

LEHRSTUHL FÜR ELEKTRONISCHE BAUELEMENTE

Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

Jahresbericht 2001



TECHNISCHE FAKULTÄT
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg



Lehrstuhl für Elektronische Bauelemente
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg
Cauerstr. 6
91058 Erlangen

Tel.: ++49 / (0)9131 / 85-28634

Tel.: ++49 / (0)9131 / 85-28698

email: info@leb.eei.uni-erlangen.de

WWW: <http://www.e-technik.uni-erlangen.de>

IMPRESSUM

Redaktion

Michael Jank
Mathias Rommel
Heiner Ryssel

Gestaltung, Satz und Realisierung

Michael Jank

© Lehrstuhl für Elektronische Bauelemente 2002

Alle Rechte, insbesondere das Recht der Vervielfältigung und Verbreitung sowie der Übersetzung, sind vorbehalten. Kein Teil dieses Werkes darf in irgendeiner Form (durch Fotokopie, Mikrofilm oder ein anderes Verfahren) ohne schriftliche Genehmigung des Institutes reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme gespeichert, verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden

Inhalt

1. Grußwort.....	1
2. Mitarbeiter und Ausstattung.....	2
2.1. Mitarbeiter.....	2
2.2. Lehrbeauftragte.....	3
2.3. Gastwissenschaftler.....	3
2.4. Studentische und wissenschaftliche Hilfskräfte.....	3
2.5. Mitarbeit in Gremien und Mitgliedschaften.....	4
2.6. Pressemeldung zum sechzigsten Geburtstag von Professor Heiner Ryssel.....	5
2.7. Ausstattung.....	6
3. Veranstaltungen und wissenschaftliche Beiträge.....	9
3.1. Veranstaltungen unter Mitwirkung des LEB.....	9
3.1.1. Europäische Konferenz über Festkörper-Bauelemente (31 st European Solid-State Device Research Conference / ESSDERC 2001).....	9
3.1.2. Festkolloquium zum sechzigsten Geburtstag von Professor Heiner Ryssel.....	10
3.1.3. Kolloquium zur Halbleitertechnologie und Messtechnik.....	10
3.1.4. Schülerinformationstag des Instituts für Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik.....	11
3.1.5. Praktikum "Mädchen und Technik".....	11
3.2. Wissenschaftliche Beiträge der LEB-Mitarbeiter.....	12
3.2.1. Bücher und Buchbeiträge.....	12
3.2.2. Wissenschaftliche Beiträge zu Zeitschriften, Tagungen und Vortragsreihen.....	12
4. Lehrveranstaltungen.....	15
4.1. Lehrveranstaltung des Grundstudiums.....	15
4.2. Pflichtfächer der Studienrichtungen.....	15
4.3. Wahlpflichtfächer.....	16
4.4. Wahllehrveranstaltungen.....	18
4.5. Praktika.....	19
4.6. Seminare.....	20
4.7. Exkursionen.....	21
4.8. Technologisches Blockpraktikum der Fachhochschule Aschaffenburg am LEB.....	22

5. Arbeiten im Rahmen der Ausbildung von Studenten und Mitarbeitern	23
5.1. Studienarbeiten	23
5.1.1. Modellierung der Ladungsträgerrekombination in bordotiertem Silicium bei Eisenkontamination	23
5.1.2. Elektrische Charakterisierung von MOCVD Titandioxidschichten auf der Basis neuartiger Precursoren	24
5.2. Diplomarbeiten	24
5.2.1. Herstellung und Charakterisierung von BPSG-Schichten für die Mikroelektronik mit neuartigen Precursoren	24
5.3. Promotionen	26
5.3.1. Untersuchung von Punktdefekten in Silicium mit Hilfe der Platindiffusion	26
6. Forschung	30
6.1. Arbeitsgebiete	30
6.1.1. Prozesstechnik	30
6.1.2. Mikrosystemtechnik	30
6.1.3. Leistungshalbleiter-Bauelemente, Smart-Power IC-Technologien	30
6.1.4. Technologie- und Bauelementesimulation	31
6.1.5. Halbleiterfertigung	31
6.1.6. Leistungselektronische Systeme	31
6.2. Beispiele aus der Forschung	32
6.2.1. Untersuchung des Aktivierungs- und Diffusionsverhaltens von Bor in polykristallinen SiGe-Gate-Elektroden für MOS-Transistoren	32
6.2.2. Diffusion von Aluminium im Silicium-Siliciumdioxid-System und Wechselwirkung von Aluminium mit Sauerstoff	33
6.2.3. CVD-Prozesse mit neuartigen metallorganischen Precursoren zur Herstellung von hoch- ϵ Gatedielektrika und metallischen Gateelektroden zukünftiger CMOS-Generationen	35
6.2.4. FOROB II: Chemische Dampfphasenabscheidung von Schichten hoher Dielektrizitätskonstanten am Beispiel Barium-Strontium-Titanat	39
6.2.5. Grundlagen der Hochvoltbauelemente in Smart-Power IC-Technologien für zukünftige Kfz-Anwendungen	41
6.3. Geförderte Forschungsvorhaben	43
7. So finden Sie zu uns	44

1. Grußwort

Vor Ihnen liegt der fünfte Jahresbericht des Lehrstuhls für Elektronische Bauelemente. Die Themen des Lehrstuhls gehen wie bisher schon von der Entwicklung neuer Prozessverfahren über die Gerätetechnik und die Chipfertigung bis hin zu der Entwicklung von Software für die Geräte- und Prozesssimulation und der Entwicklung von neuen Halbleiterbauelementen und Mikrosystemen. Seit der Berufung von Prof. Stoisiek kam 1999 das neue Arbeitsgebiet Leistungselektronik zu den bisherigen Schwerpunkten hinzu. Die Arbeitsthemen decken damit in relativ großer Breite die technologischen Aspekte der Mikroelektronik ab. Im vorliegenden Bericht sind einige Beispiele von durchgeführten Arbeiten wiedergegeben. Weitere Beispiele der Aktivitäten des Lehrstuhls sind auch im Internet unter <http://www.leb.e-technik.uni-erlangen.de> zu finden.

Mit seiner Technologiehalle hat der Lehrstuhl in Deutschland einmalige experimentelle Möglichkeiten, aber nur Dank der Kooperation mit der FhG ist es möglich, das Laborgebäude in Betrieb zu halten, da der Lehrstuhl für solche personell intensiven Aktivitäten nicht ausreichend ausgestattet ist. Der Lehrstuhl verfügt gegenwärtig über 17 Stellen aus dem Staatshaushalt, davon sind 4 Stellen dem Reinraum zugewiesen, und 7 Stellen aus Drittmitteln. Der Sachhaushalt für das Jahr 2001 betrug 121.930,-DM (Staatshaushalt) und 1.481.902,- DM (Projektmittel). Neu in den Reinraum integriert wurde eine Trockenätzanlage für tiefe Gräben und ein automatisches Belackungs- und Entwicklungsgerät sowie eine RTP-Anlage für SiC.

Seit dem Wintersemester 1999/2000 studieren die Studenten der Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik nach der neuen Prüfungsordnung mit studienbegleitenden Prüfungen. Die ersten Studenten haben erfolgreich das Vordiplom abgelegt und haben mit dem Hauptstudium begonnen. Für diese Reform haben sich der ganze Lehrstuhl und seine Mitarbeiter eingesetzt und es sieht so aus, als ob die Reformziele, das Studium zu beschleunigen und attraktiver zu machen, erreicht werden können. Der Lehrstuhl hat sich weiterhin stark beim Aufbau des neuen Studiengangs Mechatronik engagiert, der gemeinsam von dem Institut für Maschinenbau und Fertigungstechnik sowie dem Institut für Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik getragen wird.

Bereits zum zweiten Male konnte ein Blockpraktikum für Studenten der FH Aschaffenburg durchgeführt werden. In Zukunft soll der Reinraum verstärkt extern angeboten werden.

Bei der Entwicklung des Lehrstuhls war der Einsatz und der Ideenreichtum meiner ehemaligen und gegenwärtigen Mitarbeiter unverzichtbar; ich bin ihnen zu großem Dank verpflichtet.

Erlangen, den 25.03.2002



Prof. Dr.-Ing. Heiner Ryssel

2. Mitarbeiter und Ausstattung

2.1. Mitarbeiter

Lehrstuhlinhaber

Prof. Dr.-Ing. Heiner Ryssel

Professur Elektronische Bauelemente

Prof. Dr. phil. nat. Michael Stoisiek

Leistungshalbleiterbauelemente

Akademischer Oberrat

Dr. rer. nat. Lothar Frey

Messtechnik / Ionenstrahltechniken

Wissenschaftliche Mitarbeiter

Dipl.-Ing. Volker Häublein

Ionenimplantation (bis 12/01)

Dipl.-Ing. Michael Jank

Bauelemente / Prozessintegration

Dipl.-Phys. Oliver Krause

Diffusion

Dipl.-Ing. Ralf Kühnhold

Bauelemente / Mikrosystemtechnik

Dipl.-Phys. Trixi Leistner

Schichtabscheidung / Ferroelektrika

Dipl.-Ing. Martin Lemberger

Schichtabscheidung (ab 03/01)

Dipl.-Ing. Mathias Rommel

Lebensdauermesstechnik (bis 12/01)

Dipl.-Ing. Roland Weiß

Siliciumkarbid-Bauelemente

Dipl.-Chem. Nedyu Nedev Yassenov

Mikrosystemtechnik

Technische Mitarbeiter / Verwaltung

Diana Arnold

Verwaltung / Sekretariat

Sieglinde Elsesser

Photolithographie / Nasschemie (ab 09/01)

Judit Gabler

Dokumentation / Sekretariat

Christian Heilmann

Prozessgeräte

Dagmar Hornik

Photolithographie / Nasschemie (bis 02/01)

Angelika Jakob

Verwaltung / Sekretariat (bis 12/01)

Thomas Klauser

Rechner / Leitsysteme

Holger Kotouc

Messtechnik / Sicherheit (bis 12/01)

Sandra Löffler

Verwaltung / Sekretariat

Katharina-Luise Meziane-Bettahar

Reinigung Reinraumlabor

Anna-Maria Rehm

Reinigung Reinraumlabor

Heinrich Schier

Infrastruktur / Reinraum

Jutta Weller

Nasschemie (bis 09/01)

Lydia Wolf

Verwaltung / Sekretariat

2.2. Lehrbeauftragte

Dr.-Ing. Hans Betz	Steag Industrie AG, Essen
Dr.-Ing. Lothar Pfitzner	FhG IIS-B, Erlangen
Dr.-Ing. Wolfgang Schmutz	ACR, Automation in Cleanroom GmbH, Niedereschbach
Dr.-Ing. Dietrich Stephani	Siemens AG, Erlangen

2.3. Gastwissenschaftler

Dr. Miklos Fried; MTA Research Institute for Technical Physics and Materials Science (MTA-MFA), Budapest, Ungarn	Mikroelektronik
Dr. Tivadar Lohner; MTA Research Institute for Technical Physics and Materials Science (MTA-MFA), Budapest, Ungarn	Materialforschung, angewandte Physik
Dr. Peter Petrik; MTA Research Institute for Technical Physics and Materials Science (MTA-MFA), Budapest, Ungarn	Spektralellipsometrische Messungen an Polysiliciumschichten
Dr. Vaclav Svorcik; Chemisch-Technische Hochschule Prag, Lehrstuhl für Festkörperchemie, Tschechische Republik	Implantation in Polymere
Prof. Mikio Takai; Osaka University, Faculty of Engineering Science, Research Centre for Extreme Materials, Japan	Nachbearbeitung von Vakuum-Feldemittern und Bearbeitung von Speicherbauelementen mittels fokussierter Ionenstrahlen
Tian-Hua Zhou M.S.; Shanghai University, China	Konzipierung von integrierten Messsystemen in Halbleiterfertigungsgeräten unter Einsatz von Bussystemen

2.4. Studentische und wissenschaftliche Hilfskräfte

Im Jahr 2001 waren 6 studentische Hilfskräfte zur Unterstützung der Mitarbeiter in Forschung und Lehre beschäftigt.

Tobias Erlbacher	Programmierung von Messplätzen, Tutorium zu "Halbleiterbauelemente"
Livia Gutowski	Elektrische Messtechnik
Mattias Oberst	Programmierung 300mm Waferprober
Kai Oschmann	Dokumentation Teststrukturen / CAD
Wolfgang Tiebel	Programmierung / Visualisierung von Lehrinhalten, Skriptenherstellung, Tutorium zu "Halbleiterbauelemente"
Michael Ullrich	Programmierung / Visualisierung von Lehrinhalten, Tutorium zu "Halbleiterbauelemente"

2.5. *Mitarbeit in Gremien und Mitgliedschaften*

- Dr. rer. nat. Lothar Frey
- Mitglied in der Informationstechnischen Gesellschaft (ITG): Fachbereich 5.6.2 "Qualität und Zuverlässigkeit – Analysestrategien"
 - Mitglied in "Organizing Committee" und "Scientific Program Committee" der Konferenz ESSDERC 2001
 - Mitglied der Studienkommission Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik der Universität Erlangen-Nürnberg
 - Mitglied in der PR-Kommission der Technischen Fakultät der Universität Erlangen-Nürnberg
- Prof. Dr.-Ing. Heiner Ryssel
- Mitglied des Internationalen Komitees der Konferenz "International Conference on Ion Implantation Technology (IIT)". Die Konferenz findet alle zwei Jahre abwechselnd in Europa, den USA und Ostasien statt.
 - Conference Chairman der Konferenz "European Solid-State Device Research Conference (ESSDERC 2001)". Die Konferenz findet jährlich in einem anderen Europäischen Land statt.
 - Mitglied des Internationalen Komitees der Konferenz "Surface Modification of Metals by Ion Beams (SM²IB)". Die Konferenz findet alle zwei Jahre abwechselnd in Europa, den USA und Ostasien statt.
 - Mitglied in der Informationstechnischen Gesellschaft (ITG): Vorsitzender des Fachausschusses 8.1 "Festkörper-Technologie"
 - Mitglied der VDE/VDI-Gesellschaft für Mikroelektronik, Mikro- und Feinwerktechnik (GMM), Vorsitzender des Fachbereichs 6 "Halbleitertechnologie und –fertigung", Vorsitzender der Fachgruppe 6.2.2 "Implantation"
 - Mitglied in der Electrochemical Society
 - Mitglied in der Materials Research Society
 - Mitglied in der Böhmisches Physikalischen Gesellschaft
 - Mitglied (Fellow) im Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)
 - Mitherausgeber der Zeitschrift "Vacuum Technique and Technology", Minsk, Weißrussland
 - Mitglied des Herausgeberbeirats der Zeitschrift "Radiation Effects and Defects in Solids", Gordon and Breach Science Publishers
 - Im Rahmen der universitären Selbstverwaltung war Prof. Ryssel bis zum 31.09.2001 geschäftsführender

Vorstand des Instituts für Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik an der Technischen Fakultät der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

Mitglied des Senats der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

Mitglied des Fachbereichsrats Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik der Universität Erlangen-Nürnberg

Vorsitzender der Studienkommission Mechatronik der Universität Erlangen-Nürnberg

Mitglied der Studienkommissionen Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik sowie Maschinenbau

Prof. Dr. rer. phil. Michael Stoisiek Organisation des technischen Teils eines VDI/VDE GMM-Workshops "Stand und Perspektiven von SOI-Technologien und -Anwendungen", 17.-18. Mai 2001, München

ESSDERC 2001, Nürnberg, 11-13. September 2001, Mitglied des "Scientific Program Committee", Chairman

Mitglied der Deutschen Physikalischen Gesellschaft (DPG)

Mitglied der VDE/VDI-Gesellschaft für Mikroelektronik, Mikro- und Feinwerktechnik (GMM)

2.6. Pressemeldung zum sechzigsten Geburtstag von Professor Heiner Ryssel

(erschieden in "Fraunhofer Journal", Ausgabe 06/01 - Dr. Claus Schneider, IIS-B)

Professor Heiner Ryssel, Leiter des IIS-B, feierte am 9. Dezember seinen 60. Geburtstag. Ryssel studierte Elektrotechnik an der Technischen Universität München und promovierte 1973 auf dem Gebiet der Ionenimplantation, wo er als einer der weltweit führenden Experten gilt. Ausgangspunkt für seine Fraunhofer-Karriere war das Münchner Institut für Festkörpertechnologie. 1985 wechselte Ryssel nach Erlangen, übernahm dort den ersten bayerischen Stiftungslehrstuhl für Elektronische Bauelemente und baute den Bereich Bauelementetechnologie des neuen Instituts für Integrierte Schaltungen (IIS-B) auf.

