulation zu maximieren. Hierzu dienen neben den eigenen Arbeiten, für die oben einige Beispiele gegeben sind, auch zahlreiche Kooperationen mit Halbleiterfirmen und Forschungseinrichtungen, die von der Abteilung aktiv be-

trieben werden. Unter anderem initiierte und koordinierte die Abteilung erfolgreich drei europäische Nutzergruppen, in denen industrielle Spezifikationen für die Prozess- und Bauelementesimulation erarbeitet wurden. Die Beteiligung der Abteilung an bisher insgesamt 22 europäischen Verbundprojekten, von denen sie bisher neben den drei Nutzergruppen sechs Forschungsprojekte und ein Netzwerk koordiniert hat, unterstreicht die zentrale Rolle des IISB auf dem Gebiet der Halbleitertechnologiesimulation in Europa. Diesbezüglich von besonderer Bedeutung ist auch die Mitarbeit der Abteilung in der International Technology Roadmap for Semiconductors ITRS: Der Abteilungsleiter J. Lorenz koordiniert mit „Modeling und Simulation“ seit 2002 als erster Nicht-Amerikaner eines der Kapitel der ITRS.

Seit die Aktivitäten der Fraunhofer-Gesellschaft zur Lithographiesimulation vom ISIT an das IISB verlagert wurden, hat dieses Gebiet weiter an Bedeutung gewonnen und breiteste industrielle Anwendung gefunden. Drei Hauptgründe haben zu diesem Erfolg beigetragen: Erstens ist die Entwicklung hinreichend leistungsfähiger Lithographieprozesse eines der wichtigsten Themen überhaupt für die Nanoelektronik. Zweitens hat der verantwortliche Gruppenleiter Dr.

Andreas Erdmann zeitgerecht mit der Entwicklung einer neuen Generation der Lithographiesimulation begonnen, die auf der effizienten rigorosen Lösung der Maxwell-Gleichungen basiert, und führt sie seither zusammen mit seinen Mitarbeitern in enger Kooperation mit verschiedenen Partnern konsequent weiter. Der Simulator hat inzwischen in zahlreichen Anwendungen in Kooperationen bewiesen, dass er ein äußerst wichtiges Werkzeug für Industrie und Forschung ist. Drittens gelang es durch die Zusammenarbeit mit dem Softwarehaus SIGMA-C, das die Ergebnisse des IISB in sein kommerzielles Simulationsprogramm SOLID-C integriert hat und weltweit vertreibt, den Simulator weltweit bei führenden Halbleiterfirmen zum Einsatz zu bringen. Bild 5 zeigt als Beispiel, wie durch die Anwendung des IISB-Lithographiesimulators zusammen mit einem am IISB entwickelten Optimierer, der auf einem Genetischen Algorithmus beruht, das Prozessfenster für die Herstellung eines Kontaktlochs durch die Wahl der bestmöglichen Maske und der bestmöglichen Belichtung optimiert wurde, d.h. selbst bei einem Defokus von 400 nm noch eine brauchbare Abbildung des Kontaktlochs im Luftbild erzeugt wird.

Dieses Beispiel zur Lithographiesimulation zeigt auch, dass es in Zukunft nicht hinreichend ist,

lediglich die drei Richtungen auf der Halbleiterscheibe zu betrachten: Zum Beispiel muss bei der Lithographiesimulation mit Phasenschiebemasken die reale dreidimensionale Maskengeometrie mitbetrachtet werden, da u.a. die Form der Kanten des durchlässigen Bereichs der Maske das Ergebnis beeinflusst. Dies leistet bereits der am IISB entwickelte dreidimensionale Simulator. Für zukünftige Technologiegenerationen werden aber die Schwankungen der einzelnen Prozessschritte u.a. aufgrund von atomaren/molekularen Effekten („Line Width Roughness“), Driften von Geräteparametern, Abweichungen der Masken von den Sollgeometrien sowie Defekten, die in Strukturierungsschritten abgebildet werden, für die Eigenschaften der Bauelemente und Schaltungen immer wichtiger werden: Sie werden vermehrt dazu führen, dass Bauelemente außerhalb der Spezifikationen geraten, weshalb die Ausbeute abnimmt und u.U. keine wirtschaftliche Fertigung mehr möglich ist. Die Simulation ist das einzige Verfahren, das solche Schwankungen kontrolliert erzeugen und ihre Auswirkungen untersuchen kann. Daraus abgeleitete Änderungen der Prozessführung bzw. des Designs können dann die Auswirkungen der Schwankungen reduzieren und die Ausbeute erhöhen. Hierfür wird zurzeit der Begriff „TCAD for Design for Manufac-

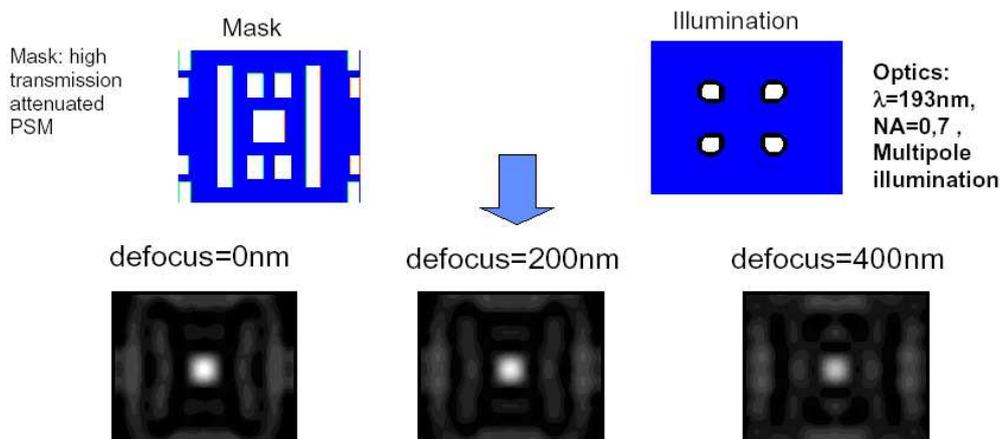


Bild 5: Optimierung des Prozessfensters für ein Kontaktloch mittels Lithographiesimulation und Genetischem Algorithmus

turability (DFM)“ geprägt. Dies erfordert aber neben der Weiterentwicklung der in den Simulatoren verwendeten physikalischen Modelle auch nachhaltige Verbesserungen an den Simulatoren selbst, und muss sowohl in der Bedeutung als auch in der Schwierigkeit vergleichbar zum vor 10 Jahren begonnenen Übergang von der zwei- zur dreidimensionalen Simulation eingeordnet werden. Insgesamt bietet diese neue Herausforderung aber die Chance, den Nutzen der Simulation für die Entwicklung neuer Halbleitertechnologien und Bauelemente weiter deutlich zu erhöhen: Bereits zurzeit wird von der ITRS eine Kostenersparnis durch den Einsatz der Simulation bei der Ent-

wicklung neuer Bauelemente von 35 % abgeschätzt – der Einsatz von *TCAD for DFM* wird sich aber nicht nur positiv auf die Entwicklung sondern auch auf die Produktion von ICs auswirken.

Die Zukunft hält große Anforderungen, aber auch große Möglichkeiten für die Simulation bereit, um zur weiteren Entwicklung der Nanoelektronik entlang der ITRS zumindest in den nächsten 15 Jahren beizutragen. Prädiktive physikalische Modelle, leistungsfähigere Simulatoren, sowie bessere Integration werden bis hin zum *TCAD for DFM* den Kern des industriellen Bedarfs bilden.

Das IISB ist aufgrund seiner fachlichen Arbeiten und seiner aktiv betriebenen Kooperationen mit Anwendern und anderen Forschungseinrichtungen bestens aufgestellt, auch in Zukunft auf dem Gebiet der Simulation zentrale Beiträge zum Fortschritt der Nanoelektronik zu erbringen. Ich möchte unser 20-jähriges Jubiläum nutzen, unseren Partnern in Anwendung, Forschung und bei den Fördergebern sowie meinen Kollegen am IISB für die Zusammenarbeit und die daraus resultierenden Erfolge zu danken, und freue mich auf die Herausforderungen, die intensive Arbeit und die daraus zu erwartenden Erfolge der Zukunft.

Abteilung Halbleiterfertigungsgeräte und -methoden

Schwerpunkte, Trends und Potentiale

Prof. Dr. Lothar Pfitzner

Die Abteilung, von Beginn an eine der Säulen des IISB, arbeitet an Forschungs- und Entwicklungsaufgaben zu Prototyp- und Produktionsanlagen sowie zu Materialien für mikro- und nanoelektronische Technologien. Durchgeführt werden ebenfalls Vorarbeiten zur Geräteintegration in Fertigungsumgebungen. Ein Teil der Arbeiten befasst sich mit Prozess- und Messtechniken für die 300-mm-Technologie, mit der Unterstützung der Implementierung solcher Entwicklungen in die industrielle Leading-edge-Produktion und in Mainstream-Technologien. Die Tätigkeiten der Abteilung finden in drei Schwerpunkten statt:

Im Bereich „Geräte und Prozessautomatisierung“ arbeitet man vorwiegend an der Entwicklung von innovativen Prozesskontrollsystemen unter Einbeziehung von neuartigen Sensoren und an die Erfordernisse von neuen Materialien und Prozessabläufen angepassten Messverfahren. Forschungsschwerpunkte bilden die In-situ- bzw. In-line-Integration von Messsystemen in Prozessgeräte, die Realisierung von geschlossenen Regelschleifen und die modellbasierte Prozesskontrolle. Neben Einzelprozessgeräten finden vor allem flexibel anpassbare Cluster-Tools Anwendung bei der Demonstration der Implementierungen.

Im Bereich „Kontamination und Materialien“ liegt ein Fokus auf Polier-, Ätz- und Reinigungstechnologien vor allem für die Herstellung und das Reclaim von

Siliciumscheiben. Der zweite Schwerpunkt beinhaltet die messtechnische Erfassung von Spurenverunreinigungen auf Oberflächen und im Volumen von Siliciumscheiben, von Konstruktionsmaterialien, Handlingkomponenten und Prozessmedien mit dem Ziel der Reduzierung anorganischer, organischer und partikulärer Kontamination. Die langjährige Erfahrung wurde sowohl in mehrere internationale Standards als auch in ein im Aufbau befindliches Kompetenzzentrum „Yield Enhancement“ eingebracht und durch die Berufung in die Leitung der „International Technology Working Group Yield Enhancement“ der ITRS (International Technology Roadmap for Semiconductors) gewürdigt.

Der dritte Bereich „Fertigungssteuerung und Produktivität“ beschäftigt sich mit den Anforderungen an Planung, Fertigungssteuerung, Logistik und Qualitätskontrolle. Arbeitsschwerpunkte sind prozessübergreifende Steuerungs- bzw. Regelungsverfahren zur Prozessanpassung und -stabilisierung sowie Qualitäts- und Produktmonitoring. Das Leistungsangebot umfasst die Konzipierung und Realisierung von vorwärts- und rückwärtsgekoppelten Steuerungen/Regelungen (Feed-Forward bzw. Feedback), neue statistische Auswerteverfahren zum Produktmonitoring sowie Wirtschaftlichkeits-Untersuchungen bei der Integration von In-line- oder In-situ-Messtechnik bis hin zur diskreten Ablaufsimulation.

Als Querschnittsaufgabe werden Geräteentwicklungen von innovativen Gerätekomponenten und fortschrittlichen Prozess- und Messmodulen geleistet. Im Kundenauftrag entstehen Prototypen und Medienversorgungssysteme, die auf dem Markt noch nicht erhältlich sind. Zu den weiteren Aufgaben gehört die

Optimierung von Prozessen auf neuen Fertigungsgeräten bis hin zur Geräteevaluierung, zumeist in enger Zusammenarbeit mit Gerätefirmen und mit IC-Firmen als Anwender.