Heiner Ryssel hat wesentlichen Anteil am Aufbau der deutschen Mikroelektronikforschung. Er war einer der Architekten des JESSI-Programms, mit dessen Hilfe Europa den Anschluss an die rasante globale Technologieentwicklung halten konnte. Forschung und Ausbildung sind ihm gleichermaßen wichtig: Fast drei Dutzend Doktoranden hat Heiner Ryssel erfolgreich zur Promotion geführt. Heiner Ryssels wissenschaftliches Wirken dokumentieren ca. 300 Veröffentlichungen, zahlreiche Patente, Mitgliedschaften und hochrangige Funktionen in internationalen Gremien und mehrere Auszeichnungen.

Das Institut und Ryssels Lehrstuhl für Elektronische Bauelemente an der Universität Erlangen-Nürnberg würdigen den Jubilar am 14. Dezember in einem international besetzten Festkolloquium mit dem Titel »From Ions to Systems: Silicon Technologies and Applications«.

2.7. Ausstattung

Im Jahr 2001 konnten Neuanschaffungen wichtiger Prozessgeräte für das von Lehrstuhl und Fraunhofer IIS-B gemeinsam genutzte Reinraumlabor abgeschlossen werden.

Eine Scheibenbelackungs- und -entwicklungsanlage erleichtert die Arbeitsabläufe in der Photolithographie erheblich. So können sowohl die bisher manuell durchgeführte Scheibenvorbehandlung und Belackung als auch die Entwicklung, Spülung und Ausheizung nach der Belichtung in Zukunft hordenweise (im "Batch"-Betrieb) vollautomatisiert ablaufen.

Die Bauelementeentwicklung, speziell auf den Gebieten "Leistungsbauelemente" und "Mikrosystemtechnik", wird in Zukunft durch eine RIE-Ätzanlage für die anisotrope Strukturierung mit hohem Aspektverhältnis unterstützt. Die damit erzielbaren tiefen Gräben in der Siliciumoberfläche lassen sich für die Herstellung vertikaler Bauelemente oder für die dielektrische Isolation von Bauelementen und Schaltungen, beispielsweise in Leistungsschaltern mit integrierter Steuerlogik, nutzen.

Die im Aufbau befindliche Fertigungslinie für Forschungsaktivitäten auf dem Gebiet der Siliciumkarbid-Bauelemente konnte um eine Hochtemperatur-RTP-Anlage zur Ausheilung der Strahlenschäden in implantierten Gebieten und Aktivierung von Dotieratomen erweitert werden.

Weitere Investitionen werden im Jahr 2002 in den Bereichen SiC-Ausheilung und -Epitaxie sowie bei Abscheide- und Plasmaätzen für die Metallisierung getätigt.

Alles in allem stehen dem Lehrstuhl etwa 600m² Reinraumfläche zur Verfügung. Die gemeinsam mit dem IIS-B betriebene Prozesstechnologie ermöglicht die Fertigung von Teststrukturen und CMOS-Bauelementen bzw. -Testschaltungen in 150mm-Technologie. Zahlreiche Anlagen der elektronischen und physikalischen Messtechnik unterstützen die Entwicklung von Bauelementen und Prozessschritten bzw. -sequenzen. Modernste analytische Verfahren zur Charakterisierung von Oberflächen, Schichten, Grenzflächen sowie Flüssigmedien und Gasen erlauben es, störende Verunreinigungen in geringsten Konzentrationen und deren Ursachen zu erkennen.

Es folgt eine Übersicht über die dem Lehrstuhl für Elektronische Bauelemente zur Verfügung stehenden Großgeräte:

Si- und SiC-Prozesstechnik

- Oxidation: Oxidationsöfen (bis zu 300 mm), RTO-Anlage, Rohrwäscher
- Dotierung: 6 Ionenimplantationsanlagen (bis zu 6 MeV), Öfen für Diffusions- und Ausheilungsschritte, RTA-Anlagen
- Schichtabscheidung: LPCVD von Standard-CMOS-Dünnschichten, MOCVD für Ferroelektrika und sensitive Schichten, Aufdampfanlage, Sputteranlagen.
- Ätzverfahren: Plasmaätzenanlage, RIE-Trockenätzter, Lackverascher, Nassätzbänke, automatische Reinigungsstationen
- Lithographie: Kontakt- (Proximity-) Belichtung, vollautomatische Horde-zu-Horde Lack- und Entwicklerstraßen
- Chipbonder (manuell, automatisch)
- Klasse 100-Reinräume für die Entwicklung, Erprobung und Qualifizierung von Halbleiterfertigungsgeräten. (MESC-kompatible Cluster-Plattform mit XPS-Messmodul, Messgeräte für Partikelmessung und Plasmadiagnose, Vertikalöfen mit *in-situ* Schichtdickenkontrolle)
- Waferbeschriftungsanlage

Elektrische Messtechnik

- I(U)- und C(U)-Messungen mit manuellen oder automatischen Waferprobern bis 300 mm Scheibendurchmesser
- Oxidladungs- und Grenzflächenladungsdichte (niederfrequente und hochfrequente C(U)-Messung)
- Stressverfahren zur Untersuchung der Zuverlässigkeit dünner dielektrischer Schichten
- Schichtwiderstandsmessung (4-Spitzen-Messplatz)
- Ladungsträger- und Beweglichkeitsprofile (Hall-Messplatz, Ausbreitungswiderstand)
- Diffusionslänge und Lebensdauer von Minoritätsladungsträgern (ELYMAT [Electrolytical Metal Analysis Tool], μ -PCD [Microwave Photoconductance Decay])
- Haftstellendichte (DLTS [Deep Level Transient Spectroscopy])
- Elektronenstrahltester zur Analyse von Halbleiterbauelementen mittels Potentialkontrastmethode
- Solarzellenmessplatz
- Schaltmessplatz zur dynamischen Charakterisierung von Leistungsbaulementen

Messung geometrischer Dimensionen

- Scheibendicke und Verbiegung (kapazitiv)
- Schichtdicken (optisch mit diversen Ellipsometern oder Interferometern, Stufenhöhen mechanisch mit Profilometer)
- Strukturbreiten bzw. -abmessungen (Rasterelektronenmikroskop, Laserrasterelektronenmikroskop)
- Transmissionselektronenmikroskop und Rasterelektronenmikroskop mit digitaler Bildverarbeitung, Probenpräparation
- Messung mechanischer Spannungen in dünnen Schichten

Analytik

- Rasterelektronenmikroskop, Energiedispersive Röntgenstrahlanalyse (EDX)
- Rasterkraftmikroskop (AFM, SSRP, SCM, TUNA)
- Feldemissions-Rasterelektronenmikroskop
- Sekundärionen-Massenspektroskopie (SIMS)
- Flugzeit-SIMS (ToF-SIMS)
- Sekundär-Neutralteilchen-Massenspektroskopie (SNMS)
- Rutherford-Rückstreuung (RBS)
- Röntgen-Photoelektronenspektroskopie (XPS)
- Atomabsorptionsspektroskopie (AAS), Gasphasenaufschluss (VPD)
- Transmissionselektronenmikroskop (TEM)
- Totalreflexions-Röntgenfluoreszenzanalyse (TXRF)
- Hochauflösendes Röntgendiffraktometer (XRD)
- Optische Emissionsspektroskopie (ICP-OES)
- UV / VIS / NIR - Spektrometer
- Magnetische Sektorfeld-Massenspektroskopie (MS-MS)
- Massenspektroskopie mit induktiv angeregtem Plasma (ICP-MS)
- Flüssigchromatographie (LC)
- Partikelmessgeräte für Flüssigkeiten und Gase und zur Qualitätsüberwachung im Reinraum
- Probenbearbeitung mit fokussierten Ionenstrahlen (FIB)
- Thermowellenanalyse (TWIN)
- Optische Defektkontrolle für Scheiben

Computer

- Workstations für Simulation und Design
- Parallelrechner (u.a. Alpha-Server 2100 5/250)
- Entwicklungswerkzeuge für Anlagensteuerungen (SieFuzzy, μ C Entwicklungsumgebung)

3. Veranstaltungen und wissenschaftliche Beiträge

3.1. Veranstaltungen unter Mitwirkung des LEB

3.1.1. Europäische Konferenz über Festkörper-Bauelemente (31st European Solid-State Device Research Conference / ESSDERC 2001)

Die führende europäische Konferenz zum Thema Halbleiterbauelemente, die *European Solid-State Device Research Conference (ESSDERC 2001)*, fand vom 11.-13. September 2001 im Arvena Park Hotel in Nürnberg statt. Als Veranstalter zeichneten neben dem Lehrstuhl für Elektronische Bauelemente das Fraunhofer IIS-B sowie der Lehrstuhl für Technische Elektrophysik der TU München verantwortlich.

Prof. Ryssel konnte als *Conference Chairman* etwa 200 internationale Fachleute aus Wissenschaft und Industrie begrüßen, denen in jeweils drei parallelen Sessions ca. 120 hochaktuelle Forschungsarbeiten aus den Bereichen Physik, Fertigungstechnologie, Modellierung und Charakterisierung elektronischer Bauelemente präsentiert wurden. Das Programm bot eine ausgewogene Mischung aus wissenschaftlich herausragenden und industrierelevanten Beiträgen.

Ein Großteil der Vorträge beschäftigte sich mit der Herstellung, Charakterisierung und Optimierung von hochintegrationsfähigen Bauelementen für die nächsten Mikrochip-Generationen. Neben Sub-100nm MOS-Transistoren und ultradünnen oder neuartigen Dielektrika wurden alternative Bauelementekonzepte vorgestellt. Beiträge zur Zuverlässigkeit und Stabilität solcher hochentwickelter Bauelemente rundeten diesen Themenkomplex ab.

Arbeiten zur Optimierung von Speicherzellen und zur Integration von Leistungsbauelementen, Bildsensoren oder auch Displays boten einen Einblick in aktuelle Entwicklungen auf dem Gebiet der Prozessintegration. Darüberhinaus wurden neue Konzepte für diskrete Leistungshalbleiterbauelemente und grundlegende Untersuchungen zur Physik der Halbleiterbauelemente präsentiert.

In der Prozess- und Bauelementesimulation lagen die Schwerpunkte bei der Modellierung von hochentwickelten Bauelementen und Architekturen bis hin zur elektrischen Simulation von Metallisierungsbahnen sowie bei Verfahren zur kompakten Modellierung, der direkten Verknüpfung von Prozess- und Bauelementesimulation.

Vor und nach der Konferenz fanden in Nürnberg und am IIS-B vier ein- bis zweitägige Kurzurse mit den Themen "Ion Beam Processing of Semiconductor Devices", "Crystalline Defects and Contamination: Their Impact and Control in Device Manufacturing", "Substrate Effects in Smart-Power ICs" und "Modeling and Electrical Characterization of Advanced High-Voltage MOS Transistors" statt. Aufgrund der hohen Aktualität der Themen stießen die Kurse auf reges Interesse.

Große Bestürzung lösten bei Teilnehmern und Veranstaltern die Terroranschläge in den USA aus, von denen am Ende des ersten Konferenztages berichtet wurde. Die Plenarveranstaltung am 12.09. wurde unterbrochen, um der Opfer der Attentate zu gedenken.

Die ESSDERC 2002 findet in diesem September in Florenz, Italien statt.

3.1.2. Festkolloquium zum sechzigsten Geburtstag von Professor Heiner Ryssel

Im feierlichen Rahmen eines Kolloquiums mit internationalen Festrednern und einem anschließenden gemütlichen Beisammensein wurde am 14. Dezember 2001 der sechzigste Geburtstag von Professor Ryssel begangen. Teils heitere, mit persönlichen Erfahrungen und Anekdoten angereicherte Vorträge und Grußworte von Kollegen, Weggefährten und Kooperationspartnern ermöglichten einen Einblick in das wissenschaftliche Schaffen des Jubilars. Die wissenschaftlichen Vorträge unter dem Schlagwort "From Ions to Systems – Silicon Technologies and Applications" sind im folgenden aufgelistet.

Prof. Mikio Takai, Universität Osaka, Japan	Development of Enhanced Depth-Resolution Technique for Shallow Dopant Profile
Prof. Georg Müller, Universität Erlangen-Nürnberg	Herausforderungen bei der Kristallzucht von Halbleitergrundmaterial
Dr. Thomas Mikolajick, Infineon Technologies AG	Technologie für zukünftige nichtflüchtige Halbleiterspeicher
Dr. Reinhard Ploß, Infineon Technologies AG	Entwicklungstrends bei Leistungshalbleitern
Prof. Giovanni Soncini, Universität Trento, Italien	Recent Developments on Silicon Integrated Microsystems
Prof. József Gyulai, Ungarische Akademie der Wissenschaften, Budapest	Paths of People and Ion Beams

3.1.3. Kolloquium zur Halbleitertechnologie und Messtechnik

Das von Dr. Lothar Frey organisierte Kolloquium bietet die Möglichkeit, aktuelle Forschungsarbeiten aus dem LEB und Fraunhofer IIS-B sowie von Kooperationspartnern aus Industrie und Wissenschaft vorzustellen. Im Jahr 2001 wurden die folgenden Beiträge angeboten:

Mo., 15.01.2001	Michael Jank, Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Elektronische Bauelemente, Erlangen Implantation durch MOS-Strukturen und deren Schädigung
Mo., 22.01.2001	Andrea Hettwer, Fraunhofer Institut für Integrierte Schaltungen, Bauelementetechnologie, Erlangen Streulichtmessverfahren zur Strukturkontrolle
Mo., 29.01.2001	Dr. Michael Abraham, Nanophotonics AG, Mainz <i>In situ</i> - Ellipsometrie in der Halbleiterfertigung
Mo., 05.02.2000	Christoph Lehrer, Fraunhofer Institut für Integrierte Schaltungen, Bauelementetechnologie, Erlangen Erzeugung von Nanostrukturen mittels FIB
Mo., 12.02.2001	Dr. Matthias Ashauer, Institut für Mikro- und Informationstechnik der Hahn-Schickard-Gesellschaft e.V., Villingen-Schwenningen Strömungssensoren
Fr., 05.10.2001	M. Bredol, Fachhochschule Münster Lumineszierende Materialien: Lanthanoid-dotierte Sol-Gel-Gläser

Mo., 22.10.2001 und	2 SONDERVERANSTALTUNGEN
Mo., 29.10.2001	Prof. Heiner Ryssel, Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Elektronische Bauelemente Einführung in die Silicium-Technologie (Multimedia-Vorführung)
Mo., 05.11.2001	Dr. Jochen Friedrich, Fraunhofer Institut für Integrierte Schaltungen, Bauelementetechnologie, Erlangen Herstellung von GaN-Substratkristallen, Schwierigkeiten und Lösungsansätze
Mo., 12.11.2001	Dr. Manfred Hammer, Faculty of Mathematical Sciences, University of Twente, Enschede, Niederlande Simulation planarer photonischer Bauteile mittels Modenentwicklung
Mo., 19.11.2001	Dr. Ernst Richter, Infineon Technologies AG, Erlangen CARL-Benefits of an Advanced Shrink Technology for Thin Film Imaging
Mo., 26.11.2001	Ralph Trunk, Fraunhofer Institut für Integrierte Schaltungen, Bauelementetechnologie, Erlangen <i>In situ</i> -Partikelmesssystem in der Beladestation eines 300 mm Vertikalofens
Mo., 03.12.2001	Alexander Molchanov, Fraunhofer Institut für Integrierte Schaltungen, Bauelementetechnologie, Erlangen Züchtung von CaF ₂ -Kristallen für die optische Lithographie bei 157nm
Mo., 10.12.2001	Narayan Solayappan, Symetrix Corporation, Colorado Springs, Colorado, USA SBT-based Technology for Non-Volatile Ferroelectric Random Access Memories (NV-FeRAMs)

3.1.4. Schülerinformationstag des Instituts für Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik

Mit Professor Ryssel als Vorstand des Instituts für Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik (IEEI) zeichnete der LEB im Jahr 2001 – wie bereits im Jahr 2000 - für die Organisation des Schülerinformationstags für die nordbayerischen Gymnasien verantwortlich. Professor Ryssel konnte zu einem einführenden Vortrag über das Studium der EEI etwa 450 Schüler und betreuende Lehrkräfte begrüßen. Anschließend lernten die Gäste bei zwei je 40-minütigen Laborführungen die einzelnen Lehrstühle des IEEI näher kennen. Der LEB trug zusammen mit dem Lehrstuhl für Rechnergestützten Schaltungsentwurf eine Vorführung (3 Stationen) zum Thema Entwurf und Fertigung integrierter Schaltungen bei.