Die Finanzierung der Abteilung erfolgt zu einem hohen Anteil aus Industrieaufträgen sowie aus industrienahen EU-Projekten. Für die Zukunft ist vorgesehen, hochinnovative und längerfristig wirksame Arbeitsgebiete vor allem im Bereich neuer Materialien aufzugreifen und dadurch einen Beitrag zu weiterem Wachstum und dem Erschließen neuer industriell bedeutender Aufgabengebiete zu leisten. Mit der Konzentration der nationalen Fördermittel auf Großprojekte werden hierfür zukünftig verstärkt Mittel bei der EU zusammen mit KMUs (kleine und mittelständische Unternehmen) gesucht, zumal dort die Notwendigkeit der Unterstützung und Zusammenführung kleinerer Firmen zu wirkungsvollen Clustern erkannt wurde. Auf europäischer Ebene ist zudem die abgestimmte Intensivierung der Zusammenarbeit mit IMEC in Leuven, Belgien, und mit Leti in Grenoble, Frankreich, viel versprechend angelaufen (siehe auch weiter unten: IISB-Jahrestagung 2004 mit Unterzeichnung des Kooperationsvertrages mit Leti).

Auch in Zukunft ist mit einer guten Inanspruchnahme der Aktivitäten zu rechnen, zumal die Anzahl der technologisch bzw. fertigungsnah tätigen Forschungseinrichtungen eher sinkt. Hinzu kommt, dass aus dem Einsatz neuer Materialien auch neue Herausforderungen für FuE bei Geräte- und Materialherstellern resultieren.

Exemplarisch werden im Folgenden Aktivitäten der Abteilung dargestellt: ein Bericht von der Jahrestagung des IISB 2004, im

Rahmen derer auch ein Kooperationsvertrag mit Leti unterzeichnet wurde sowie ein Beitrag zu einem in der Abteilung entwickelten fortschrittlichen Messverfahren zur Charakterisierung von Mikrostrukturen.

Geräte, Materialien und Methoden für die Halbleiterfertigung – die Jahrestagung des IISB 2004

Zur 6. Jahrestagung trafen sich am 4. November 2004 am IISB in Erlangen rund 80 Experten aus Industrie und Forschung, um neueste Entwicklungen im Bereich der Geräte, Materialien und Fertigungsmethoden für die Halbleiterfertigung zu diskutieren. Im Rahmen der Veranstaltung wurde auch ein Kooperationsvertrag zwischen dem Fraunhofer-Verbund Mikroelektronik und dem französischen Forschungszentrum CEA-Leti unterzeichnet.

Im Mittelpunkt standen Vorträge zum Stand der Technik und zu neuen Ansätzen für Halbleitergrundmaterialien, Halbleiterfertigungsgeräte und Fertigungsprozesse. Abgerundet wurde der fachlich orientierte Teil der Tagung durch einen Vortrag eines Vertreters der Europäischen Kommission zur Erweiterung der Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten für Halbleiterfertigungsgeräte und Materialien auf europäischer Ebene.

Materialien, Geräte und Prozesse
Im Bereich Halbleitergrundmaterialien wurde auf die unvermindert große Bedeutung von Siliciumwafern hingewiesen. Mit neuen 300-mm-Fertigungsstätten in Freiberg (Sachsen) und führenden Herstellungstechnologien nimmt Deutschland weltweit einen vorderen Platz ein, der durch große Aufwendungen in Forschung und Entwicklung

weiter gefestigt wird. In nachfolgenden Vorträgen wurde die steigende Bedeutung neuer Materialien wie Siliciumcarbid als Grundstoff für hochtemperaturfeste Bauelemente und Galliumnitrid für Anwendungen vor allem in der Photonik vorgestellt.

Bei Halbleiterfertigungsgeräten bilden neue Entwicklungen für ultradünne Schichten eine wichtige Grundlage für die weitere Verkleinerung der mikroelektronischen Bauelemente. In mehreren Beiträgen wurde die Wechselwirkung zwischen Anlagenentwicklung einerseits und nötiger so genannter „Precursors“, den gasförmigen oder flüssigen chemischen Ausgangsstoffen, andererseits vorgestellt. Für das Engineering von präzise hergestellten Schichten in atomaren Dimensionen sind u.a. Herausforderungen wie ultrahomogene Beschichtung über pizzagroße Wafer und absolute Reproduzierbarkeit zu meistern.

Um die Ausbeute und Zuverlässigkeit von elektronischen Bauelementen weiter zu erhöhen, spielen moderne Methoden der Prozesskontrolle und –überwachung eine wesentliche Rolle. In entsprechenden Vorträgen wurden neue Ansätze auf diesem Gebiet vorgestellt, die insbesondere für die flexible Halbleiterfertigung bisher ungenutztes Potential freisetzen. Daneben wurde die Notwendigkeit der Integration von Messverfahren in Halbleiterfertigungsgeräte als Basis für neue Regelverfahren vorgestellt.

Europäische Integration

Im europäischen Projekt „Flying Wafer“ werden, unter Federführung des IISB, diese Ansätze auf eine europaweite virtuelle Fabrik übertragen. Es wurde aufgezeigt, wie dadurch die führenden europäischen Forschungseinrichtungen zu einem funktionsfähigen Verbund zusammengeführt werden können, wodurch ihre

Wettbewerbsfähigkeit zu Forschungszentren in den USA und Fernost entscheidend gestärkt wird.

Auch in den weiteren Vorträgen spielte die europäische Dimension die entscheidende Rolle. In einem Rückblick auf eines der erfolgreichsten europäischen Förderprogramme, die SEA-Initiative, wurde die strategische Bedeutung der Verbindung zwischen Forschung und Entwicklung bei hochkomplexen Fertigungsanlagen und dem Reifungsprozess bis zur Integration in die Fertigung vorgestellt. Auch an diesem Projekt war das IISB bei der Vorbereitung und Durchführung beteiligt. Im abschließenden Beitrag der Europäischen Kommission wurden Ziele der Förderung in Mikro- und Nanotechnologien und der beabsichtigte Wandel im nächsten Rahmenprogramm ab 2007, mit ermutigenden Signalen hin zu mehr Forschung, aufgezeigt.

Kooperationsvertrag zwischen Fraunhofer-Verbund Mikroelektronik und CEA-Leti

Ihren Höhepunkt fand die Fachtagung in der Unterzeichnung eines Kooperationsvertrags zwischen dem französischen Forschungszentrum CEA-Leti in Grenoble, vertreten durch seinen Direktor Bernard Barbier, und dem Fraunhofer-Verbund Mikroelektronik, vertreten durch dessen damaligen Vorsitzenden Prof. Herbert Reichl. Hier wird erstmalig im Bereich der so genannten Front-End-Prozesse eine vertragliche Vereinbarung zur deutsch-französischen Zusammenarbeit geschlossen und mit Leben erfüllt.

Durch den Vertrag mit CEA-Leti besteht nunmehr eine Partnerschaft, die über mehrere bereits bestehende Forschungsvorhaben hinaus Anlass für zahlreiche weitere gemeinsame Projekte bis hin



Der Vorsitzende des Fraunhofer-Verbands Mikroelektronik, Prof. Herbert Reichl (links), und der Direktor des CEA-Leti, Bernhard Barbier, bei der Unterzeichnung des Kooperationsvertrages

Beugungseffekte rigoros simuliert werden müssen.

Entwickelte Lösungen

Um diese Probleme bei der Auswertung zu lösen, wurden am IISB zwei Methoden entwickelt. Bei der ersten wird anstelle rigoroser Simulationen ein neuronales Netz zur Auswertung der Messungen verwendet, sodass beliebige, periodische Strukturen analysiert werden können.

Bei der zweiten Methode wird ein Näherungsverfahren verwendet, das eine einfache und schnelle Berechnung der Beugungseffekte von Linien-Graben-Gittern erlaubt, deren Periode im Verhältnis zur verwendeten Wellenlänge so klein ist, dass keine höheren Beugungsordnungen auftreten. Derartige Gitter verhalten sich optisch näherungsweise wie uniaxiale Kristalle. Deren ordentliche und außerordentliche Dielektrizitätskonstanten lassen sich algebraisch aus Linienbreite, Periode, Einfallswinkel und Wellenlänge berechnen. Im Rahmen einer Kooperation mit Leica Microsystems wurde dieser Ansatz verwirklicht und theoretisch und experimentell untersucht.

Experimentelle Ergebnisse

Das entwickelte Näherungsverfahren wurde verwendet, um Streulichtmessungen an Linien-Graben-Gittern mit Perioden von 150 nm mittels eines Optimierungsverfahrens auszuwerten. Es wurden sowohl Lackgitter (Höhe: 200 nm) mit einer darunter liegenden, 90 nm dicken Antireflexionsschicht (ARC) als auch Gitter aus Hydrogensilsesquioxan (HSQ, Höhe: 150 nm), direkt auf dem Siliciumsubstrat, analysiert. Die Streulichtmessungen wurden mit einem Spektralellipsometer mit sichtbarem Licht (Wellenlänge von 250 nm bis 850 nm) durchgeführt.

zum Wissenschaftlertausch bieten wird.

Die unmittelbare, positive Resonanz der Teilnehmer auf die fachliche Gestaltung der Tagung bestätigt einmal mehr die wichtige Stellung des IISB in der nationalen und europäischen Forschungslandschaft.

Weitere Informationen zur Jahrestagung (genaues Programm, Material zu den Vorträgen, weitere Bilder von der Veranstaltung) finden Sie auf den WWW-Seiten des IISB unter

www.iisb.fraunhofer.de/en/profil/annual_confer_2004.htm

Bestimmung von Strukturparametern von Sub-Wellenlängen-Gittern mittels spektralellipsometrischer Messungen

Einführung

Einer der wichtigsten Parameter für die Beurteilung der Leistungsfähigkeit des zukünftigen Bauelements ist die Linienbreite. Bei derzeit hergestellten Strukturbreiten unter 200 nm reicht für deren Bestimmung allerdings die Auflösung von Lichtmikroskopen

nicht mehr aus, sodass stattdessen Elektronenmikroskope verwendet werden. Diese sind aber langsam, verursachen Schäden und Kontaminationen und liefern nicht alle benötigten Informationen, beispielsweise über das dreidimensionale Linienprofil – Nachteile, die bei weiter sinkenden Strukturbreiten den Einsatz der Geräte begrenzen. Deshalb wurde ein neues, lichteoptisches, aber nicht abbildendes Verfahren entwickelt: die Streulicht- oder Beugungsmessung. Dabei wird das von einer periodischen Struktur reflektierte Licht analysiert, um detaillierte Informationen wie Linienbreite, Höhe und Kantenprofil zu erhalten. Als Messgeräte können Standardgeräte der Schichtdickenmessung wie Reflektometer oder Ellipsometer verwendet werden. Die Vorteile dieses Verfahrens sind die Schnelligkeit und die Zerstörungsfreiheit, sodass die Geräte beispielsweise auch direkt in Prozessanlagen integriert werden können, um die hergestellten Strukturen schnell zu analysieren und Fehler zu erkennen.

Ein Nachteil der derzeitigen, kommerziellen Streulichtmessverfahren ist die zeit- und rechenintensive Analyse der Messergebnisse, da aufgrund der kleinen Abmessungen der Strukturen die

Die ausgezeichnete Übereinstimmung der Ergebnisse aus den Streulichtmessungen mit Elektronenmikroskopaufnahmen ist in Bild 1 gezeigt. In Bild 2 sind die spektralellipsometrischen Signaturen einer Messung am HSQ-Gitter, der Näherungsrechnung und der rigorosen Simulation gezeigt. Deutlich ist die hervorragende Übereinstimmung zwischen den verschiedenen Mess- und Rechenverfahren zu erkennen.

Zusammenfassung

Am IISB wurden zwei Methoden zur Analyse von Streulichtmessungen an periodischen Strukturen entwickelt. Das hier vorgestellte Näherungsverfahren erlaubt die schnelle und einfache Auswertung von Messungen an Linien-Graben-Gittern mit Perioden kleiner als die Wellenlänge, um detaillierte Strukturinformationen wie Linienbreite und Höhe zu erhalten.