Ab dem Jahr 2002 wird der Schülerinformationstag von der neu eingerichteten Geschäftsstelle des IEEI organisiert.

3.1.5. Praktikum "Mädchen und Technik"

Nach dem Erfolg des Vorjahres wurde auch 2001 an der Technischen Fakultät der Universität Erlangen-Nürnberg wieder ein Schnupperpraktikum **Mädchen und Technik** angeboten. Es richtete sich an Schülerinnen des Gymnasiums der Alterstufe 14 bis 16 Jahre (8. bis 10. Klasse) und fand vom 3. bis zum 7. September statt. Den Mädchen wurde dabei die Gelegenheit gegeben, in praktischen Übungen und Versuchen Berührungspunkte mit Naturwissenschaft

und Technik abzubauen und neue Interessen zu wecken. Auch dieses Jahr fand das Praktikum reges Interesse und war mit insgesamt 270 Anmeldungen überbelegt.

Am Lehrstuhl für Elektronische Bauelemente lernten 30 Schülerinnen in 5 Gruppen in halbtägigen Versuchen die Grundprinzipien einer Solarzelle unter dem Motto „Aus Licht Strom machen“ kennen. Soweit möglich, wurden die Versuche im Freien durchgeführt. Die Mädchen wurden bei den praktischen Versuchen dazu ermutigt, einfache Reihen- und Parallelschaltungen selbst aufzubauen, Strom-Spannungskennlinien aufzunehmen und Einflüsse von Lichteinfall auf die Leistung einer Solarzelle auszuprobieren. Besonderen Spaß hatten sie am Zusammenbau eines Solar-Holz-Flugzeuges.

Aufgrund des großen Erfolges steht fest, dass das Praktikum auch im nächsten Jahr wieder angeboten wird.

3.2. Wissenschaftliche Beiträge der LEB-Mitarbeiter

3.2.1. Bücher und Buchbeiträge

IIT 2000, Proceedings of the 12th International Conference on Ion Implantation Technology, Alpbach, September 2000, Herausgeber: **H. Ryssel**, **L. Frey**, J. Gyulai and H. Glawischnig, IEEE (Piscataway, NJ, 2001)

ESSDERC 2001, Proceedings of the 31th European Solid-State Device Research Conference, Nürnberg, 11.-13. September 2001, Herausgeber: **H. Ryssel**, G. Wachutka, H. Grünbacher, Frontier Group (Bonchamp-Lès-Laval, Frankreich, 2001)

Fabian Quast, " Untersuchung von Punktdefekten in Silicium mit Hilfe der Platindiffusion", Shaker, Aachen, 2001 (Erlanger Berichte Mikroelektronik; Hrsg.: **H. Ryssel**; Band 2001,1; ISBN 3-8265-9363-4), zugl.: Uni. Erlangen-Nürnberg, Diss., 2001

3.2.2. Wissenschaftliche Beiträge zu Zeitschriften, Tagungen und Vortragsreihen

C. Lehrer, **L. Frey**, S. Petersen, **H. Ryssel**: "Limitations of focused ion beam nanomachining", in: J. Vac. Sci. Technol. B **19**, 6 (2001) 2533-2538

C. Lehrer, **L. Frey**, S. Petersen, T. Sulzbach, O. Ohlsson, T. Dziomba, H.U. Danzebrink, **H. Ryssel**: "Fabrication of silicon aperture probes for scanning near-field optical microscopy by focused ion beam nano machining", in: Microelectronic Engineering **57-58** (2001) 721-728

R. Weiland, C. Boit, N. Dawes, A. Dziesiaty, E. Demm, B. Ebersberger, **L. Frey**, A. Hirsch, **C. Lehrer**, P. Meis, M. Kamolz, H. Lezec, H. Rettenmaier, W. Tittes, R. Treichler, H. Zimmermann: "In-line Failure Analysis on Productive Wafers with Dual Beam SEM/FIB", in: In-Line Characterization, Yield, Reliability, and Failure Analysis in Microelectronic Manufacturing II, Eds. G. Kissinger, L. Weiland, Proc. of SPIE 406 (2001)

T. Dziomba, H.U. Danzebrink, C. Lehrer, **L. Frey**, T. Sulzbach, O. Ohlsson: "High-resolution Constant-height Imaging with Apertured Silicon Cantilever Probes", in: *Journal of Microscopy* **202** (2001) 22 ff.

H. Boubekur, T. Mikolajick, J. Höpfner, C. Dehm, W. Palmer, J. Steiner, G. Kilian, B.O. Kolbesen, A. Bauer, **L. Frey**, **H. Ryssel**: "Barium, Strontium and Bismuth Contamination in CMOS Processes", in: *Solid State Phenomena* **76 - 77** (2001) 9-14

H. Boubekur, T. Mikolajick, N. Nagel, C. Dehm, W. Pamler, A. Bauer, **L. Frey**, **H. Ryssel**: "Impact of Platinum Contamination on Ferroelectric Memories", in: *Integrated Ferroelectrics (Proceedings of the 13th International Symposium on Integrated Ferroelectrics ISIF 2001 - Colorado Springs, CO, USA)*, **37**, 1-4 (2001) 75-82

M.P.M. Jank, **M. Lemberger**, A.J. Bauer, **L. Frey** und **H. Ryssel**: "Electrical reliability aspects of through the gate implanted MOS structures with thin oxides", in: *Microelectronics Reliability*, **41**, 7 (2001) 987-990

T. Leistner, K. Lehmbacher, P. Härter, A. Bauer, **L. Frey**, **H. Ryssel**: "MOCVD of Titanium Dioxide on the Basis of New Precursors", Vortrag EMRS 2001, Strasbourg (Frankreich), 6. Juni 2001

T. Leistner, K. Lehmbacher, P. Härter, A. Bauer, **L. Frey**, **H. Ryssel**: "Chemische Dampfphasenabscheidung von Materialien mit hoher Dielektrizitätskonstanten am Beispiel Barium-Strontium-Titanat", Vortrag auf der Konferenz Materials Week 2001, München, 2. Oktober 2001

M. Rommel, G. Zoth, M. Ullrich, **H. Ryssel**: "Recombination lifetimes of iron contaminated silicon wafers: Characterization through a single set of capture cross-sections", in: *Proceedings of the 9th International Autumn Meeting "Gettering and Defect Engineering in Semiconductor Technology" GADEST 2001 (September 30 - October 3, 2001, S. Tecla, Italy, Eds.: V. Raineri, F. Priolo, M. Kittler, H. Richter)*, 373-380

G. Kilian, **M. Rommel**, W. Pamler, E. Unger, A. Höpfner, B.O. Kolbesen: "Some aspects of the high-temperature behavior of bismuth, strontium and barium on silicon surfaces studied by total reflection X-ray fluorescence spectrometry", in *Spectrochimica Acta - Part B Atomic Spectroscopy*, **56**, 11 (2001), 2313-2319

G. Kilian, B.O. Kolbesen, **M. Rommel**, W. Pamler, E. Unger, A. Höpfner: "New Materials in Future Memories: High Temperature Behaviour of Sr, Bi and Ir on Silicon Surfaces Monitored by TXRF and ELYMAT", in: *Crystalline Defects and Contamination: Their Impact and Control in Device Manufacturing III (DECON 2001)*, September 13/14, Proceedings of the Satellite Symposium to ESSDERC 2001, Nuremberg, Germany, Eds.: B. O. Kolbesen, C. Claeys, P. Stallhofer, F. Tardif, *Electrochemical Society Proceedings* **2001-29**, 215-222

C. Schneider, L. Pfitzner, **H. Ryssel**: "Integrated metrology: An enabler for advanced process control (APC)", in: In-Line Characterization, Yield, Reliability, and Failure Analysis in Microelectronic Manufacturing II (Editors: Gudrun Kissinger, Larg H. Weiland), Proceedings of SPIE **4406** (2001) 118-130

M. Beichele, A.J. Bauer, M. Herden, **H. Ryssel**: "Reliability of ultra-thin N₂O-nitrided oxides grown by RTP under low pressure in different gas atmospheres", in: Solid-State Electronics **45**, 8 (2001) 1381-1389

M. Herden, A.J. Bauer, M. Beichele, **H. Ryssel**: "Suppression of boron penetration through thin gate oxides by nitrogen implantation into the gate electrode", in: Solid-State Electronics **45**, 8 (2001) 1251-1256

V. Svorčik, V. Hnatovicz, P. Stopka, L. Bacáková, J. Heitz, R. Öchsner, **H. Ryssel**: "Amino acids grafting of Ar⁺ ions modified PE", in: Radiation Physics and Chemistry **60** (2001) 89-93

M. Stoisiek: "Laterale Hochvolt-Bauelemente in SOI-Technologie: neue Gesichtspunkte zu einem alten Bauelementtyp", Vortrag, 30. Kolloquium "Halbleiter-Leistungsbaulemente und ihre Systemtechnische Anwendung"; 29. - 30. Oktober 2001, Freiburg/Breisgau

M. Stoisiek: "Smart-Power IC-Technologien für > ca. 200 V Spannungsfestigkeit", Vortrag, Technische Universität München, Lehrstuhl für Technische Elektrophysik, 17. Dezember 2001

R. Weiß, L. Frey, H. Ryssel: "Tungsten, Nickel, and Molybdenum Schottky Diodes with Different Edge Termination", in: Applied Surface Science **7274** (2001) 1-6 und Vortrag auf der Konferenz E-MRS 2001 Spring Meeting, Strasbourg (Frankreich)

4. Lehrveranstaltungen

Mittlerweile haben die ersten Studenten nach der neuen Studienordnung (Studienbeginn ab WS 1999/2000) im Diplomstudiengang Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik (EEI) das fünfte Semester erreicht. Die Umsetzung der Studienreform für das Hauptstudium wurde vom Lehrstuhl für Elektronische einerseits durch die Neugestaltung der beiden Hauptvorlesungen "Technologie integrierter Schaltungen" und "Prozessintegration und Bauelementestrukturen" seit mehreren Semestern vorbereitet, andererseits ermöglicht die Umorganisation des Hauptstudiums die Einführung neuer Veranstaltungen. So bietet der LEB ab Sommersemester 2002 das Fach "Technologiesimulation" (Dr.-Ing. Dipl.-Phys. Dipl.-Math. Jürgen Lorenz, Fraunhofer IIS-B) neu an, ab Wintersemester 2002/2003 kommt die Veranstaltung "Zuverlässigkeit und Fehleranalyse Integrierter Schaltungen" (Dr. rer. nat. Lothar Frey) hinzu. Beide Fächer sind Bestandteile des Wahlpflichtfachkanons der Studienrichtung Mikroelektronik.

In den folgenden Abschnitten wird eine vollständige Übersicht der vom Lehrstuhl für Elektronische Bauelemente angebotenen Vorlesungen, Übungen, Praktika und Seminare wiedergegeben.

Die Klassifizierung der Veranstaltungen erfolgt dabei nach der Prüfungsordnung für den Diplomstudiengang EEI. Einige der Veranstaltungen können jedoch auch von Studenten der Fachrichtungen Mechatronik, Werkstoffwissenschaften, Maschinenbau und Computational Engineering belegt werden. Nähere Informationen hierzu sind den Studienführern der jeweiligen Studiengänge zu entnehmen.

4.1. Lehrveranstaltung des Grundstudiums

Seit Inkrafttreten des reformierten Curriculums für das Studium der EEI wird das frühere Kernfach "Bauelemente der Elektrotechnik I" unter dem Namen "Halbleiterbauelemente" als obligatorische Lehrveranstaltung im dritten Semester des Grundstudiums vertreten:

Halbleiterbauelemente

(Prof. Dr.-Ing. Heiner Ryssel, Dipl.-Ing. Mathias Rommel)

Die Vorlesung Halbleiterbauelemente vermittelt den Studenten der EEI die physikalischen Grundlagen moderner Halbleiterbauelemente. Nach einer Einleitung werden Bewegungsgleichungen von Ladungsträgern im Vakuum sowie die Ladungsträgeremission im Vakuum und daraus abgeleitete Bauelemente besprochen. Anschließend folgt ein Abschnitt über Ladungsträger im Halbleiter: Hier werden die wesentlichen Aspekte der Festkörperphysik zusammengefasst, die zum Verständnis moderner Halbleiterbauelemente nötig sind. Darauf aufbauend erfolgt im Hauptteil der Vorlesung die detaillierte Darstellung der wichtigsten Halbleiterbauelemente, also Dioden, Bipolartransistoren und Feldeffekttransistoren. Einführungen in die wesentlichen Grundlagen von Leistungsbaulementen und optoelektronischen Bauelementen runden die Vorlesung ab.

4.2. Pflichtfächer der Studienrichtungen

Die folgenden beiden Veranstaltungen sind Pflichtvorlesungen für Studenten der Studienrichtung Mikroelektronik und können zudem im Freien Fachstudium als Pflichtfächer belegt werden.

Für das Studium nach der alten Diplomprüfungsordnung werden die beiden Veranstaltungen gemeinsam als Vertiefungsgrundfach "Technologie der Silicium-Halbleiterbauelemente" angeboten.