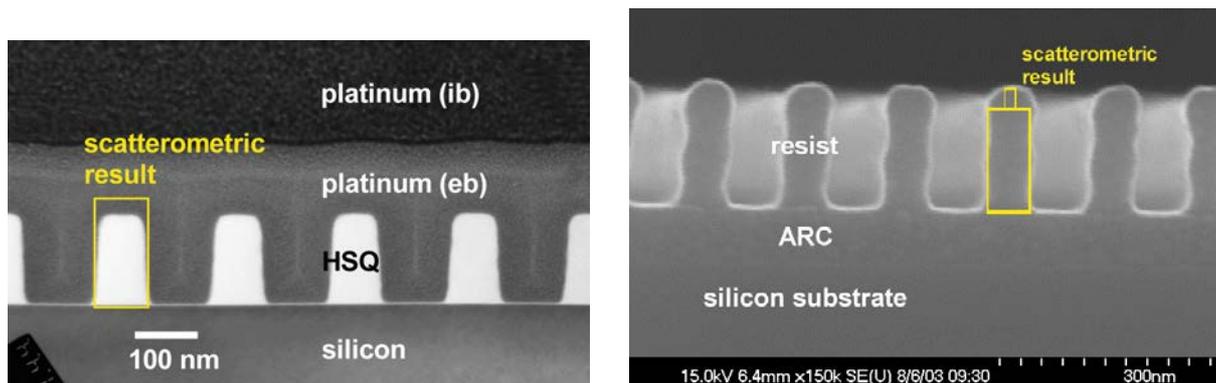


Bild 1: Elektronenmikroskopaufnahmen des HSQ-Gitters (links) und des Lackgitters (rechts), verglichen mit Ergebnissen der Streulichtmessungen (gelb dargestellt). Die Periode beträgt bei beiden Gittern 150 nm.

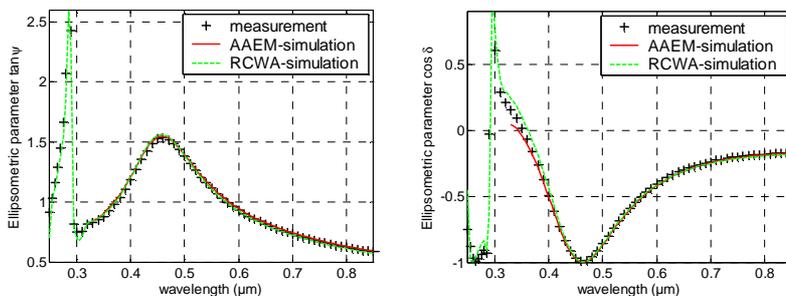


Bild 2: Spektralellipsometrische Messungen am Oxidgitter, dargestellt zusammen mit den Simulationsergebnissen mittels des Näherungsverfahrens (AAEM) und mittels einer rigorosen Methode (RCWA). Die hervorragende Übereinstimmung ist deutlich sichtbar.

Abteilung Technologie

Schwerpunkte, Trends und Potentiale

Dr. Anton Bauer
Priv.-Doz. Dr. Lothar Frey

Konzepte zur Herstellung neuer Materialien und Schichten, die Integration neuer Materialien in der Siliciumtechnologie, die Bearbeitung mikroskopischer Strukturen mittels Ionenstrahltechnik und die Entwicklung von Bauelementstrukturen der Leistungselektronik und der Mikrosystemtechnik sind Forschungsschwerpunkte und Kompetenzen der Abteilung Technologie, einer der drei „klassischen“ Abteilungen des IISB.

Für die Durchführung der Arbeiten stehen in Kooperation mit dem Lehrstuhl für Elektronische Bauelemente der Universität Erlangen-Nürnberg mehr als 1000 m² Reinraum (Klasse 10) mit entsprechender Gerätetechnik zur Verfügung. Dadurch ist die Durchführung aller wichtigen Prozess-Schritte auf Siliciumscheiben bis 150 mm, für Einzelprozess-Schritte bis 200 mm bzw. 300 mm Durchmesser möglich. Ein von der Industrie transferierter CMOS-Prozess ist in der Prozesslinie des IISB implementiert und an die speziellen Anforderungen eines Forschungsinstitutes angepasst. Dieser Gesamtprozess bildet die Basis, die Einzelprozessentwicklung für zukünftige Schaltkreise zu stärken und eine Erprobung von neuen Prozessen im Umfeld eines bekannten Prozesses zu ermöglichen.

Im Bereich Front-end-Prozessentwicklung und elektronische Halbleiter-Bauelemente-Charakterisierung steht dem IISB mit hochmodernen Gasphasen-

Abscheideanlagen auf der Basis von MOCVD geeignetes Equipment zur Abscheidung von Hoch-Epsilon-Schichten zur Verfügung. Kompetenzen des IISB liegen dabei in der Anpassung dieser Anlagen an die jeweilige Precursorenchemie, in der Abscheidung aus allen Arten von Precursoren und in der Charakterisierung der abgeschiedenen Schichten, sowie in Zusammenarbeit mit mehreren chemischen Instituten in der Herstellung und Modifikation neuartiger Precursoren. Dazu und für die weitergehende Bauelemente-Charakterisierung ist das IISB sehr umfassend mit Parameter-Messplätzen, Waferprobern und Hochspannungsmessplätzen ausgerüstet.

Ein traditionelles Arbeitsgebiet am IISB ist die Ionenstrahltechnik. Implantationsanlagen von einigen eV bis hin zu mehreren MeV stehen zur Verfügung. Die Durchführung von Sonderimplantationen für Industriekunden, sowohl in der CMOS- als auch in der Leistungsbau-elemententechnologie, stellt einen Schwerpunkt der Aktivitäten dar.

Seit mehr als 15 Jahren arbeitet das IISB im Bereich Leistungsbau-elemente und SiC. Seit kurzem stehen dem Institut spezielle Anlagen zur Herstellung von Trenchstrukturen und zu deren Wiederbefüllung zur Verfügung. Daraus ergeben sich vielfache Möglichkeiten der Entwicklung neuartiger Bauelementestrukturen in der Leistungselektronik. Das Substratmaterial SiC bietet große Möglichkeiten vor allem für die Leistungselektronik. Mittlerweile können am IISB nahezu alle in der CMOS-Technologie bekannten Fertigungsschritte auch an SiC-Scheiben durchgeführt werden. Die Entwicklung neuartiger Prozess-Schritte wie Hochtemperatursheilung und Epitaxie ist ebenfalls möglich.

Zur Herstellung von Halbleiterbauelementen gehört unabdingbar die Charakterisierung der einzelnen Prozess-Schritte und der jeweiligen Strukturen. Wichtige Schritte sind dabei die Bestimmung der Schichtzusammensetzung, der Topographie, der Dotierprofile und weiterer physikalischer und chemischer Parameter. Eine besondere Kompetenz der Abteilung Technologie liegt in der Kombination verschiedener Methoden zur Analyse von Fehlern in der Prozessierung von Halbleitern und dem Aufspüren von Fehlerursachen.

Die Kompetenzen in der Bearbeitung von Strukturen in der Größenordnung weniger Nanometer mit Hilfe fokussierter Ionen- (Focused Ion Beam, FIB) und Elektronenstrahlen werden am IISB seit mehreren Jahren entwickelt und für die Reparatur und Analyse von Prototypen eingesetzt. Darüber hinaus werden mit der Technik neue Nanosonden für die Rastermikroskopie entwickelt und gefertigt, die es erlauben, physikalische oder elektrische Parameter, wie Dotierung oder Schichteigenschaften, mit hoher Ortsauflösung zu bestimmen. Weitere Anwendungsgebiete sind kleinste Feldemitterstrukturen für die Vakuum-Nanoelektronik.

Im Folgenden werden exemplarisch zwei Aktivitäten der Abteilung aus dem Bereich Nanostrukturierung vorgestellt.

Imprint-Technik – eine Methode zur Nanostrukturierung

Einleitung

Eine wichtige Voraussetzung für die Entwicklung der Nanotechnologie ist eine kostengünstige Methode zur Herstellung kleinerer Strukturen mit hohem Durchsatz. Heutige Lithographiesysteme nutzen Excimer-Laser mit einer Lichtwellenlänge von 193 nm, um kommerzielle ICs mit einer minimalen Strukturgröße von 90 nm und in Zukunft wohl auch von 65 nm zu produzieren. Das Rennen um die geeignete Methode für die weitere Miniaturisierung in der Lithographie (minimale Strukturgröße: 45 nm, 32 nm, 22 nm) ist allerdings noch offen und findet sich zusammengefasst unter dem Begriff „Next Generation Lithography (NGL)“ wieder. Kandidaten für die NGL sind z.B. die EUV-Lithographie mit ihren erheblichen Anforderungen u.a. an Lichtquelle, Optik und Masken und den damit verbundenen hohen Kosten, sowie die Elektronenstrahl-Lithographie, die auf Grund des seriellen Schreibvorgangs und des dadurch zu geringen Durchsatzes für die Massenproduktion nur ungenügend geeignet sein wird.

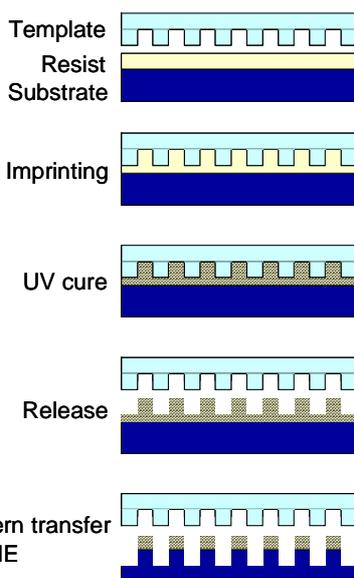


Bild 1: Schematische Darstellung des Imprint-Prozesses

Die Imprint- (Präge-) Technik, deren Grundprinzip schon aus dem Altertum bekannt ist, stellt eine weitere Alternative dar, um zukünftigen Anforderungen in der Lithographie gerecht zu werden. In einer Kooperation zwischen dem IISB, dem Lehrstuhl für Elektronische Bauelemente der Universität Erlangen-Nürnberg und Suss microtec wird seit Mitte 2004 im Rahmen des Bayerischen Forschungsverbundes für Nanoelektronik (FORNEL) intensiv am Thema Imprint gearbeitet, um Nanostrukturierung vergleichsweise kostengünstig und mit hohem Durchsatz zu ermöglichen.

Prinzip

Bei der Imprint-Lithographie erfolgt die Strukturierung durch einen Stempel, der in einen UV-empfindlichen Lack gedrückt wird (Bild 1). Bei diesem Prozess werden die auf dem Stempel vorhandenen Strukturen in den Lack übertragen. Nach einer UV-Flutbelichtung, die den Lack aushärten lässt, dient dieser als Ätzmaske, um die Strukturen durch reaktives Ionenätzen (RIE) in das Substrat zu übertragen. Basierend auf dieser Technik konnten bereits Säulenstrukturen mit einem minimalen Durchmesser von 10 nm hergestellt werden. Imprint ist eine Abbildungstechnik bei der die Strukturen

des Stempels 1:1 in das Substrat übertragen werden. Dies bedeutet, dass sich jeder Fehler im Stempel unmittelbar auf das Resultat auswirkt. Ein perfekter Stempel stellt daher ein Hauptkriterium für einen erfolgreichen Einsatz der Imprint-Technik dar.

Im Rahmen von FORNEL ist es das Ziel, mittels optischer Lithographie, konventionellen Äzstechniken und fokussierten Ionenstrahlen aus UV-transparentem Quarz optimierte Prägeformen herzustellen.

Stempelherstellung

Für die Evaluierung von verschiedenen Lacken und die Optimierung von Prozessparametern werden am IISB nicht nur Stempel aus Quarz verwendet. Vielmehr nutzt man die hausinterne Si-Technologie, um Masterstrukturen aus Si herzustellen (Bild 2), die dann mit einem Siloxan (PDMS), nach einer geeigneten Behandlung der Si-Oberfläche, beinahe beliebig oft abgeformt werden können. In Bild 3 ist ein Beispiel für einen Si-Master und dessen abgeformten PDMS-Stempel gezeigt. Die Strukturgröße beträgt hier 1,2 µm. Die erzeugten Strukturgrößen sind im Wesentlichen durch das Auflösungsvermögen der optischen Lithographie begrenzt.