Technologie integrierter Schaltungen

(Prof. Dr.-Ing. Heiner Ryssel, Dipl.-Ing. Ralf Kühnhold)

Behandelt werden die wesentlichen Technologieschritte zur Herstellung elektronischer Silicium-Bauelemente sowie integrierter Schaltungen. Nach einer kurzen Darstellung der Kristallzucht werden die Prozessschritte Oxidation, Diffusion, Ionenimplantation, sowie chemische und physikalische Schichtabscheidung behandelt. Es folgt ein Überblick über die Prozessschritte Lithographie, Maskentechnik und Ätztechnik, die für die Strukturierung der erzeugten Schichten bzw. für die Maskierung bei Implantation und Diffusion eingesetzt werden.

Prozessintegration und Bauelementearchitekturen

(Prof. Dr.-Ing. Heiner Ryssel, Dipl.-Ing. Ralf Kühnhold)

In dieser Vorlesung werden die physikalischen Anforderungen an integrierte Bauelemente und deren Umgebung definiert und Lösungsansätze anhand von Prozess-Sequenzen vorgestellt. Insbesondere soll dabei dargelegt werden, wie durch die stetige Verkleinerung der Strukturen neue prozesstechnische Verfahren zur Einhaltung der an die Technologie gestellten Forderungen notwendig werden.

In einer Einleitung werden kurz die Methoden der Herstellung (vgl. Technologie Integrierter Schaltungen) vorgestellt. Die für Mikroprozessoren und Logikschaltungen wichtige CMOS-Technik wird im Anschluß daran ausführlich behandelt, gefolgt von der Bipolartechnik und der BiCMOS-Technik, bei der sowohl CMOS, als auch Bipolarschaltungen auf einem Chip integriert werden. Der nächste Vorlesungsabschnitt widmet sich den statischen und dynamischen Speichern. Hier werden sowohl die wichtigsten Speicherarten (DRAM, SRAM, EPROM, Flash) vorgestellt, als auch die notwendigen Technologieschritte. Ein kurzes Kapitel befasst sich mit dem Aufbau von Leistungsbaulementen. Die Problematik der Metallisierung sowie die Aufbau- und Verbindungstechnik, die für alle Bauelemente ähnlich ist, wird im Anschluss behandelt. Das letzte Kapitel beinhaltet Aspekte zur Ausbeute und Zuverlässigkeit von Bauelementen.

4.3. Wahlpflichtfächer

Wie bereits in der Einleitung zu diesem Kapitel erwähnt, existiert für jede Studienrichtung der EEI ein Kanon von Wahlpflichtfächern, aus dem in bestimmtem Umfang Veranstaltungen zu belegen sind. Im folgenden ist jeweils hinter der Veranstaltungsbezeichnung angegeben, welcher Studienrichtung das betreffende Fach zugeordnet ist.

Das Fach "Technologie integrierter Schaltungen" (Kapitel 4.2) ist als Wahlpflichtfach im Kanon der Studienrichtung Allgemeine Elektrotechnik vertreten, wird aber an dieser Stelle nicht separat aufgeführt.

Wahlpflichtfächer aus anderen als der vom Studenten gewählten Studienrichtung können wiederum als Wahllehrveranstaltungen eingebracht werden.

Halbleiter- und Bauelementemesstechnik (Mikroelektronik)

(Dr. rer. nat. Lothar Frey, Dipl.-Ing. Volker Häublein)

In der Vorlesung Halbleiter- und Bauelementemesstechnik werden die wichtigsten Messverfahren, die zur Charakterisierung von Halbleitern und von Halbleiterbauelementen benötigt

werden, behandelt. Zunächst wird die nötige Messtechnik zur Charakterisierung von Widerständen, Dioden, Bipolartransistoren, MOS-Kondensatoren und MOS-Transistoren behandelt. Dabei werden jeweils die wichtigsten Eigenschaften der Bauelemente kurz wiederholt. Im Bereich Halbleitermesstechnik bildet die Messung von Dotierungs- und Fremdatomkonzentrationen sowie die Messung geometrischer Dimensionen (Schichtdicken, Linienbreiten) den Schwerpunkt.

Leistungshalbleiterbauelemente (Elektrische Energie- und Antriebstechnik und Allgemeine Elektrotechnik)

(Prof. Dr. rer. phil. Michael Stoisiek)

In nahezu allen Feldern der Elektrotechnik, von der Energieerzeugungs- und Übertragungstechnik über die Kfz- und Industrieelektronik bis hin zu Geräten der Konsumelektronik und Datentechnik kommen heute leistungselektronische Systeme zum Einsatz. Dies ist nur möglich durch die Verfügbarkeit einer großen Palette unterschiedlicher aktiver Leistungshalbleiterbauelemente und Smart-Power ICs für typische Leistungen von $< 1\text{W}$ bis $> 1\text{MW}$ bei Spannungsfestigkeiten von 10V bis 10kV bzw. Stromtragfähigkeit der Bauelemente von 0.1A bis $> 3\text{kA}$. In der Vorlesung werden die Grundlagen zum Verständnis dieser Bauelemente sowie die unterschiedlichen technischen Realisierungsformen behandelt.

Die Vorlesung beginnt mit einer detaillierten Darstellung der für alle Leistungshalbleiterbauelemente maßgeblichen bauelementphysikalischen Grundphänomene, die die Spannungsfestigkeit im ausgeschalteten Zustand, Spannungsabfall und Stromtragfähigkeit im eingeschalteten Zustand und Schaltdynamik beim Umschalten vom eingeschalteten in den ausgeschalteten Zustand und umgekehrt bestimmen. Darauf aufbauend werden Grundprinzip, technische Ausgestaltung, Herstellungsverfahren und typische Leistungsdaten der wichtigsten Bauelementklassen behandelt. Neben der Diskussion der "klassischen" Leistungshalbleiterbauelemente Hochspannungsdiode, Thyristor, GTO und Bipolarer Leistungs transistor wird ausführlich auf moderne MOS-gesteuerte Leistungs-Halbleiterbauelemente wie Leistungs-MOSFETs und IGBTs eingegangen. Aktuelle Entwicklungstrends werden diskutiert.

Über Smart Power ICs, das sind monolithisch integrierte Schaltkreise, bei denen zusammen mit informationsverarbeitenden Schaltungen auch leistungselektronische Schaltungen auf einem Chip integriert sind, wird ein kurzer Überblick gegeben. Die ausführliche Behandlung von Technologien und Bauelementen zur Herstellung von Smart Power ICs ist Gegenstand der Vorlesung Smart Power IC Technologien.

Die Vorlesung Leistungshalbleiterbauelemente bietet das Bauelementgrundwissen für die Vorlesungen "Elektrische Antriebstechnik I + II" und "Stromrichtergespeiste Drehstromantriebe".

Smart Power IC Technologien (Mikroelektronik und Elektrische Energie- und Antriebstechnik)

(Prof. Dr. rer. phil. Michael Stoisiek)

Smart-Power ICs, das sind integrierte Schaltkreise, bei denen Teile oder die vollständige leistungselektronische Schaltung zusammen mit den signalverarbeitenden und Treiber-Schaltungen auf einem Silicium-Chip integriert sind, stehen heute in vielfältiger Form zur Anwendung zur Verfügung. Sie finden ihren Einsatz vornehmlich in der Kfz-Elektronik und in Haushalts- und Industrieelektronik kleiner Leistung ($< \text{ca. } 300\text{ W}$). Sie unterscheiden sich in der Topologie der integrierten Leistungsschaltung, der Spannungsklasse sowie der Komplexität der integrierten signalverarbeitenden Schaltungsteile. Zu ihrer Herstellung kommen abhängig von den Produktanforderungen unterschiedliche Technologien zur Anwendung.

Die Vorlesung gibt eine umfassende Darstellung der heute üblichen Smart-Power Produkte und der Technologien zu ihrer Herstellung. Die bauelementphysikalischen Grundprinzipien integrierbarer Leistungsbaulemente werden behandelt, sowie die Isolationstechniken, mit denen unterschiedliche Bauelemente und Schaltungsteile auf einem Chip voneinander isoliert werden. Zentraler Gegenstand der Vorlesung ist die Behandlung der unterschiedlichen Prozessarchitekturen zur Herstellung von Smart-Power Produkten: Prozesse auf CMOS-Basis, Prozesse auf Bipolar-IC Basis, dielektrisch isolierende Prozesse sowie Prozesse auf Basis der Herstellungsprozesse vertikaler Einzeltransistoren. Darüber hinaus werden spezielle Probleme von Smart-Power ICs, insbesondere thermische Aspekte, Gehäusefragen, sowie typische Bauelementbeanspruchungen in integrierten leistungselektronischen Schaltungen behandelt. Den Abschluss der Vorlesung stellt die Zusammenstellung einer Produkt-Herstellungstechnologie-Matrix dar sowie die Diskussion der Frage, "Wann ist im Bereich der Leistungselektronik der Einsatz monolithisch integrierter und wann der Einsatz diskreter Halbleiterbauelemente bzw. hybrider Integrationstechniken die richtige Lösung?"

Festkörperphysikalische Grundlagen der Halbleiterbauelemente (Mikroelektronik)

(Prof. Dr. rer. phil. Michael Stoisie)

Die Vorlesung gibt eine vertiefende Darstellung der festkörperphysikalischen Grundlagen zum Verständnis der Funktion der Halbleiterbauelemente. Sie ist als Ergänzung zu den Vorlesungen "Halbleiterbauelemente" und "Leistungshalbleiterbauelemente" gedacht.

Die Vorlesung beginnt mit einer Behandlung der für die Dichte der freien Ladungsträger im Halbleitermaterial bestimmenden Effekte, sowohl für den Fall des thermischen Gleichgewichtes als auch für den Fall einer Störung des thermischen Gleichgewichtes (Bändermodell, Elektronen und Löcher, intrinsischer und extrinsischer (dotierter) Halbleiter, Fermi-niveau, Generation- und Rekombination von Ladungsträgern, Ladungsträgerlebensdauer). Anschließend werden der Stromfluss unter Einfluss eines äußeren elektrischen Feldes sowie mit hohen elektrischen Feldstärken verbundene Phänomene diskutiert (Driftstrom, Ladungsträgerbeweglichkeit, heiße Elektronen, Stoßionisation). Die Halbleiter-Grundgleichungen, ein System von drei gekoppelten partiellen Differentialgleichungen, das, wenn es numerisch gelöst wird, die Beschreibung des elektrischen Verhaltens komplexer Bauelementstrukturen erlaubt, werden abgeleitet. Die Vorlesung schließt ab mit der Darstellung der elementaren Konstruktionselemente aller Halbleiterbauelemente, dem pn-Übergang, der Schottky-Barriere, sowie des MOS-Kondensators.

4.4. Wahllehrveranstaltungen

Ionenimplantation

Prof. Dr.-Ing. Heiner Ryssel, Dr. rer. nat. Lothar Frey

In der Vorlesung Ionenimplantation wird ein detaillierter Überblick über verschiedene Aspekte des Prozessschrittes Ionenimplantation gegeben. Nach einer Darstellung der physikalischen Grundlagen der Ionenimplantation sowie der Probleme bei der Implantation in Festkörper werden Ionenimplantationsapparaturen behandelt. Ferner werden Messmethoden zur Untersuchung der erhaltenen Schichten sowie Eigenschaften ionenimplantierter Schichten und schließlich Bauelemente, die besonders vorteilhaft mit Hilfe der Ionenimplantation hergestellt werden können, besprochen. Ein Überblick über die wichtigsten Anwendungen der Ionenimplantation außerhalb der Herstellung von elektronischen Bauelementen rundet die Vorlesung ab.

Technik der Halbleiterfertigungsgeräte

Dr.-Ing. Wolfgang Schmutz, ACR Automation in Cleanroom GmbH, Niedereschbach,
Dr.-Ing. Lothar Pfitzner, Fraunhofer IIS-B, Erlangen, Prof. Dr.-Ing. Heiner Ryssel

Die Vorlesung befasst sich mit Halbleiterfertigungsgeräten, deren fertigungstechnischer Integration, der Reinraum-Infrastruktur und mit Materialien für die Halbleiterherstellung. In Teil I werden Geräte zur Scheibenherstellung, Anlagen zur Reinigung, Oxidation, Diffusion, Implantation, Niederdruckabscheidung, Strukturübertragung und Strukturierung, für Plasmaprozesse sowie zur Messtechnik und Qualitätskontrolle behandelt. Der Teil II befasst sich mit Maschinen- und Anlagenkonzepten, Scheibehandhabung, Wafertrack-Anlagen, Partikelmesstechnik, Fertigungstechnik im Reinraum sowie Reinraumtechnik und Infrastruktur. Besonders berücksichtigt werden dabei mechanische und elektrische Anlagentechnik, Maschinenelemente, Subkomponenten, Maschinensteuerung, Anlagenverkettung bis hin zu Betriebsstoffen und Sicherheitstechnik. Fertigungstechnische und technologische Trends, Produktivitätsaspekte, Defektkontrolle, Cost-of-Ownership-Betrachtungen und Computer-Integrated-Manufacturing sind weitere wichtige Bestandteile der Vorlesung.

Mikrosystemtechnik I - Technologie der Mikrostrukturen

Dr.-Ing. Hans Betz, STEAG Industrie AG, Essen

Strukturierungstechniken sowie spezielle Dünnschichtprozesse für die Fertigung von mikro-mechanischen Komponenten und Bauteilen der Mikrosystemtechnik sind Thema dieser Vorlesung. Bei den Strukturierungsverfahren werden besonders die Methoden, die für starke Topographie geeignet sind, wie Röntgentiefenlithographie, kristallorientierungsabhängige Ätzverfahren, Hochleistungs-Plasma/Ionenätzen, behandelt. Daneben werden Verfahren diskutiert, die den strukturierten Materialabtrag bzw. -Auftrag erlauben. Dies sind vor allem Ionen-, Elektronenstrahlen, Laser-Deposition bzw. Ablation. Komponenten (Ionen-, Plasmaquellen) und Systeme (Dünnschicht und Lithographiesysteme) zur Herstellung von Mikrosystemen werden ebenfalls berücksichtigt. Anhand von Anwendungen werden die unterschiedlichen Bauelemente der Mikrosystemtechnik (Sensoren, Aktoren) diskutiert.

Mikrosystemtechnik II - Komponenten und Anwendungen

Dr.-Ing. Dietrich Stephani, Siemens AG, Erlangen

Warum werden Mikrosysteme für unsere Zukunft wichtig? Vom System zum Mikrosystem schreitend werden Bedarfswelder, Applikationsfelder, sinnvolle Miniaturisierung und Skalierungsgesetze angesprochen. Anschließend werden, von ihrer Anwendung her kommend, ausgewählte Mikrosysteme vorgestellt, nach ihren wesentlichen Komponenten (Mikrosensorik, Signalverarbeitung und Mikroaktorik) gegliedert und hinsichtlich ihrer physikalischen oder chemischen Eigenschaften beschrieben. Soweit es zum Verständnis dieser Mikrosysteme erforderlich ist, werden spezielle Technologien der Mikrostrukturtechnik kurz erläutert.

4.5. Praktika

Praktikum zur Technologie der Silicium-Halbleiterbauelemente

Dipl.-Ing. Mathias Rommel, Dipl.-Ing. Volker Häublein, Dipl.-Ing. Michael Jank

Das Praktikum zur Technologie der Silicium-Halbleiterbauelemente vermittelt einen ersten praktischen Einstieg in die Halbleitertechnologie. Im Verlauf des Herstellungsprozesses einer Solarzelle werden die Herstellungsschritte Oxidation, Implantation, Lithographie, Ätzen und Metallisierung durchgeführt. Darüber hinaus werden wichtige Messverfahren zur Prozesskontrolle wie Schichtdicken-, Dotierungsprofil- und Schichtwiderstandsmessverfahren vor-

gestellt. Zum Schluss werden die hergestellten Solarzellen an Hand ihrer Strom/Spannungskennlinie elektrisch charakterisiert.