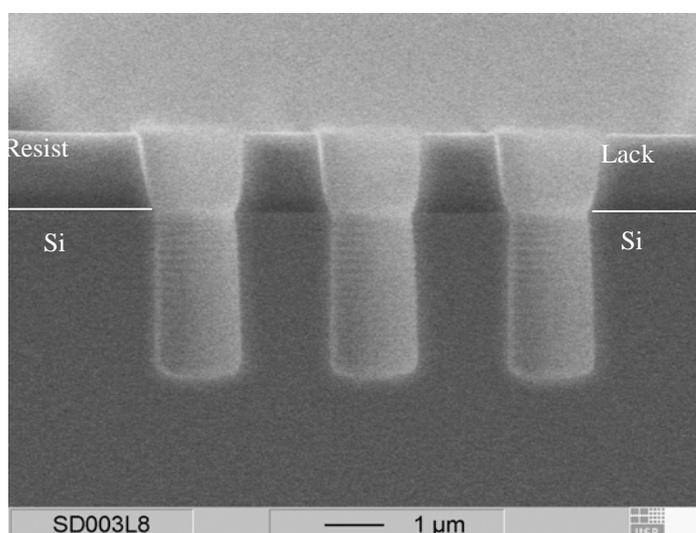


Bild 2: Querschnitt durch eine Si-Masterstruktur nach dem Trockenätzen. Der Lack diente als Trockenätzmaske.

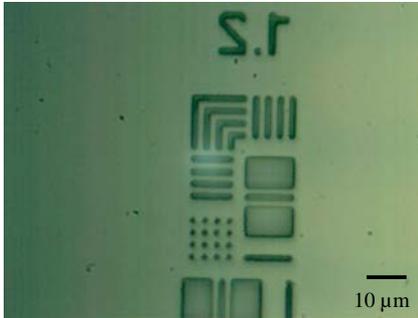
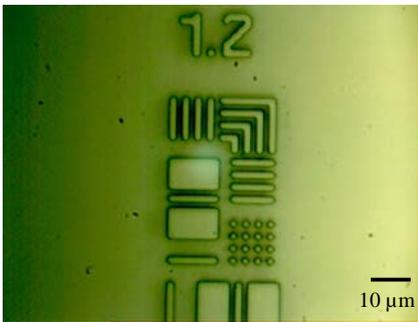


Bild 3: Si-Masterstruktur (oben) und PDMS-Stempel (unten)

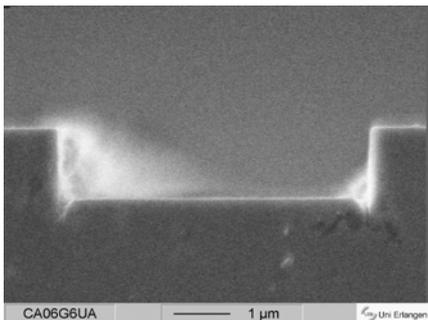


Bild 4: Querschnitt eines geätzten Grabens in Quarz

Neben den PDMS-Stempeln wird parallel an einem Quarzätzprozess gearbeitet. Der Vorteil von Quarz gegenüber PDMS ist die höhere Transparenz im UV-Bereich, sowie dessen signifikant höhere mechanische und chemische Beständigkeit, weshalb Quarzstempel im Bereich von Strukturgrößen unter 300 nm, trotz aufwendigerer Technologie, klar zu bevorzugen sind. In Bild 4 ist ein Querschnitt eines geätzten Grabens in Quarz gezeigt.

Ausblick

Nach der Umrüstung einer konventionellen Belichtungseinheit zur Imprint-Maschine durch Suss microtec werden Stempel und

verschiedene Lacke systematisch auf ihre Eignung untersucht und optimiert. Des Weiteren wurde Mitte des Jahres 2005 ein so genannter „Step and Stamp Imprinter“ in Betrieb genommen, der eine Auflösung im Sub-20-nm-Bereich verspricht.

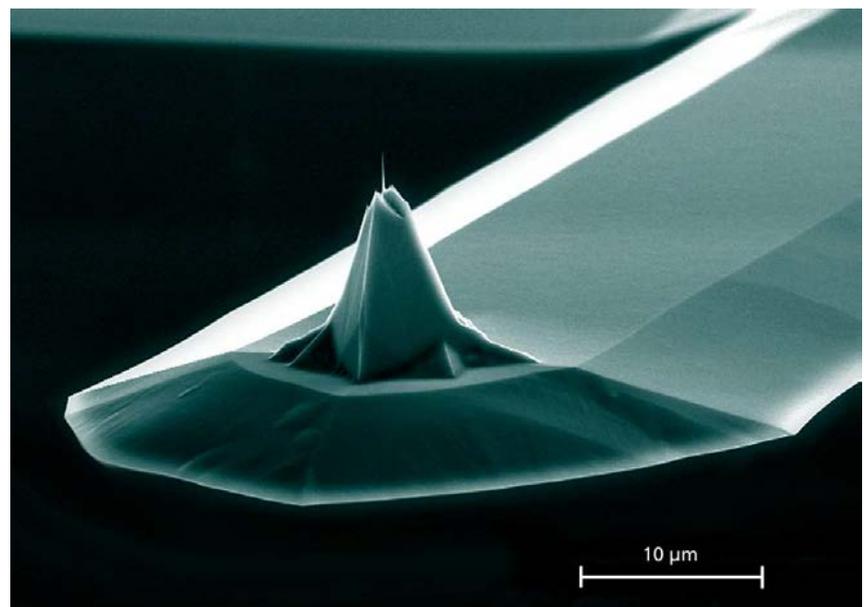
Atome zur Spitze getrieben – Abtastspitzen für die Rasterkraftmikroskopie

Für Forschungen bis in atomare Dimensionen eignet sich die Rasterkraftmikroskopie gleichermaßen wie für Qualitätskontrollen in der Halbleiterindustrie. Äußerst feine Abtastspitzen produziert der Weltmarktführer NanoWorld in den Reinräumen seines Kooperationspartners IISB in Erlangen.

Je feiner und genauer Halbleiterschaltungen strukturiert sein sollen, desto komplizierter wird die Qualitätskontrolle. Die Elektronenmikroskopie eignet sich von ihrer Auflösung her gut, um

Strukturen, Defekte und Ausfallursachen solcher Bauelemente aufzuklären. Doch besitzt sie einen entscheidenden Nachteil: Im Allgemeinen werden solche Untersuchungen an Querschnitten durchgeführt. Das teuer hergestellte Objekt muss gebrochen und kann nicht weiterverwendet werden. Die Rasterkraftmikroskopie ist besser geeignet, denn es handelt sich um eine zerstörungsfreie Methode bei Atmosphärendruck. Jedoch ist sie deutlich langsamer, da eine sehr feine, aber im Vergleich zum Elektronenstrahl träge und daher langsame Nadel die Probe ähnlich wie ein Plattenspieler zeilenweise abtastet. Die ideale Nadel endet in einem Atom; mit ihr liegt die erreichbare Auflösung ebenfalls in atomaren Abmessungen. Derartige Nadeln stellt die Firma NanoWorld, Weltmarktführer in diesem Bereich, auch am IISB in Erlangen her.

Viele Verfahrensschritte, wie sie von der Fertigung mikroelektronischer Schaltungen bekannt sind, arbeiten die mehrere hundert Cantilever genannten Trägerfedern aus einer Silicium-



Cantilever mit Abtastspitze. Im elektronenmikroskopischen Bild wäre ein menschliches Haar (Durchmesser rund 100 Mikrometer) etwa eintausendmal dicker als die feine Struktur auf der Spitze der Nadel.

scheibe heraus. „Für die meisten der in unserem Unternehmen und bei Konkurrenten hergestellten Nadeln reicht dies aus“, betont Oliver Krause, Key Account Manager für den Bereich Halbleiter bei NanoWorld. „Einige besonders feine Varianten lassen sich so jedoch nicht mehr fertigen. Bei unseren Spezialitäten helfen uns die Kollegen von Fraunhofer entscheidend weiter. Die gemeinsame Forschung und Entwicklung hat sich auch bei anderen Sensoren seit vielen Jahren bewährt - von der Aus-

stattung mit Reinräumen und Analysegeräten einmal ganz abgesehen.“

Die *ultima ratio* hinsichtlich Präzision in der Materialbearbeitung ist das Ionenstrahlätzen, das Christoph Lehrer vom IISB an einem millionenmal größeren Beispiel veranschaulicht: „Bauen Sie im Sandkasten einen Kegel! Das sei die herkömmliche Nadel aus Siliciumatomen. Mit einem Wasserstrahl aus dem Gartenschlauch arbeiten Sie nun an deren Spitze eine noch feinere

heraus.“ Statt Wasser verwenden die Forscher einen von elektrischen Feldern beschleunigten und fokussierten Strahl von Metallionen. Wichtig ist es dabei, einen Kompromiss zwischen Ionenfluss, Geschwindigkeit des Abtrags und Präzision zu erreichen. Das IISB verfügt auf diesem Gebiet über eine langjährige Erfahrung und über eine weltweit anerkannte Kompetenz.

Abteilung Kristallzüchtung

Einkristalle – Juwelen für Innovationen

Züchtung von Einkristallen - eine Herausforderung für Wissenschaft und Technik

Dr. Jochen Friedrich
Prof. Dr. Dr. h.c. Georg Müller

Einleitung

Einkristalle sind aus unserem Leben nicht wegzudenken: Als Juwelen faszinieren sie seit Jahrhunderten die Menschheit. Neben dieser ästhetischen Funktion kommt den Einkristallen aber auch eine wichtige technische und wirtschaftliche Bedeutung zu. Viele umwälzende Neuerungen der vergangenen 50 Jahre wären ohne Einkristalle nicht möglich gewesen. So gäbe es beispielsweise ohne Silicium-einkristalle die Mikroelektronik und die Informationstechnologie in ihrer heutigen Form nicht. Als Fenster und Linsen integriert man Einkristalle aus unterschiedlichsten optischen Materialien in hochentwickelte optische Systeme. Mit Laserkristallen bestückte Geräte ermöglichen die Entwicklung neuartiger medizinischer Behandlungsmethoden. Aus der modernen Messtechnik und der Materialverarbeitung sind Laserwerkzeuge heutzutage nicht mehr wegzudenken. Die rasante Zunahme der technisch-wissenschaftlichen Bedeutung

von Einkristallen drückt sich auch dadurch aus, dass die Weltjahresproduktion großer Einkristalle in den vergangenen Jahren kräftig angestiegen ist (von 5 000 t im Jahr 1979 auf etwa 20 000 t im Jahr 1999).

Herstellung von Einkristallen („Kristallzüchtung“)

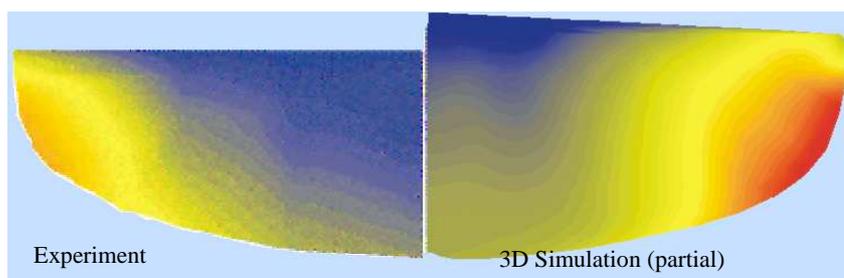
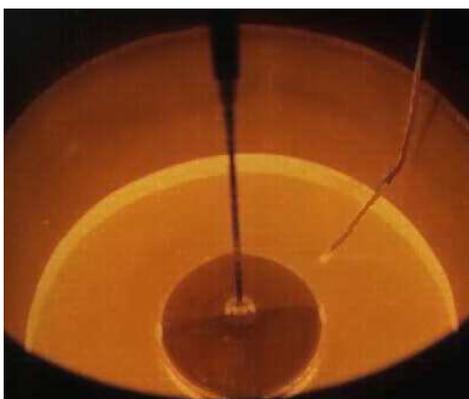
Die Herstellung von Einkristallen in Labors und Industrieanlagen nennt man „Kristallzüchtung“. Die Vielfalt der zu züchtenden Materialien erfordert wegen deren verschiedenartigen Materialeigenschaften eine ganze Reihe von unterschiedlichen Kristallzüchtungstechniken. Die wichtigsten Kristallzüchtungstechnologien basieren auf dem Phasenübergang vom flüssigen in den festen Zustand (Kristallzüchtung aus Schmelzen). Etliche technisch wichtige Kristalle, wie z.B. Quarz (SiO_2) werden aus Lösungen kristallisiert. Nur einige wenige Materialien von industrieller Bedeutung, wie beispielsweise der Halbleiter Siliciumcarbid, werden aus der Gasphase gezüchtet. Die Grundlagen für die Methoden zur Herstellung von Einkristallen aus der Schmelze wurden in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts gelegt. Bei dem am häufigsten eingesetzten, nach Czochralski genannten Ziehverfahren, wird der Kristall unter Rotation langsam nach oben aus einem Tiegel mit der Schmelze herausgezogen.

Bei zwei anderen Techniken, der Bridgman-Stockbarger- und der

VGF (Vertical Gradient Freeze) Methode, wird die Schmelze direkt im Tiegel von einem zum anderen Ende „gerichtet“ auskristallisiert. Im Bridgman-Stockbarger Verfahren geschieht das, indem man den Tiegel relativ zum Ofen bewegt. Beim VGF-Verfahren werden ohne mechanische Bewegung die Temperaturen in der Ofenanlage langsam abgesenkt. Beide Techniken bieten gegenüber der Czochralski-Methode den Vorteil, dass man während des Züchtungsprozesses die Temperaturbedingungen besser einstellen kann. Dadurch lassen sich Kristalle mit niedrigerer Fehlerdichte herstellen. Der Nachteil besteht darin, dass die Kristalle in Kontakt mit der Tiegelwand wachsen und während des Wachstums nicht beobachtet werden können – das kann die Ausbeute bei der Kristallproduktion schmälern.

Defect-Engineering – die aktuelle Herausforderung

Mit Hilfe des so genannten Defect-Engineerings unterstützt die Abteilung Kristallzüchtung des IISB seine Industriepartner dabei, größere Kristalle mit noch besserer Qualität unter verbesserten wirtschaftlichen Bedingungen zu züchten. Beim „Defect-Engineering“ geht es darum, wissenschaftliche Erkenntnisse über die Bildung von Kristalldefekten bereits beim Design einer Kristallzüchtungsanlage und der Prozessentwicklung zu berücksichtigen. Dazu verwendet man moderne Verfahren der Modell-



Bei der Czochralski-Züchtung von Silicium-Kristallen in die Schmelze eingetauchter Temperatursensor (links). Vom IISB gemessene und mit dem vom IISB entwickelten Programm berechnete Temperaturverteilung in einer 20 kg schweren Siliciumschmelze (rechts).

bildung und Computersimulation. Die Bildung von unerwünschten Kristallfehlern ist in den meisten Fällen direkt an das Temperaturfeld während des Wachstums gekoppelt. Daraus ergibt sich folgende Strategie: Zum einen wird der Kristallzuchtprozess sorgfältig analysiert, um die Beziehung zwischen den Wachstumsbedingungen und der Entstehung von Kristalldefekten zu finden. Aus diesen Informationen entsteht dann ein „Defektmodell“. Zum anderen wird ein „Prozessmodell“ aufgestellt, das die eigentlichen Züchtungsparameter (also jene Elemente des Züchtungsprozesses, die direkt manipuliert werden können) zu den Wachstumsbedingungen (meist das Temperaturfeld) in Beziehung setzt. Eine derartige systematische ingenieurwissenschaftliche Analyse eines Kristallzuchtungsprozesses wird durch quantitative Messungen mit diversen Sensorsystemen in Forschungs- und Produktionsanlagen erreicht, die in enger Kombination mit Computersimulation erfolgen. Mit diesem modernen Konzept ist das IISB in der Lage, die Probleme zu lösen, die von seinen Industriepartnern an das IISB herangetragen werden:

- Weiterentwicklung von Anlagen und Prozessen, um größere Kristalle züchten zu können und so Produktivität und Ausbeute zu erhöhen, letztlich um damit am Weltmarkt zu bestehen und Arbeitsplätze zu sichern.
- Kontrolle der Bildung bzw. Vermeidung bestimmter Kristallfehler, um die physikalisch-chemischen Eigenschaften der Kristalle den Erfordernissen der jeweiligen Anwendungen (Kundenwünsche) anzupassen.
- Erforschung und Entwicklung neuartiger Kristallzüchtungstechnologien für Materialien, von denen noch keine Einkristalle in der technisch ge-

forderten Größe und Qualität hergestellt werden können.

In den zurückliegenden Jahren konnte eine Vielzahl derartiger Aufgaben vom IISB für seine Industriepartner gelöst werden. Dadurch hat sich das IISB den Ruf eines weltweit anerkannten Kompetenzzentrums für Kristallzüchtung von Halbleitern und optischen Kristallen erarbeitet. Dies wird u. a. auch durch die Tatsache unterstrichen, dass Wissenschaftler des IISB mit mehreren internationalen und nationalen Preisen ausgezeichnet wurden, wie zum Beispiel mit dem Laudise Preis der Internationalen Organisation für Kristallzüchtung (2001), dem Wissenschaftspreis des Deutschen Stifterverbandes (2003), dem Georg-Waeber Innovationspreis (2002), dem VDI-Preis (2003) und dem Forschungspreis der Deutschen Gesellschaft für Kristallzüchtung und Kristallwachstum (2003) sowie einer Ehrenpromotion (Dr. h.c.) durch die Universität Temesvar.

Im Folgenden sind als Highlights einige Beispiele für industriell bedeutende FuE-Beiträge des IISB angeführt.

Highlight – Silicium-Kristalle mit einer Masse von über 300 kg

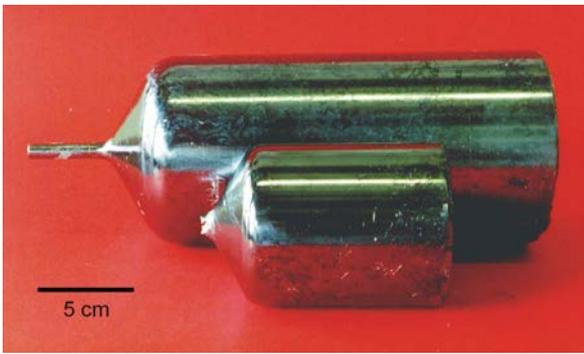
Die Forderung nach einem kontinuierlichen Produktivitätszuwachs in der Mikroelektronik erfordert eine ständige Vergrößerung der Silicium-Kristalldimension bei gleichen oder sogar verbesserten Kristalleigenschaften. Seit der Einführung der Produktion von Silicium-Kristallen mit einem Durchmesser von 300 mm um den Jahrtausendwechsel herum hat sich das Kristallgewicht um den Faktor 3 – 4 auf heute über 300 kg erhöht. Diese Vervielfachung des Kristallgewichts war unter anderem dadurch möglich, dass es gelang, die Konvektionsvorgänge in der

Silicium-Schmelze besser zu beherrschen. Dies ist speziell wichtig für den Ankeimprozess, wo ein Temperaturschock beim Eintauchen des Keims vermieden werden muss, sowie beim anschließenden Dünnhalziehen zur Vermeidung von Durchmesser-Schwankungen.

Forscher des IISB konnten diese Probleme in enger Kooperation mit dem Industriepartner Siltro nic lösen. Durch die Entwicklung und den Einsatz spezieller Temperatursensoren war es den Wissenschaftlern des IISB möglich, die Temperaturverteilung in-situ während des Produktionsprozesses zu messen. Diese Temperaturmessungen konnten so zum einen zu einer direkten Prozessanalyse und Prozessoptimierung genutzt werden. Zum anderen lieferten die Messungen Benchmarkdaten für die Simulation und halfen, die Prozessmodelle weiter zu verbessern.

Highlight – Defektarme GaAs und InP-Kristalle

Mitarbeiter des IISB waren maßgeblich an der Entwicklung des VGF-Prozesses für die industrielle Produktion von GaAs- und InP-Einkristallen beteiligt. Durch detaillierte und systematische Untersuchungen wurden die Ursachen von schädlichen Kristallfehlern (hier „Versetzungen“), die bei der Herstellung solcher Kristalle nach dem VGF-Verfahren entstehen, aufgeklärt. Basierend auf diesen Erkenntnissen konnte dann mit einer Kombination aus Experiment und numerischer Simulation die Wärmeübertragung beim Herstellungsprozess entscheidend verbessert werden. Durch diese FuE-Arbeiten gelang beim Industriepartner Freiburger Compound Materials die Produktion solcher Kristalle mit extrem niedriger Fehlerdichte. Diese Halbleitereinkristalle mit der hohen strukturellen Perfektion werden beispielsweise als Basismaterial für



GaAs-Kristalle mit 3" and 4" Durchmesser (links) und ein InP-Kristall mit 2" Durchmesser, die nach dem VGF-Verfahren in Erlangen gezüchtet wurden

die Herstellung von Hochleistungslaserdioden benötigt, die innovative Präzisionsverfahren in der Materialbearbeitung oder eine ultraschnelle Datenübertragung ermöglichen.

Highlight – Perfekte CaF_2 - Kristalle

Auf dem Weg zu immer feineren mikroelektronischen Strukturen muss die Wellenlänge der eingesetzten UV-Strahlung kürzer werden. Die kommende Generation der Photolithographie arbeitet bei einer Wellenlänge unter 200 nm, bei der die bisher verwendeten Linsen aus Quarzglas nicht mehr genügend transparent sind. Deshalb müssen in den neuen Geräten zur Photolithographie („Wafer-Stepper“) Linsen aus einkristallinen, hochreinen, defektarmen Calciumfluorid-

Kristallen eingesetzt werden, die in diesem Wellenlängenbereich (DUV) durchlässig sind.

In Zusammenarbeit mit dem Industriepartner *Schott Lithotec* entwickelten die Wissenschaftler des IISB mit Hilfe der Computersimulation spezielle Anlagen für die Züchtung von solch perfekten CaF_2 -Kristallen. Die Produktionsanlagen des Industriepartners sind die größten der Welt. Darüber hinaus bauten die Forscher eine spezielle Apparatur am IISB auf, um darin die Zusammenhänge zwischen den Herstellungsbedingungen und den Materialeigenschaften besser untersuchen zu können. Damit fanden sie unter anderem heraus, wie die Temperaturverteilung beim Wachstum die Güte des Einkristalls beeinflusst. Im

Ergebnis lag ein verbessertes Computermodell vor, das für den Industriepartner eingesetzt wurde, um dessen Produktionsprozess so weit zu optimieren, dass er die Weltmarktführung erreichte.