Praktikum zur Halbleiter- und Bauelementemesstechnik

Dipl.-Ing. Michael Jank, Dipl.-Ing. Volker Häublein, Dipl.-Ing. Ralf Kühnhold,
Dipl.-Ing. Mathias Rommel

Im Praktikum zur Halbleiter- und Bauelementemesstechnik wird ein Teil der in der gleichnamigen Vorlesung besprochenen Messverfahren praktisch durchgeführt. Zu Beginn des Praktikums wird die Relevanz der Messtechnik zur Prozesskontrolle aber auch in der Bauelemententwicklung anhand eines typischen CMOS-Prozesses erläutert. Im Bereich Halbleitermesstechnik werden dann Versuche zur Scheibeneingangskontrolle, zu optischen Schichtdicken- und Strukturbreitenmessverfahren sowie zur Profilmesstechnik durchgeführt. Im Bereich Bauelementemesstechnik werden MOS-Kondensatoren und MOS-Transistoren, Dioden, Widerstände und spezielle Teststrukturen elektrisch charakterisiert.

Praktikum Produktionstechnik II (Maschinenbau)

Dipl.-Ing. Michael Jank, Dipl.-Ing. Mathias Rommel

Das interdisziplinäre Praktikum wird von Lehrstühlen des Maschinenbaus, der Elektrotechnik und der Informatik betreut und richtet sich an Studenten des Maschinenbaus mit der Studienrichtung "Produktion in der Elektrotechnik". Der LEB führt im Rahmen des Praktikums einen Versuch zur Charakterisierung von MOS-Kondensatoren und Transistoren durch. In der theoretischen Einführung wird der Bezug zum Herstellungsprozess entwickelt. Anhand der Charakterisierung werden Methoden zur Fertigungsüberwachung mittels elektrischer Messtechnik vorgestellt.

4.6. Seminare

Seminar über ausgewählte Kapitel der Silicium-Halbleitertechnologie

Prof. Dr.-Ing. Heiner Ryssel, Dipl.-Ing. Michael Jank

Ziel des Seminars ist die selbständige Erarbeitung und schlüssige Darstellung eines Themas aus dem Gebiet der Silicium-Halbleitertechnologie. Als Grundlage dienen dabei Literaturvorgaben der Betreuer, die durch eigene Recherchen ergänzt werden sollen. Die Teilnehmer referieren im Rahmen eines 45-minütigen Vortrags über ihre Ergebnisse. Die Einzelthemen werden in jedem Semester aus einem anderen Schwerpunkt gewählt. In den letzten Semestern wurden beispielsweise Schwerpunktthemen wie "Bauelementetechnologien und -architekturen", "Mikrosystemtechnik", "Kontamination in der Halbleiterelektronik" oder "Bauelemente-, Prozess- und Anlagensimulation" behandelt.

Numerische Simulation grundlegender Vorgänge in Halbleiterbauelementen

Prof. Dr. rer. phil. Michael Stoisiak

Das Verhalten von Halbleiterbauelementen wird in guter Näherung durch drei gekoppelte partielle Differentialgleichungen, die Poisson Gleichung sowie die Kontinuitätsgleichung für jeweils Elektronen und Löcher beschrieben. Zur Lösung dieses Gleichungssystems für komplexe Geometrien moderner Halbleiterbauelemente sowohl für stationären als auch transienten Betrieb stehen heute leistungsstarke und benutzerfreundliche kommerzielle Simulationsprogramme zur Verfügung. Diese werden vor allem bei der Entwicklung neuartiger Halbleiterbauelemente und ihrer Herstellungsprozesse eingesetzt. Durch die Möglichkeit solcher Programme, in einfacher Weise unterschiedliche Bauelementgeometrien und elektrische

Klemmenspannungen eingeben und ändern zu können, einzelne physikalische Effekte bei der Berechnung ein- oder ausschalten zu können sowie als Ergebnis sich die detaillierte räumliche Verteilung von elektrischem Feld und Ladungsträgerdichten im Bauelement ansehen zu können, eignet sich ein solches Programm in idealer Weise zum Kennenlernen und Verstehen von Halbleiterbauelementen. Die Teilnehmer des Seminars werden ausgewählte, in allen Bauelementen immer wiederkehrende Grundvorgänge durch eigene Simulationen an Rechnern des LEB "erleben" und eine visuelle Darstellung des entsprechenden Phänomens durch geeignete Simulationsergebnisse erarbeiten.

Der Ablauf des Seminars ist in drei Phasen aufgeteilt: In der ersten Phase werden in Form einer Vorlesung die implementierten physikalischen Grundgleichungen und physikalischen Modellvorstellungen erläutert sowie Struktur und Benutzeroberfläche des Simulationsprogramms (DESSIS). In Phase 2 werden die Seminarteilnehmer in Gruppen jeweils ein Thema bearbeiten und am Ende der Phase 2 darüber berichten. Eine einheitliche Form der visuellen Darstellung der von den verschiedenen Gruppen bearbeiteten Themen wird zu Beginn der Phase 3 vereinbart und in Phase 3 von den Teilnehmern erarbeitet.

4.7. Exkursionen

Neben einer eintägigen Exkursion im Wintersemester 2000/2001 wurde im vergangenen Jahr auch wieder eine zweitägige Veranstaltung im Sommersemester durchgeführt.

Am 5. Februar waren wir zu Gast im Halbleiterwerk Regensburg der Firma Infineon Technologies AG. Neben einer Vorstellung des Unternehmens und der am Standort gefertigten Produkte standen eine Reinraumbesichtigung und Gespräche über Berufsaussichten für Absolventen auf dem Programm.

Die Exkursion im Sommersemester führte uns an den westlichen Rand des Ruhrgebiets. Erstes Ziel der Besichtigungstour war am Nachmittag des 9. Juli die Firma eupec GmbH + Co. KG in Warstein/Belecke bei Lippstadt. Bei der Infineon-Tochterfirma werden diskrete Leistungshalbleiterbauelemente und IGBT-Module gefertigt. Nach einem interessanten Vortrag zu Wechselwirkungen zwischen Markterfordernissen und Produktentwicklung und der Vorstellung von Produkten und Anwendungsbereichen für IGBT-Module wurde der Besuch mit einem ausführlichen Rundgang durch die Produktionsstätte abgeschlossen. Anschließend erfolgte die Weiterreise nach Dortmund, wo das Quartier im Stadtzentrum bezogen wurde und der Abend zur freien Verfügung stand.

Am zweiten Tag stand ein Besuch bei der ELMOS Semiconductor AG in Dortmund auf dem Programm. Die Firma produziert anwendungsspezifische Integrierte Schaltungen (ASICs), genauer gesagt integrierte analog/digitale Systeme für Steuerungsaufgaben in Automobilelektronik, Haushaltsgeräten, Industrieelektronik und Haustechnik. Neben Präsentationen zum Unternehmensprofil, zu den Fertigungstechnologien und der engagierten Vorstellung einer aktuellen Forschungsarbeit wurden uns eine Führung durch die Scheibenfertigung und eine Besichtigung des Testlabors für die Ausgangskontrolle der gehäusten ICs geboten. Einem Mittagessen mit den Gastgebern und einer abschließenden Diskussion folgte die Rückreise nach Erlangen.

Wir möchten uns auf diesem Wege nochmals herzlich bei den gastgebenden Unternehmen für die freundliche Aufnahme bedanken. Besonderer Dank gilt den Firmen eupec und ELMOS für die gewährte finanzielle Unterstützung, ohne die der Besuch im Sommersemester nicht zu realisieren gewesen wäre.

4.8. Technologisches Blockpraktikum der Fachhochschule Aschaffenburg am LEB

Bereits das zweite Jahr in Folge konnten wir im Herbst 2001 für die Fachhochschule Aschaffenburg ein halbleitertechnologisches Praktikum im Reinraum des LEB durchführen. Das Praktikum wird als Blockpraktikum im Zeitrahmen einer Woche durchgeführt und entspricht einer verkürzten Fassung des Praktikums zur Technologie der Silicium-Halbleiterbauelemente, das für die Studenten der Universität Erlangen angeboten wird.

Von technologischer Seite wird im Praktikum ein Ausschnitt aus dem Solarzellenprozess durchgeführt, der speziell an die Praktikumswoche angepasst wurde. Dabei stellt vor allem der zeitnahe Abschluss der im Praktikum begonnenen Prozesse sowie die Durchführung von Zwischenschritten "über Nacht" (üblicherweise steht dafür eine Woche zur Verfügung) eine große Herausforderung für die am Praktikum und Prozess Beteiligten dar.

In einer modifizierten Versuchsreihenfolge werden montags die Oxidation der Antireflexschicht, dienstags die Implantationen für die Herstellung der n-leitenden Schicht (Vorderseite, Ladungstrennung) und des rückseitigen p^+ -Kontaktes (auch Rückseiten-Minoritätsladungsträgerspiegel) durchgeführt. Am Mittwoch folgt die Photolithographie zur Strukturierung der Kontaktgebiete. Während donnerstags im Reinraumlabor bereits die Metallisierung der Scheibenvorderseiten abgeschlossen wird, findet in den Messlabors ein Versuch zur elektrischen Profilmessung per Ausbreitungswiderstand und zur Ladungsträger-Lebensdauer-messung statt. Abschließend erfolgt am Freitag die Metallisierung der Scheibenrückseite, gefolgt von der Strukturierung der Vorderseite im Lift-off-Verfahren. Da diese Schritte nur einen Ausschnitt aus dem Gesamtprozess darstellen, werden jeweils vor und nach der Praktikumswoche zusätzliche Arbeiten im Reinraum durchgeführt. Darüber hinaus finden zwei vorbereitende Versuche bereits am Samstag vor der Praktikumswoche in Aschaffenburg statt, ein nachfolgender Versuch zur Charakterisierung der gefertigten Bauelemente wird im darauf folgenden Wintersemester von der FH Aschaffenburg durchgeführt.

Die Finanzierung des Blockpraktikums konnte im Jahr 2000 über eine Unterstützung durch das Fraunhofer Institut für Integrierte Schaltungen – Bauelementetechnologie, im Jahr 2001 durch Zuwendungen des Bayerischen Staatsministeriums für Wissenschaft Forschung und Kunst sowie des Förderkreises für die Mikroelektronik in Erlangen gewährleistet werden. Aufgrund der sehr positiven Resonanz bei den Studenten sind der Lehrstuhl für Elektronische Bauelemente und die Fachhochschule Aschaffenburg an einer festen Etablierung der Veranstaltung interessiert.

5. Arbeiten im Rahmen der Ausbildung von Studenten und Mitarbeitern

5.1. Studienarbeiten

5.1.1. Modellierung der Ladungsträgerrekombination in bordotiertem Silicium bei Eisenkontamination

(Michael Ullrich)

Im Rahmen der Arbeit sollte versucht werden, die Rekombinationsparameter von Eisen in bordotiertem Silicium zu bestimmen. Dazu wurde das charakteristische Verhalten der Minoritätsladungsträgerlebensdauer bei Eisenkontamination in Abhängigkeit von der Temperatur näher untersucht. Die Ermittlung der Einfangkoeffizienten erfolgte durch Anpassung eines Modells an Lebensdauerdaten, die aus der Literatur stammen und an Proben mit unterschiedlichen Eisenkonzentrationen ermittelt wurden.

Die Anpassung wurde mit Hilfe des Levenberg-Marquardt-Algorithmus durchgeführt, der in der Lage ist, das Abstandsquadrat zwischen Modellkurve und Messpunkten durch Änderung der Modellparameter zu minimieren. Das Lebensdauermodell berücksichtigt sowohl, dass Eisen in bordotiertem Silicium in Form von Eisen-Bor Paaren und interstitiellem Eisen vorliegt – wobei die Konzentrationsverhältnisse von der Temperatur und der Borkonzentration abhängig sind - als auch die Abhängigkeit der Lebensdauer von der Überschussladungsträgerkonzentration Δn . Die zwei Energieniveaus aufgrund des Eisen-Bor Paares werden durch das Modell von Choo beschrieben. Das Rekombinationsverhalten von interstitiellem Eisen wird nach dem Modell von Shockley, Read und Hall berücksichtigt.

Es zeigt sich, dass es mit dem Modell möglich ist, die gemessenen Lebensdauern einer Messreihe mit einem Einfangkoeffizientensatz darzustellen. Durch alleinige Änderung der Überschusselektronenkonzentration Δn war es möglich, innerhalb einer Messreihe die gemessenen Lebensdauern von Proben mit unterschiedlichen Eisenkonzentrationen zu beschreiben. Dabei ergaben sich steigende Werte der Überschusselektronenkonzentration für steigende Eisenkonzentrationswerte.

Aufgrund der Analyse der Einflüsse der Modellparameter auf den temperaturabhängigen Lebensdauerungsverlauf konnte festgestellt werden, dass die Einfangkoeffizienten des ersten Energieniveaus des Eisen-Bor Paares (E_{T1} liegt 0,10eV über dem Valenzband) bei den gegebenen Messdaten praktisch keinen Einfluss auf die modellierte Lebensdauer haben und daher mit dieser Anpassmethode nicht ermittelt werden können. Sie wurden deshalb auf Werte gesetzt, die aus der Literatur bekannt sind. Die übrigen Einfangkoeffizienten konnten dagegen bestimmt werden.

Dabei ergab sich für das zweite Niveau aufgrund eines Eisen-Bor Paares (E_{T2} liegt 0,29eV unter dem Leitungsband), dass der Elektroneneinfangkoeffizient im Bereich von $4,5 \cdot 10^{-8} \text{cm}^3 \text{s}^{-1}$ und der Löchereinfangkoeffizient im Bereich von $1 \cdot 10^{-7} \text{cm}^3 \text{s}^{-1}$ liegt. Für den Elektroneneinfangkoeffizienten des interstitiellen Eisens (E_T liegt 0,38eV über dem Valenzband) ergab sich ein Wert von ca. $4 \cdot 10^{-7} \text{cm}^3 \text{s}^{-1}$, für den Löchereinfangkoeffizienten ein Wert von ca. $2 \cdot 10^{-9} \text{cm}^3 \text{s}^{-1}$. Diese Ergebnisse stehen in gutem Einklang mit entsprechenden Literaturdaten.

5.1.2. Elektrische Charakterisierung von MOCVD Titandioxidschichten auf der Basis neuartiger Precursoren

(Andreas Vogl)

Titandioxid ist heute Gegenstand der Forschung in der Mikroelektronik als sogenanntes hoch- ϵ Material für Anwendungen als Dielektrikum in Speicherkondensatoren und als Gate-dielektrikum.

Solche Titandioxidschichten werden mit Hilfe des MOCVD (metal-organic-chemical-vapor-deposition)-Verfahrens, also mittels metallorganischer Ausgangsverbindungen in der Gasphase, chemisch abgeschieden. Dieses Verfahren bietet den Vorteil hoher Homogenität und die Möglichkeit der Abscheidung dünner Schichten.

In dieser Arbeit wurden derartige dünne Titandioxidschichten, die aus verschiedenen metallorganischen Ausgangsverbindungen (Precursoren) abgeschieden worden sind, hinsichtlich ihrer Dielektrizitätskonstante und ihres Leckstromverhaltens mit Hilfe elektrischer Messungen charakterisiert. Die untersuchten Schichten unterscheiden sich zusätzlich hinsichtlich ihrer Abscheidetemperatur und ihrer Dicke und es wurden sowohl ungetemperte als auch getemperte Schichten untersucht. Als Messstrukturen wurden hauptsächlich MIS-Strukturen verwendet, einige Messungen wurden auch an MIM-Strukturen vorgenommen, die sich jedoch als ungeeignet erwiesen. Das Ziel der Untersuchungen war es, die Eignung der neuartigen Precursoren für einen möglichen Einsatz in der Industrie zu bewerten.

Die Messungen des Leckstromverhaltens ergaben für ungetemperte Schichten sehr unbefriedigende Ergebnisse, so dass sich die weiteren Untersuchungen auf getemperte Schichten konzentrierten.

Diese Schichten wurden bei 750 °C bzw. bei 900 °C getempert. Durch den Temperprozess entstand ein Zweischichtdielektrikum aus Titandioxid und Siliciumdioxid. Dadurch verbesserte sich das Leckstromverhalten und eine sinnvolle Auswertung der Messungen zur Ermittlung der Dielektrizitätskonstante war meistens möglich. Für dickere Titandioxidschichten von über 30nm Dicke ergab sich eine relative Dielektrizitätskonstante von über 40 bis teilweise über 80. Für eine untersuchte Titandioxidschicht von 8nm Dicke ergab sich eine Dielektrizitätskonstante von 7.

Da sich anhand der Untersuchungen keine Aussage treffen lässt, welche der aus den verschiedenen Precursoren abgeschiedenen Schichten die höchsten Werte hinsichtlich der Dielektrizitätskonstanten liefert, wurde ein Vergleich der Schichten hinsichtlich des Leckstromverhaltens vorgenommen. Dabei stellte sich heraus, dass die Verbindung $\text{Ti}_2(\text{Ti}(\text{OC}(\text{CH}_3)_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CH}_3)_4)$ das beste Leckstromverhalten der untersuchten Verbindungen zeigt. Daher erscheint dieser Precursor geeignet für einen Einsatz in der Industrie, da er ein besseres Leckstromverhalten zeigt als die industriell schon eingesetzte Substanz $\text{TiO}((\text{Ti}(\text{C}_3\text{H}_7\text{O})_4))$.

5.2. Diplomarbeiten

5.2.1. Herstellung und Charakterisierung von BPSG-Schichten für die Mikroelektronik mit neuartigen Precursoren

(Hamid Farangis Zadeh – Originalarbeit in englischer Sprache)

Bor-Phosphor-Glasschichten bzw. BPSG-Schichten (Boron Phosphorus Silicate Glass) sind SiO_2 -Schichten mit Massenanteilen von 2 bis 10% Bor und Phosphor. Ihre Bedeutung in der

Siliciumtechnologie verdanken sie zwei markanten Eigenschaften, nämlich ihrer Getterwirkung für Alkali- und Schwermetalle und ihrem Fließvermögen bei Temperaturen um 900 °C.

Für die Abscheidung dieser Schichten kommt jedes gängige CVD-Verfahren in Frage. In der Massenfertigung kommt hauptsächlich das APCVD- (Atmospheric Pressure Chemical Vapor Deposition) Verfahren zum Einsatz. Die dafür benötigten Abscheideraktoren benötigen viel Platz und sind teuer (ca. 2 Mio. DM). Außerdem kommen toxische Sondergase wie Phosphin und Silan als Precursoren zum Einsatz. Eine kostengünstige und sichere Alternative ist die Abscheidung in LPCVD- (Low Pressure CVD) Reaktoren mit flüssigen Precursoren.

Am Lehrstuhl für Elektronische Bauelemente (LEB) befindet sich eine solche LPCVD-Anlage. Im Rahmen dieser Arbeit werden die Abscheidebedingungen neuartiger Precursoren untersucht. Die Prozessparameter wie z.B. Gasverhältnisse und die entsprechenden Abscheideraten werden bestimmt. Ein weiterer wichtiger Gesichtspunkt ist die Dickenhomogenität der BPSG-Schicht über die Scheibe und über das Batch, wie auch die Dotierhomogenität der Schicht. Zur Untersuchung dieser Parameter werden die Strömungsverhältnisse im Reaktor betrachtet.

Das wichtigste Entscheidungskriterium ob derartige Schichten für den Einsatz in der Halbleiterindustrie geeignet sind, ist aber das Fließverhalten der Schichten. Daher liegt im zweiten Teil der Arbeit der Schwerpunkt auf der Untersuchung des Fließverhaltens. Hier wurden die Einflüsse der Temperatur, der Prozessgase (Atmosphäre während der Temperung) und des Phosphor- bzw. Borgehalts in der Schicht analysiert.

Während dieser Arbeit wird ein röhrenförmiges, für bis zu 50 Scheiben geeignetes und vollautomatisches LPCVD-System der Firma Centrotherm mit den flüssigen Precursoren Trimethylborat (TMB), Trimethylphosphit (TMP), 2, 4, 6, 8- Tetramethylcyclotetrasiloxan (TMCTS) und Sauerstoff (O₂) zum Abscheiden der BPSG-Filme benutzt. Es wurden ausschließlich 150mm-Scheiben untersucht, die jedoch unterschiedliche Oberflächentopologien aufwiesen (Polysiliciumstrukturen).

Zunächst wird die optimale Position der Scheiben im Reaktor während der Abscheidungen ermittelt. Anschließend werden BPSG-Schichten bei unterschiedlichen Gasvolumengeschwindigkeiten der Dotiergase TMP und TMB abgeschieden. Der Fließprozess nach jeder Abscheidung wird in drei unterschiedlichen Atmosphären durchgeführt: H₂O, O₂ und N₂. Zur Auswertung werden Schichten mit gleichen Volumen Kennzahlen der TMB/TMP Flüsse - getempert in den unterschiedlichen Atmosphären - verglichen. Die Einflüsse von Atmosphären und Strömungsgeschwindigkeiten der Dotiergase TMP und TMB (oder Konzentration von Phosphor und Bor in den Filmen) auf die Eigenschaften der Filme werden diskutiert.

Mittels Rasterelektronenmikroskopie (REM) und Interferometrie werden Abscheideraten und das Reflow-Verhalten charakterisiert und die Schichten auf Bildung von Voids (Lücken in der abgeschiedenen Schicht) untersucht. Zur Analyse der Schichtzusammensetzung wird die Konzentration von Bor und Phosphor in den Filmen mit Röntgen-Photoemissionsspektroskopie (XPS) gemessen. Die Ätzraten der hergestellten Schichten werden durch nasschemische Ätzung in Verbindung mit Interferometrie ermittelt. Die Untersuchung der Abhängigkeit dieser Parameter von den Flussverhältnissen der Gase war der Kern dieser Arbeit.

Abschließend werden Untersuchungen bezüglich der Homogenität der abgeschiedenen BPSG-Filme (getempert in H₂O und in O₂) durchgeführt, wobei hier ebenfalls das Hauptaugenmerk auf dem Einfluss der TMP- und TMB-Volumenströme (bzw. P- und B-Konzentrationen in den Filmen) lag.

5.3. Promotionen

5.3.1. Untersuchung von Punktdefekten in Silicium mit Hilfe der Platindiffusion

(Fabian Quast)

Die Herstellung von modernen integrierten Schaltungen stellt immer höhere Anforderungen an das verwendete Siliciumgrundmaterial. Eine wichtige Rolle spielt hier die Präzipitation von Sauerstoff in der Siliciumscheibe. Sauerstoffpräzipitate erhöhen die mechanische Festigkeit und fangen schnell diffundierende metallische Verunreinigungen durch intrinsisches Gettern ein. Jedoch können diese Sauerstoffpräzipitate an der Oberfläche zu Defekten in den dort liegenden Bauelementen führen. Mit der abnehmenden Strukturgröße der Bauelemente nimmt dieses Defektrisiko deutlich zu.

In konventionellen Herstellungsprozessen wird die Verhinderung der Sauerstoffpräzipitation nahe der Oberfläche durch die Ausdiffusion des Sauerstoffs bei hohen Temperaturen gesteuert. Dieser Prozess ist sehr aufwendig und stark von der Sauerstoffkonzentration im verwendeten Siliciummaterial abhängig. Eine elegantere Methode die Sauerstoffpräzipitation zu steuern besteht darin, den Einfluss von im Material erzeugten Gitterleerstellen auf die Sauerstoffpräzipitation auszunutzen. Mit geeigneten Gitterleerstellenprofilen ist es möglich, hohe Sauerstoffpräzipitatkonzentrationen im Volumen und verschwindend geringe an der Oberfläche zu erreichen. Für die Einstellung solcher Gitterleerstellenprofile können kurze Hochtemperaturprozesse in inerter Atmosphäre bei Temperaturen über 1200 °C eingesetzt werden. Die beiden Kurven in Abb. 5.1 zeigen Simulationen der Gitterleerstellenkonzentrationen während des Aufheizens (links) bzw. Abkühlens (rechts) einer Siliciumscheibe. Die Konzentration der Gitterleerstellen ist proportional zur Konzentration der Sauerstoffpräzipitate, d.h. an den Oberflächen der Scheibe sind nach diesem Hochtemperaturschritt keine Sauerstoffpräzipitate mehr vorhanden. Abb. 5.2 zeigt deutlich die durch die Simulation des Hochtemperaturschrittes vorhergesagte präzipitatfreie Zone an der Oberfläche der Siliciumprobe.

In der vorliegenden Arbeit wurde die Methode zur Messung von Gitterleerstellenkonzentrationen

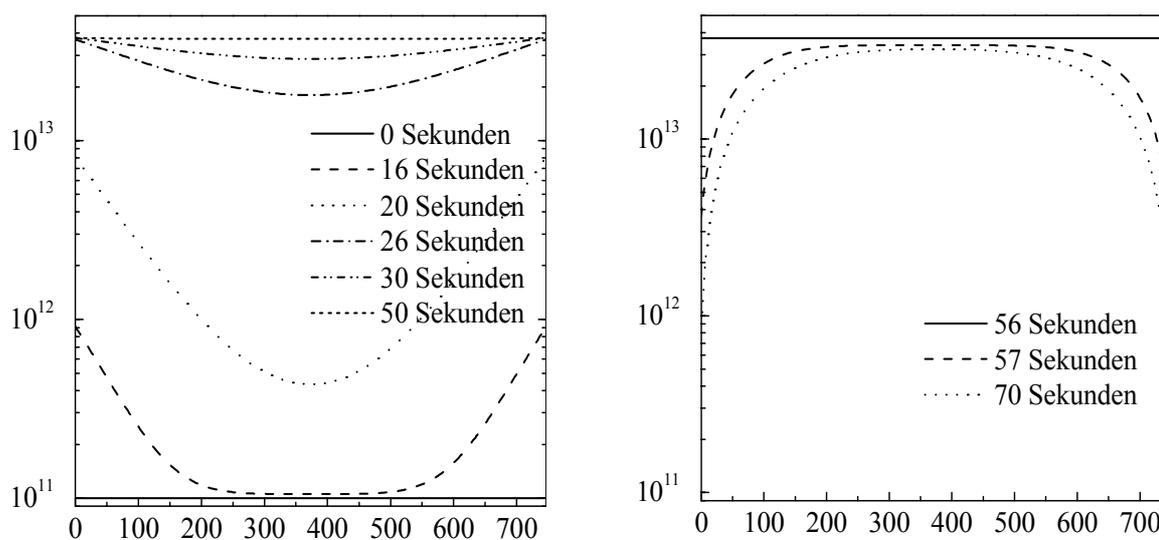


Abb. 5.1: Simulationen der Gitterleerstellenkonzentration zu verschiedenen Zeitpunkten beim Aufwärmen (links) und beim Abkühlen (rechts) einer Siliciumscheibe. Beginn des Abkühlens nach 56 s Prozessdauer

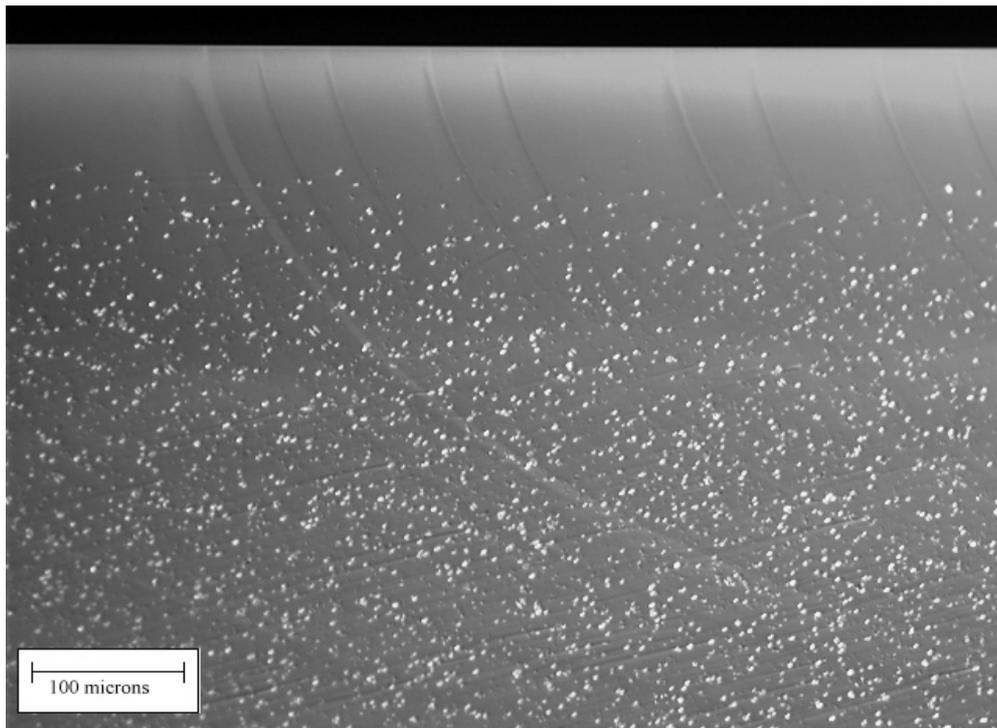


Abb. 5.2: Foto einer Probe nach der RTP--Behandlung in Argon bei 1250 °C und anschließender Präzipitationsbehandlung. Die Probenoberfläche ist oben im Bild unter dem dunklen Bereich. Darunter kommt ein präzipitatreier Bereich und dann ein Bereich, in dem die Präzipitatdichte mit der Entfernung von der Oberfläche stark zunimmt. Die präzipitatreie Zone ist in dieser Probe ca.70µm tief.

trationen verbessert, die die Grundlage zur Untersuchung von Gitterleerstellenprofilen darstellt. Mit Hilfe dieses Messverfahrens wurde die Bildung von Gitterleerstellen-Verunreinigungskomplexen sowohl in zonen- (FZ, float-zone) als auch tiegelgezogenem Silicium (CZ, Czochralski) untersucht. Die Weiterentwicklung der Modelle für die Platindiffusion in CZ und FZ-Silicium ermöglichten eine sehr gute Übereinstimmung der Experimente mit den Simulationen. Die Simulationsmodelle liefern mögliche Erklärungen für die Vorgänge während der Temperung unter inerten Bedingungen von FZ-Silicium und der Platindiffusion in CZ- und FZ-Silicium. Weiterhin wurde die Generation von Gitterleerstellen durch Hochtemperaturprozesse und deren Einfluss auf die Sauerstoffpräzipitation untersucht.