Highlight – Maßgeschneiderte Software für die Kristallzucht

Generell ist für die Kristallzucht der Einsatz der numerischen Prozesssimulation heute ein unverzichtbares Hilfsmittel geworden, vor allem um in der Industrie Zeit und Kosten für die Anlagen- und Prozessentwicklung zu sparen. So kostet die Herstellung eines 300-kg-Silicium-Kristalls etwa genauso viel wie das Jahresgehalt eines Berechnungsingenieurs. Aus diesem Grund entwickeln die Wissenschaftler des IISB neue Softwareprogramme für die Kristallzucht, die sich neben ihrer Leistungsfähigkeit vor allem auch durch ihre enorme Benutzerfreundlichkeit auszeichnen. Die Programme erfassen den komplexen Aufbau einer Kristallzuchtungsanlage durch automatisches Einlesen einer CAD-Konstruktionszeichnung und berechnen die für das Kristallwachstum relevanten Phänomene unter Verwendung modernster Verfahren der angewandten Mathematik und Informatik. Ein bedeutendes Leistungsmerkmal, mit dem eines der Programme des IISB jahrelang ein internationales Alleinstellungsmerkmal innehatte, ist der Berechnungsmodus der „Inversen Modellie-



„Perfekte“ CaF_2 - Kristalle als Linsenmaterial für die Mikrolithographie, die nach einem modifizierten Bridgman-Stockbarger Verfahren hergestellt wurden (Quelle: *SCHOTT Lithotec*)

rung“. Damit können die Wachstumsbedingungen für einen Kristall vorgegeben werden und das Programm berechnet dazu die Prozessparameter der Kristallzuchtungsanlage, z.B. die Auslegung der Heizleistungen. Heute hat das IISB auf dem Gebiet der numerischen Modellierung von Kristallzuchtungsprozessen eine weltweit führende Position inne. Dies wird durch die Tatsache unterstrichen, dass seit der ersten Lizenzvergabe im Jahr 1997 bislang über 1 Mio. Euro durch Lizenzverträge mit weltweit führenden Firmen und Forschungsinstituten eingenommen wurden.

Historische Entwicklung der Kristallzuchtung am Standort Erlangen

Die Kristallzuchtung hat in Erlangen eine lange Tradition. So wurden in den Siemens-Laboratorien in den 50er Jahren die III-V Verbindungshalbleiter entdeckt und ihre Kristallzuchtung entwickelt (z.B. Gremmelmeier-Verfahren). Der berühmte Siemens-Prozess zur Herstellung von Reinstsilicium wurde entwickelt und das Floating-Zone-Verfahren erfunden. Ende der 70er Jahre wurde am Institut für Werkstoffwissenschaften der Universität Erlangen-Nürnberg von Prof. Georg Müller das Erlanger Kristall-Labor gegründet. 1996 erfolgten dann aus dem Institut für Werkstoffwissenschaften heraus zwei weitere wichtige Aktivitäten. Zum einen wurde die Firma SiCrystal gegründet, die heute mit ihren 70 Mitarbeitern ein weltweit renommierter Hersteller von Siliciumcarbidkristallen ist. Zum anderen wurde am IISB die Arbeitsgruppe Kristallzuchtung eingerichtet, die dann 1999 in die Abteilung Kristallzuchtung umgewandelt wurde und in enger Kooperation mit dem Institut für Werkstoffwissenschaften als Erlanger Kristall-Labor fungiert. Dieses Erlanger Kristall-Labor hat

seit 1996 etwa 12 Mio. Euro an Drittmitteln aus der Industrie und öffentlichen Geldgebern eingenommen. Heute umfasst das Kristall-Labor, das gemeinsam von Prof. Georg Müller und Dr. Jochen Friedrich geleitet wird, etwa 30 wissenschaftliche und technische Mitarbeiter, wovon etwa 2/3 am IISB angestellt sind. Seit der Gründung des Kristall-Labors wurden bisher etwa 100 Diplomarbeiten sowie über 30 Doktorarbeiten angefertigt und über 200 wissenschaftliche Artikel publiziert. Der vom Kristall-Labor ausgebildete Nachwuchs ist aufgrund seiner breiten werkstoffwissenschaftlichen Ausbildung nicht nur in der Kristallzuchtungsindustrie sehr begehrt.

Zukunftsthema – Billiges Grundmaterial für die Photovoltaik

Eine der großen Aufgaben in der Photovoltaik ist es, die Produktionskosten zur Herstellung von Photovoltaikgrundmaterial zu reduzieren, bei gleichem oder höherem Wirkungsgrad der Solarzellen. Mit diesem Ziel forscht das IISB gemeinsam mit den Industriepartnern an mehreren aussichtsreichen Industrieprozessen.

Das Blockgießen ist das wichtigste Produktionsverfahren zur Herstellung von Siliciummaterial für die Photovoltaikanwendung. Heute werden mit diesem Verfahren multikristalline Blöcke aus Silicium mit einer Masse von über 300 kg produziert, aus denen dann Wafer herausgesägt werden. Eine andere kostengünstige Technik stellt das Bänderziehverfahren nach der EFG-Methode (Edge-Defined-Film-Fed-Growth) dar. Bei diesem Prozess werden heute achteckige Röhren von einigen hundert μm Wandstärke und einer Länge von 5-7 m aus der Schmelze herausgezogen, die dann mittels Laserschneidegeräten zu Wafern vereinzelt werden. Für beide Pro-

duktionsverfahren führen die Forscher des IISB sowohl experimentelle als auch numerische Untersuchungen durch, um die prozessbestimmenden Wärme- und Stofftransportmechanismen besser zu verstehen und um damit Strategien für eine Optimierung der Verfahren zu erarbeiten.

Zukunftsthema – GaN-Substrate für blaues und weißes Licht

Das Halbleitermaterial Galliumnitrid (GaN) ist der Schlüsselwerkstoff dafür, dass in Zukunft blaue und weiße Leuchtdioden noch heller leuchten und dass der Einsatz von blauen Laserdioden für künftige DVD-Generationen und neue digitale Fernsehgeräte ermöglicht wird. Während normalerweise optoelektronische Bauelemente homoepitaktisch auf einem arteigenem Substrat abgeschieden werden, fehlt diese Möglichkeit bislang im Fall des GaN, so dass die Bauelemente auf einem Fremdsupstrat (z.B. Al_2O_3 oder SiC) hergestellt werden müssen. Dadurch können die material-spezifischen Vorteile von GaN nur zum Teil ausgenutzt werden. Eine klassische Schmelzzuchtung von GaN-Kristallen ist aufgrund des hohen Schmelzpunktes und des hohen Dampfdrucks nicht möglich. Heute werden deshalb weltweit große Anstrengungen unternommen, um GaN-Substrate aus der Gasphase nach dem sogenannten HVPE-Verfahren (Hydride Vapor Phase Epitaxy) zu kristallisieren. Mit dieser Methode können mittlerweile Substrate mit einem Durchmesser von 50 mm und einer Dicke von einigen zehntel Millimetern hergestellt werden.

Die Forscher des IISB setzen auf ein anderes Verfahren, das sogenannte LPSG-Verfahren (Low-Pressure Solution Growth). Bei der Erlanger Technologie wird unter Umgebungsdruck Stick-

stoff, der aus der Gasphase in Form von Ammoniak angeboten wird, in einer zwischen 800 °C und 1000 °C heißen Galliumhaltigen Schmelze gelöst und kontrolliert zu GaN auskristallisiert. Der Vorteil der Erlanger Technologie liegt darin, dass näher am thermodynamischen Gleichgewicht gearbeitet wird und deshalb geringere Defektdichten zu erwarten sind. Außerdem dürften die Kosten der IISB-Technologie etwa um den Faktor 10 geringer sein als beim HVPE-Verfahren. Den Wissenschaftlern vom IISB ist es bereits gelungen, optisch klares GaN-Material herzustellen, mit Defektdichten die deutlich unter den Werten von vergleichbarem HVPE-Material liegen. Diese Technologie wird das IISB weiter vorantreiben, sodass sich daraus ein industrielles Produktionsverfahren für defektarme GaN-Substrate entwickeln kann.

Zukunftsthema – Detektor-kristalle für die Medizintechnik

Die medizinische Diagnostik durch bildgebende Röntgen- und nuklearmedizinische Verfahren hat sich wegen ihres breiten Einsatzbereiches und hohen Entwicklungspotentials zu einem

wirtschaftlich äußerst interessanten Bereich für den Hightech-Technologie-Standort Bayern und hier insbesondere für den Raum Erlangen-Nürnberg („Medical Valley“) entwickelt. Eine noch schonendere und risikoärmere Behandlung des Patienten und eine noch genauere Diagnose durch den Arzt erfordern eine Beschleunigung der bildgebenden Verfahren mit höherer Ortsauflösung und besserer Bildqualität. Dies kann nur durch eine Verbesserung aller Komponenten der gesamten Detektoreinheit erreicht werden. Eine solche Detektoreinheit besteht im Wesentlichen aus dem „Frontend“, einem Szintillatorkristall, mit dem die Strahlung erfasst wird, und aus dem „Backend“, der Auswertelektronik, mit der das Bild rekonstruiert wird. Das IISB plant gemeinsam mit der ortsansässigen Industrie, innovative Verfahren zur Herstellung von neuartigen Szintillatorkristallen mit verbesserten Eigenschaften zu entwickeln.

Zukunftsthema – Raumfahrt „Houston, wir haben kein Problem“

So könnte künftig die Meldung der Astronauten von der Internationalen Raumstation ISS an das

Kontrollzentrum am Boden lauten, wenn es um materialwissenschaftliche Experimente geht. Die Europäische Raumfahrtagentur ESA baut auf ein Softwarepaket des IISB, um Erstarrungsexperimente im Bereich Metallurgie und Halbleiterkristallzüchtung auf der Raumstation zu unterstützen. Mehrere europäische Forschergruppen werden dabei auf der Raumstation für ihre Erstarrungsexperimente das so genannte Material Science Laboratory (MSL) der ESA nutzen können. Das MSL wird über verschiedene Ofenmodule zur Prozessierung von Proben verfügen. Das IISB hat Computermodelle für diese Ofenmodule entwickelt. Mit diesem „Virtuellen MSL“ können die geplanten Experimente dann besser vorbereitet werden. Das IISB beabsichtigt, für die Europäischen Forschergruppen die zentrale Anlaufstelle zu sein, um mit dem virtuellen MSL im Vorfeld der Experimente beispielsweise die Prozessführung für ein gewünschtes Temperaturfeld in der Probe auf dem Computer zu optimieren. Das IISB kann sich bei diesen Raumfahrtaktivitäten neben seiner großen Erfahrung in der Computersimulation vor allem auch auf die langjährigen Erfahrungen in der Durchführung eigener Weltraumexperimente bei 3 Space-labmissionen (1. Spacelabmission, D1, D2) sowie zahlreichen Raketenmissionen (TEXUS 10, 20, 24, 41, MAXUS 1B) stützen.

Schlusswort

Die Abteilung Kristallzüchtung hat zwar nur die zweite Hälfte des 20-jährigen Bestehens des IISB aktiv mitgestaltet, fühlt sich jedoch als fester aktiver Bestandteil mit einem großen Entwicklungspotential in zukunftsreichen Geschäftsfeldern, die in der Fraunhofer-Gesellschaft ein Alleinstellungsmerkmal haben.



Im Weltraum (Spacelab Mission D2, 1993, links) und auf der Erde (rechts) gezüchteter GaAs-Kristall. Bei dem Kristall links handelt es sich wohl um den teuersten Kristall, der mit Erlanger Beteiligung jemals gezüchtet wurde.

**Abteilung
Leistungselektronische
Systeme**

**5 Jahre Leistungselektronik
am Fraunhofer IISB**

Dr. Martin März

Am 1. April 2000 nahm die jüngste unserer Abteilungen „Leistungselektronische Systeme“ ihre Arbeit auf. Mit dem neuen Arbeitsgebiet kamen auch neue Mitarbeiter an das IISB, und etwas exotisch waren die Neuen zunächst schon. Sie arbeiteten mit Leiterplatten und LötKolben in – zumindest nach den Maßstäben der Technologen – staubigen Laborräumen und hatten von halbleitertechnologischen Prozessen und Problemen nur wenig Ahnung. Und so mag so manchem die Einrichtung eines Geschäftsfelds Leistungselektronik und Mechatronik an dem bis dato ausschließlich halbleitertechnologisch orientierten Institut zunächst tatsächlich wie ein Aprilscherz erschienen sein. Doch mit seiner Anwendungsorientierung ergänzte die neue Abteilung die am IISB bereits bestehenden Aktivitäten im Bereich der Technologie- und Prozess-Entwicklung für Leistungshalbleiterbauelemente in hervorragender Weise, und schon bald begann man, wechselseitig von den Kompetenzen der anderen zu profitieren.

Die Vorgeschichte der Abteilung reicht zurück in die Jahre 1996/97. In dieser Zeit erstellte der Fraunhofer-Verbund Mikroelektronik zusammen mit Prof. Ryssel, Dr. Frey und Experten aus der Industrie ein Strategiepapier zur Leistungselektronik in der FhG. Daraus entstand, unter Mitwirkung von Dr. Leo Lorenz vom Siemens-Bereich Halbleiter (später Infineon AG), ein Konzept für ein „Kompetenzzentrum für leistungselektronische Systemlösungen“ am IISB in Erlangen.

Die Möglichkeit zur Umsetzung dieses Konzepts eröffnete sich mit der Beteiligung des IISB am Bayerischen Kompetenznetzwerk für Mechatronik (BKM), einem aus der HighTech-Offensive Zukunft Bayern geförderten Großprojekt. An diesem Vorhaben mit einer Laufzeit von fünf Jahren konnte das IISB mit mehreren Teilprojekten mit teils technologischer teils systemtechnischer Ausrichtung partizipieren. Die systemtechnischen Projekte mit einem Gesamtumfang von rund 4,5 Mio. Euro für Personal und Investitionen ermöglichten einen finanziell gesicherten Start der Abteilung und damit den Aufbau des Geschäftsfelds Leistungselektronik und Mechatronik als weiteres Standbein des Instituts. Einen wesentlichen Anteil am Erfolg dieses Vorhabens hatte das vom Freistaat Bayern zugestandene Finanzierungsmodell. Danach waren zwar erhebliche, im vorgenannten Betrag enthaltene Industriemittel zur Kofinanzierung einzuwerben, aber ohne die Notwendigkeit einer detaillierten Festlegung der einzelnen Industriepartner bereits vor Beginn des Projekts. Dies eröffnete die Möglichkeit viele, speziell auch kleine und mittelständische Unternehmen phasenweise in die

Projekte mit aufzunehmen. Ausgestattet mit dieser Flexibilität konnte in kurzer Zeit ein großer Kundenkreis angesprochen und erschlossen werden. Rückblickend betrachtet hat sich diese Art der Projektförderung als außerordentlich effizient und nutzbringend für alle Beteiligten erwiesen und sollte zu einem allgemeinen Modell staatlicher FuE-Förderung weiterentwickelt werden.

Noch im Jahr 2000 konnten neben der Abteilungsleitung zwei weitere Mitarbeiter mit langjähriger einschlägiger Industrieerfahrung gewonnen werden. Ohne diese Fachkompetenz „von außen“ wäre das Vorhaben einer systemtechnisch orientierten, sehr anwendungsnah agierenden Abteilung sicher zum Scheitern verurteilt gewesen.

Ein weiterer Erfolgsfaktor war zweifellos der Standort im Großraum Nürnberg. Hier findet sich ein – selbst im weltweiten Vergleich – einzigartiger Cluster der Leistungselektronik. Mehr als 300 Firmen der Region sind in den Bereichen Energieerzeugung und -verteilung, Verkehrstechnik, Antriebs- und Automatisierungstechnik, Haushalts- und Consumerlektronik, Medizintechnik sowie in der Entwicklung und Produktion von Leistungsbauele-



Bild 1: Leistungselektronik und Mechatronik am Fraunhofer IISB

menten und Stromversorgungen tätig. Mehr als 12 000 Arbeitsplätze sind direkt, rund 60 000 indirekt mit der Leistungselektronik verknüpft. Daneben ist Nürnberg auch Sitz der wichtigsten einschlägigen Fachmessen.

Es war deshalb beim Aufbau des Geschäftsfelds Leistungselektronik und Mechatronik besonders wichtig, frühzeitig eine enge Vernetzung mit der Region zu erreichen. Das Fachsymposium „Entwicklungstrends in der Leistungselektronik und Mechatronik“ anlässlich der 15-Jahr-Feier des IISB im Oktober 2000 bot eine erste Gelegenheit, die neuen Aktivitäten des IISB einem breiteren Publikum vorzustellen. Zu dieser Zeit gab es im Bereich der Leistungselektronik auf regionaler Ebene noch keinerlei Vernetzungsstrukturen. Um das zu ändern, wurde auf Initiative der IHK Nürnberg für Mittelfranken, der Stadt Nürnberg und des IISB das Unternehmensnetzwerk Leistungselektronik (NICE) ins Leben gerufen. Nach kurzer Zeit umfasste das Netzwerk bereits rund 50 Unternehmen. Auf einer gemeinsamen Internet-Plattform konnten sich die Mitglieder kostenlos präsentieren. Für viele Kleinunternehmen war das der erste Internetauftritt überhaupt. Neben einem umfangreichen Kompetenzatlas bot das Internetportal auch eine Kooperationsbörse, die das Zusammenfinden von Kooperationsangeboten und -nachfragen unterstützte. Da das Netzwerk von den drei Initiatoren aber nicht dauerhaft finanziert werden konnte, war die Überführung in den Geschäftsbereich Leistungselektronik des 2001 gegründeten Vereins EnergieRegion Nürnberg e.V. ein wichtiger Meilenstein. Das IISB ist Mitglied in diesem Verein und kooperiert eng im Rahmen gemeinsamer Veranstaltungen, Weiterbildungsmaßnahmen und FuE-Projekte.

Der nächste, erheblich schwierigere Schritt war der Aufbau einer Vernetzung auf europäischer Ebene. Die Initiative dazu ging erneut von Dr. Leo Lorenz, einem Grandseigneur der Leistungselektronik, aus. Ein dreiköpfiges Kernteam bestehend aus Dr. Lorenz, Dr. Heilbronner (Semikron) und Dr. März (IISB) erarbeitete im Jahr 2002 ein Konzept für ein europäisches Leistungselektronik-Netzwerk in Anlehnung an das amerikanische Vorbild CPES. Nach einer erfolgreichen Informations- und Sondierungsveranstaltung im Dezember 2002 mit sehr positivem Feedback von Seiten der anwesenden Industrievertreter konnte mit der Umsetzung der Pläne begonnen werden. Bereits am 17. April 2003 wurde das ECPE, das spätere „European Center for Power Electronics“, in Form eines Vereins und einer GmbH gegründet. Am 1. Oktober nahm die Geschäftsstelle am energietechnologischen Zentrum (etz) in Nürnberg ihre Arbeit auf. Bis Ende 2004 waren 14 führende Unternehmen der Leistungselektronik aus 5 europäischen Ländern dem Verein beigetreten. Ziele des ECPE sind die Förderung der Aus- und Weiterbildung auf dem Gebiet der Leistungselektronik, Lobbyarbeit für die Leistungselektronik und gemeinsame vorwettbewerbliche Forschung. Für die Durchführung der Forschung werden Projekte an ausgewählte europäische Forschungseinrichtungen vergeben. Für den Be-

reich Fahrzeugelektronik konnte sich das IISB zum „Competence Center Automotive“ des ECPE qualifizieren. Erste gemeinsame FuE-Projekte wurden noch 2003 gestartet. Neben dem Aufbau externer Kooperationen konnte auch die Vernetzung mit anderen Fraunhofer-Instituten voran gebracht werden: Seit 2004 ist das IISB Mitglied im Fraunhofer-Themenverbund Energie und bringt hier seine Systemkompetenz im Bereich der Leistungselektronik ein. Die Leistungselektronik ist aufgrund ihrer originären Funktion der Schlüssel für Maßnahmen zur Einsparung elektrischer Energie. Große Einsparpotentiale liegen dabei sowohl in der bedarfsgerechten Bereitstellung elektrischer Energie wie auch in der Effizienz der Energieumwandlung.

Des Weiteren konnte 2004 eine wirtschaftsorientierte strategische Allianz (WISA) zwischen vier Fraunhofer Instituten – dem AIS, IISB, IMS und ISE – auf den Weg gebracht werden. Ziel dieser Allianz ist die Bündelung der Aktivitäten auf dem Gebiet hochkompakter und effizienter elektrischer Leistungswandler. Ein gemeinsames zweijähriges Projekt zur Entwicklung von Basistechnologien für kompakte und effiziente Wandler einschließlich entsprechender Demonstratoren wurde von der FhG bewilligt. Ziel des IISB im Rahmen dieses Projektes ist es, unter dem Motto „100 kW im



Bild 2: Stets ein Publikumsmagnet auf der PCIM – der Messestand des Fraunhofer IISB

Notebook-Format“ in einen neuen Leistungsdichtebereich für Hochspannungs-DC/DC-Wandler vorzustoßen.

Zu einem zentralen Marketinginstrument der Abteilung hat sich die Präsenz auf den wichtigsten Fachmessen entwickelt. Seit 2001 ist das IISB regelmäßig auf der PCIM und der SPS/IPC/Drives, beide in Nürnberg, mit eigenem Stand vertreten. Mit dem Ausbau der Kfz-Elektronik-Aktivitäten wird hier sicher ein weiterer fester Termin im Jahreskreis hinzukommen.

Im Bereich der Weiterbildung wurde 2003 unter dem Markenzeichen „peak-Seminars“ eine Seminarreihe gestartet, die sich mit meist eintägigen Intensivkursen zu ausgewählte Themen der Leistungselektronik an Entwickler aus diesem Bereich wendet. Die Resonanz auf dieses Angebot hat alle Erwartungen übertroffen – so übersteigt teilweise die Länge der Warteliste die der Teilnehmerliste. Diese Resonanz und das positive Feedback der Teilnehmer sind uns Ansporn, das Programmangebot weiter auszubauen.

Zentrum für Kfz-Leistungselektronik und Mechatronik

Vom Start weg besonders erfreulich entwickelte sich der Bereich der Kfz-Leistungselektronik. Hier konnte eine branchenweit anerkannte Kompetenz im Bereich der mechatronischen Integration leistungselektronischer Systeme aufgebaut werden. Dies mündete in eine Reihe von Kooperationen mit führenden europäischen



Bild 3: Das ZKLM im etz-Nürnberg, erste Außenstelle des Fraunhofer IISB

Automobilherstellern und Zulieferern. Bereits 2001, zu einer Zeit als noch alle Welt vom 42-V-Bordnetz sprach, setzte die Abteilung auf Hochspannungssysteme, die den Weg in Richtung hybrider Antriebskonzepte eröffnen. Nur zwei Jahre später, als die erfolgreiche Markteinführung von Hybrid-Fahrzeugen durch japanische Hersteller die Automobilbranche weltweit unter Zugzwang brachte, zeigte sich die Richtigkeit dieser Entscheidung.

Die positiven Perspektiven führten 2003 zu dem Plan, die Kfz-Aktivitäten zu einem „Kompetenzzentrum für Kraftfahrzeug-Leistungselektronik“ auszubauen. Das entsprechende Konzeptpapier stieß auf große Unterstützung seitens des Freistaats Bayern und der Stadt Nürnberg. In weniger als einem Jahr konnte das Projekt in die Tat umgesetzt werden. Anfang September 2004 nahm das „Zentrum für Kfz-Leistungselektronik und Mechatronik“ (ZKLM) als Außenstelle des IISB am Standort Nürnberg seine Arbeit auf. Derzeit stehen gut 300 m² an Büro- und Laborflächen zur Verfügung. Der Etat des ZKLM umfasst bis zum Jahr 2008 rund 6 Mio. Euro. Gut die Hälfte davon bringen die Industrie und das IISB auf, den Rest trägt der Freistaat Bayern

mit Mitteln aus der EU-Ziel-2 Förderung. In den kommenden Jahren ist ein personeller Aufbau auf 16 Ingenieure plus Techniker und wissenschaftliche Hilfskräfte geplant.