Durch Untersuchungen der Platindiffusion an FZ- und CZ-Silicium konnte nachgewiesen werden, dass Gitterleerstellen in diesen beiden Materialien in unterschiedlichen Komplexen vorliegen. In kommerziell erhältlichem FZ-Silicium wird während des Kristallwachstums meist Stickstoff zugegeben, um die Bildung von Gitterleerstellenagglomeraten (D-Defekten) zu unterdrücken. In dieser Arbeit konnte erstmals gezeigt werden, dass die in FZ-Silicium gefundenen hohen Gitterleerstellenkonzentrationen nur aufgrund der Stickstoffdotierung auftreten. Es wurde in Experimenten beobachtet, dass durch eine thermische Vorbehandlung von FZ-Silicium die gemessene Platinkonzentration abnimmt. Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Modell zur Beschreibung der Defektreaktionen und der Platindiffusion aus einem einfachen Modell weiterentwickelt. Dieses Modell berücksichtigt neben den beim Kristallwachstum gebildeten Gitterleerstellen-Stickstoff-Komplexen eine weitere Defektart, die aus diesen Komplexen bei einer thermischen Behandlung gebildet werden. Diese neu gebildeten Defekte können nicht direkt durch Platin besetzt werden. Lediglich die Defekte, die direkt nach der Kristallzucht vorhanden sind, können über eine dem Frank-Turnbull-Mechanismus ähnliche Reaktion mit Platin besetzt werden. Durch Anpassen der Reaktionsraten für die Bil-

dung und den Zerfall des stabileren Defekts konnten die Simulationen die experimentellen Ergebnisse in FZ-Silicium sehr gut beschreiben.

In CZ-Silicium liegt aufgrund der Kristallherstellungsmethode eine deutlich höhere Sauerstoffkonzentration als in FZ-Silicium vor und es wird bisher in der Regel kein Stickstoff hinzugefügt. Der Sauerstoff bildet mit im Kristall vorhandenen Gitterleerstellen Komplexe, die sich bei Reaktionen mit interstitiellem Platin anders als die Gitterleerstellen-Stickstoff-Komplexe in FZ-Silicium verhalten. Die nach einem Diffusionsprozess in CZ-Silicium gemessene Platinkonzentration ist in weiten Bereichen von der Diffusionstemperatur und -dauer abhängig. Bei genügend hoher Diffusionstemperatur bzw. ausreichend langer Prozessdauer werden alle durch den Platindiffusionsschritt auflösbaren Komplexe mit Platin besetzt. Eine weitere Verlängerung der Prozessdauer führt ebenso wie eine Erhöhung der Prozessstemperatur zu keinem weiteren Ansteigen der Platinkonzentration. Die Platinkonzentration entspricht nach einem solchen Prozess der Gitterleerstellenkonzentration.

Mit Hilfe dieser verbesserten Messmethode für Gitterleerstellenkonzentrationen war es möglich, verschiedene Hochtemperatur-Prozesse zur Generation von Gitterleerstellen in Silicium zu untersuchen. Es wurden hier die Abhängigkeiten von der Prozessstemperatur, -dauer und der Abkühlrate untersucht. Simulationen aller dieser Hochtemperaturprozesse mit dem gleichen Satz an Parametern ergeben eine gute Übereinstimmung mit den Experimenten. Durch diese Simulationen konnten die Punktdefektparameter, die zum Teil aus Kristallzuchtexperimenten von Projektpartnern, aus der Literatur oder aus diesen Hochtemperaturprozessen stammten, überprüft und optimiert werden.

Weiterhin wurde der Zusammenhang der Sauerstoffpräzipitatdichte mit der zuvor vorhandenen Gitterleerstellenkonzentration bestimmt. Auf diese Weise war es möglich, experimentelle Ergebnisse von Sauerstoffpräzipitatkonzentrationsmessungen mit den simulierten Gitterleerstellenkonzentrationen nach Hochtemperaturprozessen zu vergleichen. Die Übereinstimmung dieser Simulationen mit den Experimenten war in einem weiten Konzentrationsbereich sehr gut. Während der bei MEMC durchgeführten Messung der Sauerstoffpräzipitatkonzentrationen wurde ebenfalls die Ausdehnungen der präzipitatfreien Zonen bestimmt. Der Vergleich der Messungen mit den Simulationsergebnissen lieferte eine sehr gute Übereinstimmung.

Die Temperaturabhängigkeit des Gitterleestellendiffusionskoeffizienten wurde im Temperaturbereich zwischen 900 und 1100 °C untersucht. Hierzu wurde ein zuvor installiertes Gitterleerstellenprofil in einem zweiten Temperaturschritt ausdiffundiert. Aus den Simulationen dieser Ausdiffusionsexperimente konnte der effektive Gitterleestellendiffusionskoeffizient bestimmt werden. Dieser nimmt unter 1100 °C drastisch gegenüber dem Diffusionskoeffizienten für ungebundene Gitterleerstellen ab.

In weiteren Experimenten konnte beobachtet werden, dass vor dem Prozess vorhandene D-Defekte (auch als Voids bezeichnet), Eigenzwischengitteratome oder Gitterleerstellen die Generation von Gitterleerstellen durch Kurzzeit-Hochtemperaturprozesse nicht signifikant beeinflussen.

Die in dieser Arbeit durchgeführten Experimente und Simulationen haben zu einer Verbesserung des Verständnisses der Platindiffusion in FZ- und CZ-Silicium geführt. Hierdurch war es möglich, neue Erkenntnisse über die Wechselwirkungen von Verunreinigungen und Gitterleerstellen und die Generation von Gitterleerstellen durch Hochtemperaturprozesse zu erlangen. Es konnten die Parameter zur Beschreibung der Bildung und Diffusion der Punktdefekte verbessert und überprüft werden. Durch dieses Grundlagenwissen ist es möglich, gezielt Gitterleerstellenprofile in Silicium zu erzeugen, was zur Steuerung der für die Produktion von mikroelektronischen Schaltungen erwünschten Sauerstoffpräzipitation in CZ-Silicium ausgenutzt werden kann. Es können hierdurch an den Scheibenoberflächen sauerstoffpräzipitatfreie

Zonen hergestellt werden, so dass die Gefahr defekter Bauelemente durch Sauerstoffpräzipitate drastisch reduziert wird.

6. Forschung

6.1. Arbeitsgebiete

6.1.1. Prozesstechnik

Ansprechpartner: Dr. rer. nat. Lothar Frey und Dr.-Ing. Anton Bauer (FhG IIS-B)

Neue technologische Prozesse und Herstellungsmethoden für die VLSI- und ULSI-Technologie und für moderne Leistungsbaulemente werden im Arbeitsgebiet Prozesstechnik entwickelt. Schwerpunkte liegen auf den Gebieten der Herstellung und Charakterisierung ultraflacher Dotierprofile und Silizidschichten durch ionenstrahlgestützte Prozesse, bei der Anwendung der Hochenergieimplantation und der Herstellung dünner isolierender Schichten sowie neuer dielektrischer Materialsysteme und Ferroelektrika. Modernste analytische Verfahren zur Charakterisierung von Oberflächen, Schichten, Grenzflächen sowie Flüssigmedien und Gasen erlauben es, störende Verunreinigungen in geringsten Konzentrationen sowie deren Ursachen und Wirkung auf die elektrischen Eigenschaften von Bauelementen zu erkennen.

6.1.2. Mikrosystemtechnik

Ansprechpartner: Dr. rer. nat. Lothar Frey und Dr.-Ing. Anton Bauer (FhG IIS-B)

Die Entwicklung und Herstellung von Sensoren und Aktoren auf Basis der Siliciumtechnologie sowie die Integration der Einzelkomponenten in komplexe Mikrosysteme sind die Kernaufgaben im Arbeitsgebiet Mikrosystemtechnik. Beispielhaft seien optische Sensor-Aktor-Systeme (Mikrolampen / Detektoren) für Echtzeitgasanalysesysteme in Medizintechnik und Gebäudetechnik, chemische Sensoren für Flüssigkeiten und Gase auf der Basis von Feldeffekttransistoren sowie mikroelektromechanische Vibrationsmesssysteme genannt. Die verwendeten Sonderprozesse wie z.B. die anisotrope Ätztechnik oder der Einsatz von Ätzstopptechniken und die zugehörigen Prozessgeräte werden eigenständig entwickelt. Im Applikationslabor für Sensorik und Mikrosystemtechnik kann die Charakterisierung der Bauelemente vorgenommen werden.

6.1.3. Leistungshalbleiter-Bauelemente, Smart-Power IC-Technologien

Ansprechpartner: Prof. Dr. phil. nat. Michael Stoisiek

Schwerpunkt: Konzeption und Entwicklung neuartiger diskreter und im Rahmen von Smart-Power IC-Technologien integrierbarer Leistungshalbleiter. Aktuelle Forschungsthemen stellen integrierbare Bauelemente für Smart-Power IC-Prozesse mit einer Spannungsfestigkeit $< 100\text{V}$ für Produkte zum Einsatz in der Automobilelektronik sowie mit einer Spannungsfestigkeit von ca. 600V für Anwendungen an 230V Netzwechselfspannung dar. Die Charakterisierung des Bauelementverhaltens und die Designoptimierung erfolgen durch numerische Device- und Prozesssimulation sowie experimentelle Funktionsanalyse. Die Realisierung von Bauelementen und Teststrukturen erfolgt in einfachen Fällen mit den technologischen Einrichtungen des Lehrstuhls, bei komplexeren Bauelementstrukturen bzw. Gesamtprozessarchitekturen in Zusammenarbeit mit industriellen Partnern.

6.1.4. Technologie- und Bauelementesimulation

Ansprechpartner: Dr.-Ing. Dipl.-Phys. Dipl.-Math. Jürgen Lorenz (FhG IIS-B)

Im Arbeitsgebiet Technologiesimulation werden leistungsfähige Simulationsprogramme zur Optimierung von Einzelprozessen und Prozessfolgen in der Halbleitertechnologie entwickelt. Zu diesem Zweck entwickelt und verbessert die Arbeitsgruppe Modelle für die Prozessschritte Ionenimplantation, Diffusion, Oxidation, Lithographie, Ätzen und Schichtabscheidung. Die benötigten Modelle und ihre Parameter werden aufgrund von experimentellen Untersuchungen aufgestellt und evaluiert. Daneben werden insbesondere für die dreidimensionale Prozesssimulation benötigte spezielle Algorithmen entwickelt und zusammen mit den Modellen in leistungsfähigen Simulationsprogrammen implementiert. Diese Programme werden von der Halbleiterindustrie sowie dem LEB, dem FhG IIS-B und anderen Forschungsinstituten zur schnellen und kostengünstigen Entwicklung von Technologieschritten und Bauelementen eingesetzt. Zunehmende Bedeutung kommt den Arbeiten zu nichtidealen Prozessen zu. Die Aktivitäten im Arbeitsgebiet wurden in letzter Zeit insbesondere hinsichtlich der Lithographiesimulation ausgebaut.

6.1.5. Halbleiterfertigung

Ansprechpartner: Dr.-Ing. Lothar Pfitzner (FhG IIS-B)

Im Arbeitsgebiet Halbleiterfertigung werden Firmen bei der Entwicklung und Verbesserung neuer Fertigungsgeräte, Materialien und der damit verbundenen Prozesse bis hin zur Implementierung in die Produktion unterstützt. Dabei wird besonderer Wert auf Fragen der Prozesskompatibilität mit anderen Fertigungsschritten, der Reduzierung von Kontamination durch Medien, Werkstoffe und Prozesse sowie der Sicherheit gelegt. Der Verbesserung von Prozessreproduzierbarkeit und -zuverlässigkeit dienen Entwicklung und Einsatz von Verfahren der integrierten Messtechnik und Prozessautomatisierung, besser bekannt unter den Fachbegriffen "*Integrated Metrology*" und "*Advanced Process Control (APC)*". Die Gerätevorkalibrierung oder "Equipment Assessment" unter Nutzung von industriekompatiblen Prozessen und Charakterisierungsverfahren reduziert das Risiko beim Einsatz der neu entwickelten Geräte und Prozesse in den Fertigungslinien der Halbleiterindustrie. Neben den oben genannten Forschungsschwerpunkten dient auch das neu hinzugekommene Arbeitsgebiet "*Wafer Reclaim*" besonders der Reduzierung der Kosten in der Halbleiterfertigung und erschließt ein attraktives neues Feld unter optimaler Nutzung von Synergieeffekten.

6.1.6. Leistungselektronische Systeme

Ansprechpartner: Dr.-Ing. Martin März (FhG IIS-B)

Das Arbeitsgebiet "Leistungselektronische Systeme" befasst sich mit der Schaltungs- und Systementwicklung für alle Felder der Leistungselektronik mit Fokus auf die Automobil- und Industrieelektronik. Wir unterstützen Firmen in der anwendungsorientierten Vorlauforschung sowie bei der Entwicklung von Prototypen und Kleinserien.

Einen Schwerpunkt unserer Arbeiten bilden Systeme zur effizienten Umwandlung elektrischer Leistung, wie Schaltnetzteile oder Umrichter, im Leistungsbereich von wenigen Watt bis zu mehreren zehn Kilowatt. Themen sind hier z.B. Ansteuerschaltungen für Leistung-MOSFET und IGBT, digitalisierbare Steuerverfahren sowie die elektrische und thermische System-Charakterisierung und -Modellierung.

Einen weiteren Schwerpunkt bildet die mechatronische Systemintegration, d.h. die Integration von Halbleiterbauelementen, passiven Komponenten, Sensorik und Mechanik. Beispielhaft hierfür sind intelligente energiesparende Kleinantriebe für den Einsatz im Haushalts- und In-

dustriebereich. Für die Arbeiten stehen modernste Mess- und Charakterisierungseinrichtungen sowie umfangreiche EDA-Tools zur Verfügung.

6.2. Beispiele aus der Forschung

6.2.1. Untersuchung des Aktivierungs- und Diffusionsverhaltens von Bor in polykristallinen SiGe-Gate-Elektroden für MOS-Transistoren

DFG-Vorhaben RY 1/19-1 (LEB) bzw. EI 234/5-1 (UniBw München)

(Dipl.-Phys. Oliver Krause)

Höhere Integrationsdichten und schnellere Schaltungsgeschwindigkeiten sind die Gründe für die Reduzierung der Strukturbreiten in der CMOS-Technologie. In Generationen mit Strukturbreiten von 0,25 μm und kleiner werden n- und p-leitende Gate-Elektroden mit unterschiedlicher Austrittsarbeitsdifferenz eingesetzt. Mit dieser Technologie lassen sich symmetrisch dotierte n- und p-Kanaltransistoren herstellen. Die dabei verwendeten Gate-Oxide besitzen Dicken von 6,0 nm bis 1,5 nm. An PMOS Bauelementen zeigt sich mit der Skalierung verstärkt das Problem der Bor-Diffusion aus der p-Typ Gate-Elektrode durch das Gate-Oxid in den Kanal des MOS-Transistors. Dadurch wird eine unerwünschte Verschiebung und Streuung der Einsatzspannung erzeugt. Besonders deutlich wird das Problem bei Gate-Oxiddicken unter 4 nm und einer aus technischen Gründen erwünschten BF_2 -Implantation anstelle einer einfachen Bor-Implantation. Um Maskenebenen und damit Kosten zu sparen, werden die Source/Drain-Gebiete und das Gate in einem Implantationsschritt dotiert. Da BF_2 ein größeres Molekül ist, erreicht man bei gleicher Implantationsenergie flachere pn-Übergänge in den Source/Drain-Gebieten und damit reduzierte Kurzkanaleffekte in den Bauelementen. Bei dieser Art der Implantation gelangt auch Fluor in das Gate. Fluor erhöht deutlich die Diffusion von Bor aus dem Gate in den Kanal. Stickstoff, der in einem bestimmten Konzentrationsbereich in die Gate-Elektrode oder an der Grenzschicht zum Gate-Oxid eingebaut wird, zeigt die Möglichkeit einer Verringerung der Bor-Diffusion. Um die Bor-Diffusion deutlich unterbinden zu können, sind hohe Stickstoffmengen notwendig. Dadurch können die Bauelementeeigenschaften wie Ladungsträgerbeweglichkeit im Kanal und der Widerstand des Gate-Oxids für heiße Elektronen beeinflusst werden.