Aufgabe der Einrichtung ist die Entwicklung leistungselektronischer Komponenten für die Kraftfahrzeuge von morgen. Schlüsselkomponenten für den breiten Einsatz von Hybrid- oder Brennstoffzellenfahrzeuge sind dabei sowohl leistungsstarke Elektromotoren, die aber künftig zusammen mit der erforderlichen Leistungselektronik mechatronisch in den Antriebsstrang integriert sein müssen, als auch Spannungswandler mit hoher Leistung und geringem Bauvolumen (Bild 4). Auf beiden Anwendungsfeldern machen die extremen Anforderungen der Automobiltechnik bezüglich Kosten, Betriebstemperaturbereich, Zuverlässigkeit, Leistungsdichte und Gewicht noch große Forschungs- und Entwicklungsanstrengungen erforderlich. Viele klassische Lösungen der Leistungselektronik sind hier nicht übertragbar. Zwar sind bereits erste Serienfahrzeuge im Einsatz. Der Integrationsgrad der Leistungselektronik ist bei diesen aber noch recht niedrig, sodass die Elektronik sehr viel Bauraum benötigt. Dies erschwert den

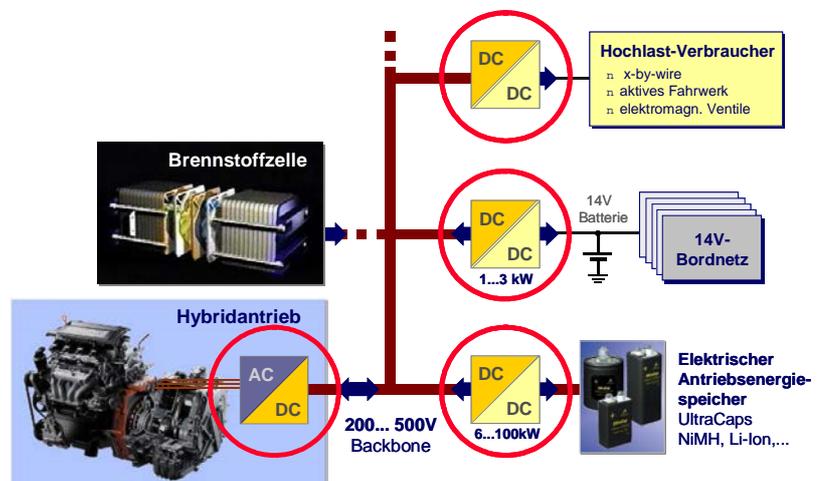


Bild 4: Arbeitsschwerpunkte am Zentrum für Kfz-Leistungselektronik und Mechatronik

Einsatz in nicht speziell dafür konstruierten Fahrzeugen. Zudem führt die Trennung der Teilsysteme zu erhöhten Kosten in Form von zusätzlichen Gehäusen, Kabeln und Steckern.

Die Forschungsarbeiten am ZKLM konzentrieren sich deshalb u.a. auf neuartige Lösungen für die mechatronische 3D-Integration von Leistungselektronik in komplexe Bauräume unter besonderer Berücksichtigung der Aspekte Zuverlässigkeit, Fertigbarkeit und Testbarkeit. In diesem Sinn bedeutet „mechatronische Integration“ das Verschmelzen von elektrischer und mechanischer Funktionalität in einzelnen Komponenten. Eine der zentralen Herausforderungen ist dabei die Integration der heute noch besonders sperrigen passiven Bauelemente für Zwischenkreiskapazität und EMV-Filter. Ansätze für Innovationen liegen hier z.B. im Einsatz neuer Materialien, wie funktional gefüllter Kunststoffe, in multifunktionaler Integration und in der Anwendung neuer Fertigungsverfahren. Diese Entwicklungen erfordern eine sehr enge Zusammenarbeit von Spezialisten der Elektrotechnik, des Maschinenbaus und der Werkstoffwissenschaften.

Ein entsprechendes Team am ZKLM hat sich ein besonders ehrgeiziges Ziel gesetzt: Die Integration eines Elektromotors für einen Hybridantrieb mit einer

Leistung von einigen zehn Kilowatt zusammen mit dem Frequenzumrichter direkt in die Getriebeglocke eines PKW. Der optimalen Bauraumausnutzung stehen hier extreme Belastungen für die Leistungselektronik im Hinblick auf Temperatur, Temperaturwechsel und Vibrationen gegenüber. So herrscht in dem verfügbaren Bauraum für die Elektronik eine Umgebungstemperatur von bis zu 140 °C und für die Entwärmung steht nur der Fahrzeugkühlkreislauf mit einer maximalen Vorlauftemperatur von 105 °C zur Verfügung. Bild 5 zeigt den ersten, zusammen mit DaimlerChrysler entwickelten Prototypen. Obwohl das Bauvolumen dieses Umrichters der ersten Generation nur 1,5 Liter beträgt, ist er in der Lage, eine Scheinleistung von 90 kVA zu liefern, was einer rekordverdächtigen Leistungsdichte von 60 kW/dm³ entspricht. Derzeit befindet sich am ZKLM die im Auftrag des ECPE entwickelte 2. Generation an motorintegrierten Umrichtern in der Erprobungsphase und die 3. Generation bereits in der Konzeptphase.

Eine zweite Arbeitsgruppe am ZKLM befasst sich mit der Entwicklung von hocheffizienten und kompakten Spannungswandlern. Diese werden benötigt, um z.B. hochkapazitive Doppelschichtkondensatoren (sog. UltraCaps) als leistungsfähige und zyklenfeste elektrische

Energiespeicher nutzen zu können, Energie zwischen unterschiedlichen Kfz-Bordnetzebenen auszutauschen oder um eine in ihrer Spannung „weiche“ und regelungstechnisch träge Brennstoffzelle zu stützen. Auch hier gilt die Forderung nach höchsten Leistungsdichten. Dies erfordert neue Ansätze in den Bereichen Schaltungstopologien, Aufbautechniken und Entwärmung. In dem für zukünftige Fahrzeuge besonders wichtigen Spannungsbereich oberhalb von 150 V stoßen Silicium-Leistungsbaulemente bezüglich ihrer statischen und dynamischen Eigenschaften an harte physikalische Grenzen. Diese sollen durch den Einsatz von Siliciumcarbid-Leistungsbaulementen überwunden werden, was uns erlauben wird, in neue Leistungsdichtedimensionen vorzustoßen.

Ausblick

Die Fortschritte in der Leistungselektronik werden in immer geringerem Maß durch die Entwicklungen auf der Silicium-Ebene bestimmt. Die entscheidenden Hebel liegen vielmehr an den Berührstellen der Disziplinen Elektrotechnik, Werkstoffwissenschaften, Maschinenbau und Fertigungstechnik. In diese Richtung wird sich auch die Abteilung verstärkt orientieren.

Technologietreiber ist heute zweifellos die Automobiltechnik. Die dort erarbeiteten Innovationen werden aber auch völlig neue Lösungen im Bereich der industriellen Antriebstechnik und der Robotik, speziell der Service-Robotik, ermöglichen. Wir sind überzeugt, mit unseren Lösungen künftig auch diese Bereiche mitgestalten zu können.

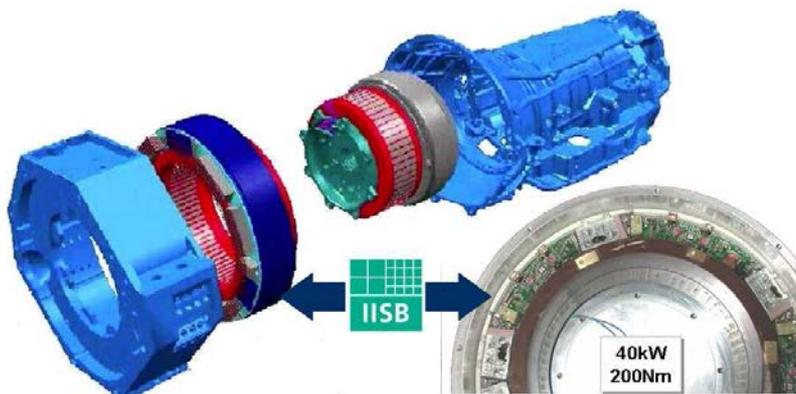


Bild 5: In den Antriebsstrang integrierter Hochleistungsumrichter

5. Programm der Festveranstaltungen am 30. Juni und 1. Juli 2005

30. Juni 2005

Fraunhofer IIS (Nachmittagsveranstaltung) Fraunhofer IISB (Abendveranstaltung)

14:00 Uhr Eintreffen der Gäste am Fraunhofer IIS

14:30 Uhr Begrüßung
Prof. Heinz Gerhäuser, Institutsleiter des Fraunhofer IIS

Prof. Hans-Jörg Bullinger, Präsident der Fraunhofer Gesellschaft
Perspektiven für Zukunftsmärkte – Mit Fraunhofer heute für morgen

Dr. Günther Beckstein, Stellv. des Bayerischen Ministerpräsidenten und Staatsminister des Inneren
Fraunhofer-Institute – ein wichtiger Standortfaktor für das High-Tech-Land Bayern

Musikalischer Beitrag

Grußworte

Prof. Frieder Meyer-Krahmer, Staatssekretär des Bundesministeriums für Bildung und Forschung
Prof. Karl-Dieter Gröske, Rektor der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg
Günter Baumüller, Vizepräsident der IHK Nürnberg für Mittelfranken
Dr. Siegfried Balleis, Oberbürgermeister der Stadt Erlangen

16:15 – 16:45 Uhr Kaffeepause

20 Jahre Fraunhofer-Institute in Erlangen – Erfolgsgeschichte und Zukunftsvisionen
Prof. Heiner Ryssel, Institutsleiter des Fraunhofer IISB
Prof. Heinz Gerhäuser, Institutsleiter des Fraunhofer IIS

Gegen 18:00 Uhr Ende der Veranstaltung am Fraunhofer IIS

19:00 Uhr Eintreffen der Gäste am Fraunhofer IISB

19:30 Uhr Begrüßung / Prof. Heiner Ryssel, Fraunhofer IISB

Sie erwartet ein unterhaltsames Programm. Lassen Sie sich überraschen. Für Ihr leibliches Wohl ist mit einem vielseitigen Buffet gesorgt. Fränkische Volksmusik begleitet uns durch den Abend.

Durch das Programm führt Prof. Heiner Ryssel. Feiern Sie mit uns!

Gegen 23:00 Uhr Ausklang der Jubiläumsfeier

1. Juli 2005

Festsymposium am Fraunhofer IISB

Technologies for Electronics – Micro, Nano, and More

- 9:00 a.m. Begrüßung / Welcome
Heiner Ryssel, Fraunhofer IISB
- 9:20 a.m. 20 Years of Process Simulation – from ICECREM to 3D Simulation
Jürgen Lorenz, Fraunhofer IISB
- 9:45 a.m. IISB Erlangen and TU Wien – A Glimpse of Cooperative Achievements
Siegfried Selberherr, TU Wien
- 10:15 a.m. From Lab to Fab – Partnering for Manufacturing Equipment
Lothar Pfitzner, Fraunhofer IISB
- 10:40 a.m. Kaffeepause / Coffee Break
- 11:10 a.m. Reinforcing the Long-term Cooperation between Fraunhofer and CEA Leti
Michel Brillouet, CEA/Leti
- 11:40 a.m. On the Challenges of Nanoelectronics
Lothar Frey, Fraunhofer IISB
- 12:05 p.m. A Little History and a Lot about the Future of Nanoelectronics Research in Europe
Gilbert Declerck, IMEC
- 12:35 p.m. Mittagessen / Lunch
- 2:00 p.m. Single Crystal Growth – a Challenge for Science and Technology
Jochen Friedrich, Fraunhofer IISB
- 2:25 p.m. Science in Space
Ulf Merbold, ESA
- 2:55 p.m. System Integration – the Future of Power Electronics
Martin März, Fraunhofer IISB
- 3:20 p.m. Kaffeepause / Coffee Break
- 3:45 p.m. 20 Year of Power Electronics – from GTO Thyristors to Silicon Carbide Devices
Eric Baudelot, Siemens AG
- 4:15 p.m. Ehrung der Jubilare des Fraunhofer IISB / Honoring of Fraunhofer IISB Anniversary Staff
Heiner Ryssel, Fraunhofer IISB
- 4:40 p.m. Abschlussworte / Closing Words
Heiner Ryssel, Fraunhofer IISB
- 5:00 p.m. Empfang mit kleinem Imbiss / Reception / Führungen nach individueller Vereinbarung /
Guided Tours on Demand