Eine weitere Möglichkeit die Bor-Diffusion zu reduzieren, ist die Erniedrigung der Aktivierungstemperatur. Bei Poly-Silicium als Gate erreicht man dadurch jedoch eine nicht ausreichende Aktivierung der Dopanden. Dies führt zu einer Erhöhung des elektrischen Widerstandes des Gates, was die Schaltgeschwindigkeit limitiert, aber vor allem zu einer Verarmung von elektrisch aktiven Dopanden an der Grenzschicht Gate/Oxid und damit zu einer Verschiebung der Einsatzspannung. Abhilfe hiervon kann durch die Verwendung von polykristallinen Silicium-Germanium-Schichten erzielt werden: Polykristallines SiGe zeigt eine hohe Aktivierung von Dopanden bei geringen Aktivierungstemperaturen. Deshalb ist polykristallines SiGe als Gatematerial mit niedrigerem Serienwiderstand, höheren Elektronenbeweglichkeiten und geringerer Gate-Verarmung als Ersatz für Poly-Silicium hervorragend geeignet. SiGe ist auch kompatibel zur CMOS-Technologie. Jedoch sind für polykristallines SiGe nur geringe Kenntnisse über die Aktivierung und das Diffusionsverhalten von Dotierstoffen vorhanden.

Im dem am Lehrstuhl für Elektronische Bauelemente in Zusammenarbeit mit der Universität der Bundeswehr München durchgeführten Projekt soll untersucht werden, ob durch die Verwendung einer polykristallinen SiGe-Gate-Elektrode eine Aktivierung der Dotierstoffe bei geringeren Temperaturen als im reinen Silicium möglich ist und damit das Diffusionsverhalten unterbunden werden kann: Zunächst wurde ein Prozess zur Herstellung polykristalliner

SiGe-Schichten in verschiedenen Stöchiometrien durch die chemische Gasphasenabscheidung bei niedrigen Drücken entwickelt. Anschließend werden MOS-Strukturen zur elektrischen Charakterisierung mit 3 nm dicken Gate-Oxiden sowie polykristallinen SiGe-Gate-Elektroden in verschiedenen Stöchiometrien hergestellt. Die Gate-Elektroden werden mit Bor durch Ionenimplantation dotiert und anschließend ausgeheilt. An den so entstandenen Bauelementen werden Kapazitäts-/Spannungsmessungen durchgeführt. Daraus werden Einsatzspannung, Oxidladungen und Grenzflächenzustandsdichte berechnet und mit Bauelementen mit herkömmlichen Poly-Si-Elektroden verglichen. Durch Strom-/Spannungsmessungen, Konstantstrominjektion und Konstantspannungsstress wird die Zuverlässigkeit der MOS-Kapazitäten beurteilt werden können. Durch Messung der Bor-Dotieratomprofile mit Sekundärionenmassenspektroskopie lassen sich Aussagen über das Diffusionsverhalten von Bor in Poly-SiGe und die Verarmung der Gate-Elektrode bzw. die Diffusion durch dünne Gate-Oxide machen.

Ziel des Projektes ist die Untersuchung des Aktivierungs- und Diffusionsverhaltens von Bor in poly-SiGe-Schichten und dünnen Oxiden. Diese Arbeit sollen folgende technologische und physikalische Fragestellungen klären: Ist eine möglichst vollständige Aktivierung der Bor-Dotierung in Poly-SiGe bei geringerem Temperaturbudget als in Poly-Silicium möglich? Wie verändert sich das Diffusionsverhalten gegenüber polykristallinem Silicium? Lässt sich ein qualitatives und quantitatives Modell für die Aktivierung und Diffusion erstellen? Über welche Mechanismen findet die Diffusion in Poly-SiGe statt, welche Werte haben die Diffusionskonstanten?

6.2.2. Diffusion von Aluminium im Silicium-Siliciumdioxid-System und Wechselwirkung von Aluminium mit Sauerstoff

DFG-Vorhaben RY 1/18-2

(Dipl.-Phys. Oliver Krause)

Die Komplexität moderner Leistungshalbleiter bedingt, dass in Zukunft in immer zunehmendem Maße Simulationsprogramme zur Entwicklung und Optimierung eingesetzt werden. Bei der Entwicklung von neu konzipierten Bauelementen lässt sich durch Simulation das elektrische Verhalten vorhersagen und mögliche Varianten können auf die erfolgversprechendsten Konzepte reduziert werden. Bei der Optimierung von Bauelementeeigenschaften ist es möglich, den Einfluss von Prozessvariationen ohne aufwendige Versuchsreihen zu studieren. Wie bereits in der Mikroelektronik gezeigt wurde, lassen sich durch den Einsatz von Simulationswerkzeugen die Entwicklungskosten und -zeiten drastisch senken. Die Entwicklung physikalisch basierter Modell ist deshalb eines der Ziele dieser Arbeit.

Grundlage für eine aussagekräftige Simulation der elektrischen Eigenschaften von Leistungshalbleitern ist eine ausreichend genaue Simulation der Umverteilung von Dotieratomen während des Herstellungsprozesses. Aluminium wird als das am schnellsten diffundierende Akzeptorelement sowohl zur Herstellung von konventionellen Leistungsbaulementen mit Eindringtiefen von über 100 μm als auch für neuere Anwendungen mit Eindringtiefen von bis zu einigen μm eingesetzt, um Prozesszeiten und damit die thermische Belastung des Bauelements zu minimieren. Doch gerade die Diffusion von Aluminium, das in der Mikroelektronik aufgrund seines hohen Diffusionskoeffizienten und seiner im Vergleich zu Bor geringeren Löslichkeit keine Verwendung findet, ist jedoch bisher nicht ausreichend genau untersucht, um die Entwicklung solcher Bauelementkonzepte durch die Prozesssimulation zu unterstützen.

In den bisher am Lehrstuhl für Elektronische Bauelemente durchgeführten Arbeiten zur Untersuchung der Diffusion von Aluminium in Silicium wurde die intrinsische Diffusion unter

anderem in dem bisher nur wenig betrachteten Temperaturbereich unter 1000 °C untersucht. Erstmals wurde der Diffusionsmechanismus von Aluminium umfassend untersucht. Hier wurde festgestellt, dass Aluminium nahezu vollständig als Aluminium-Silicium-Eigenzwischengitteratom-Paar diffundiert. Weiterhin wurde das Diffusionsverhalten von Aluminium unter extrinsischen Diffusionsbedingungen untersucht. In extrinsisch akzeptordotiertem Silicium kommt es zu einer starken Beschleunigung der Diffusion durch die Generierung von geladenen Aluminium-Silicium-Eigenzwischengitteratom-Paaren, verursacht durch Verschiebungen des Fermi-Niveaus. In extrinsisch phosphordotiertem Silicium kommt es zu einer drastischen Verlangsamung der Diffusion von Aluminium. Die Diffusionsretardierung wird durch Veränderungen in der Anzahl der geladenen Aluminium-Punktdefekt-Paare durch Fermi-Niveau-Effekte und durch die Bildung von Aluminium-Phosphor-Ionenpaaren verursacht.

Jedoch wurde bisher ausschließlich die Diffusion von Aluminium in Silicium betrachtet. Für eine vollständige Unterstützung der Entwicklung von neuen Leistungsbau-elementen, bei deren Fertigung in der Regel nicht auf Oxidationsprozesse verzichtet wird, muss jedoch auch die Interaktion von Aluminium mit Sauerstoff und Siliciumdioxidschichten quantitativ verstanden sein. In den laufenden Untersuchungen wird deshalb die Diffusion von Aluminium im Silicium-Siliciumdioxid-System sowie die Wechselwirkung von Aluminium mit Sauerstoff betrachtet.

Diffusion von Aluminium in Siliciumdioxid und Segregation an der Silicium/Siliciumdioxid-Grenzfläche

Der Diffusionskoeffizient von Aluminium in Siliciumdioxid wurde bisher nur in einer Arbeit bei einer Temperatur von 1200 °C untersucht. Hier soll ein breiteres Temperaturspektrum betrachtet werden. An der Si-SiO₂-Grenzfläche wird Siliciumdioxid von Aluminium zu Aluminiumoxid und Silicium reduziert. Dies führt zu hohen Aluminiumverlusten bei den Diffusionsschritten, die den Vorbelegungen oder der Ionenimplantation nachfolgen. Der Segregationskoeffizient an einer Si-SiO₂-Grenzfläche wird für Aluminium üblicherweise mit einem Wert von ca. 10⁴ angegeben. Aus den Transportkoeffizienten (Produkt aus Diffusionskoeffizienten und Konzentration) von Aluminium in Siliciumdioxid und Silicium lässt sich unter inerten Diffusionsbedingungen mit einer stationären Grenzfläche auf Siliciumdioxid als sehr gute Diffusionsbarriere für Aluminium schließen. Dies konnte aber in den bisherigen Arbeiten nicht festgestellt werden. Dies deutet darauf hin, dass die in der Literatur berichteten Werte für Diffusionskoeffizienten und Segregationskoeffizient zu niedrig sind. Zum Segregationsverhalten von Aluminium an der Si-SiO₂-Grenzfläche während der thermischen Oxidation sowie zur Diffusion von Aluminium in Siliciumdioxid werden weitere Untersuchungen durchgeführt, um diese Fragestellungen zu klären.

Wechselwirkung von Aluminium mit in Silicium gelöstem Sauerstoff

Weitere Untersuchungen betreffen die Interaktion zwischen Aluminium und Sauerstoff in Silicium. Zwar war schon bei Vorbelegungen durch Eindiffusion bekannt, dass Sauerstoff die elektrische Aktivierung beeinflussen kann. Erhebliche Probleme begannen jedoch mit der Anwendung der Ionenimplantation. Implantiertes Aluminium führt in Czochralski-gezogenem (CZ) Silicium in Vergleich zu zonengezogenem (FZ) Silicium zu einer hohen elektrisch nicht aktiven Komponente des implantierten Aluminiums und es wurde daraus geschlossen, dass die Implantationsschäden einen katalytischen Effekt auf die Bildung von Aluminium-Sauerstoff-Komplexen haben. Verschiedene Autoren berichteten, dass in CZ Silicium implantiertes Aluminium nur zu einem geringen Anteil elektrisch aktiviert werden konnte. Sie schlossen aus ihren Beobachtungen, dass Aluminiumpräzipitate durch den in CZ Silicium gelösten Sauerstoff stabilisiert werden. Andererseits konnten bei Aluminiumvorbelegungen

durch Eindiffusion bei Temperaturen von 1200 °C keine Unterschiede zwischen FZ und CZ Silicium festgestellt werden.

In den hier durchgeführten Untersuchungen werden zum einen weit niedrigere Temperaturen als in anderen Untersuchungen verwendet, da die Anzahl der Komplexe bei gegebener Bindungsenergie exponentiell mit der Temperatur abnimmt, zudem wird eine räumliche Trennung von Implantationsschäden und dem in Silicium gelösten Sauerstoff vorgenommen.

6.2.3. CVD-Prozesse mit neuartigen metallorganischen Precursoren zur Herstellung von hoch- ϵ Gatedielektrika und metallischen Gateelektroden zukünftiger CMOS-Generationen

DFG-Vorhaben Ry 1/21-1

(Dipl.-Ing. Martin Lemberger)

Einleitung

Im Bereich der „complementary metal-oxide-semiconductor“ (CMOS) integrierten Schaltungen besitzt die Silicium-basierte Mikroelektronik eine marktführende Position. Durch die rasante Technologieentwicklung der vergangenen Jahre war sie in der Lage, mehrere Anforderungen, etwa höhere Schaltgeschwindigkeiten oder geringe Verlustleistungen im ausgeschalteten Zustand, gleichzeitig zu erfüllen. Dies kam auch dadurch zustande, dass man die Fähigkeit entwickelte, die Abmessungen des fundamentalen Bauelements, des Feld-Effekt-Transistors, in einer vorherberechneten Weise zu verringern.

Mit entscheidend für diese Entwicklung waren die Material- und damit die elektrischen Eigenschaften der verwendeten Isolatorschicht zwischen Gateelektrode und Kanal: Siliciumdioxid (SiO_2). Siliciumdioxid wird seit Jahrzehnten verwendet und dessen Eigenschaften wurden hinlänglich untersucht. Mit der aktuellen 0,13 μm -Technologiestufe, die eine Gateoxid-dicke von 1,5 nm bis 1,9 nm besitzt, gelangt man jedoch in einen Bereich, in dem Zuverlässigkeitsaspekte, Leckströme oder auch eine Bordiffusion durch das Gateoxid eine Rolle spielen. Wenn man in der Skalierung zu kleineren Bauelementen fortfahren will, wird es daher in naher Zukunft unumgänglich sein, Siliciumdioxid als Dielektrikum zu ersetzen.

Da Siliciumdioxid herausragende Eigenschaften besitzt, werden an alternative Gatedielektrika hohe Anforderungen gestellt. Die Forderung nach einer höheren Dielektrizitätskonstanten (ϵ) als Siliciumoxid ist offensichtlich, wobei jedoch Abwägungen im Hinblick auf die Barrierenhöhen getroffen werden müssen, da diese den Tunnelstrom durch den Isolator beeinflussen. In diesem Zusammenhang sind amorphe Schichten wünschenswert, bei denen Leckstrompfade zwischen Gateelektrode und Kanal, wie sie bei kristallinen Schichten entlang von Korngrenzen vorhanden sind, vermieden werden. Da das Ziel effektive Oxiddicken von weniger als 1 nm sind, sollten neue Materialien in direktem Kontakt zu Silicium thermisch stabil sein. Ansonsten wären Barrierschichten notwendig, die zum einen den Gesamtherstellungsprozess erschweren und zum anderen die effektive Dielektrizitätskonstante des Schichtsystems wiederum deutlich erniedrigen. Ebenso darf nicht außer Acht gelassen werden, dass die Abscheidungsprozesse der Dielektrika kompatibel zum Standard-CMOS-Herstellungsprozess bleiben sollen, was beispielsweise Kosten und Durchsatz angeht. Ein weiteres und entscheidendes Kriterium ist die strikte Forderung nach einer hohen Zuverlässigkeit der Dielektrika.

Zielsetzung des Projekts

Da die metallorganische chemische Dampfphasenabscheidung („metal organic chemical vapor deposition“, MOCVD) ein vielversprechender Weg zur Herstellung von hoch- ϵ Gatedielektrika ist und noch keine industrietauglichen Prozesse existieren, kommt der Entwick-

lung neuartiger und verbesserter Precursoren eine Schlüsselrolle zu. Darüber hinaus ist nicht jeder Precursor, der Schichten liefert, die den Anforderungen in einfachen Bauelementen genügen, auch geeignet für Produktionsanlagen in der Siliciumtechnologie oder den Einsatz in dem komplizierten Schichtsystem einer CMOS-Schaltung. Erst die Kombination von hoch- ϵ Gatedielektrika und metallischen Gateelektroden erfüllt die Herausforderungen zukünftiger CMOS-Generationen. In diesem Projekt werden neuartige Precursormaterialien zur Abscheidung von hoch- ϵ Gatedielektrika, wie Zirkonsilikate (ZrSi_xO_y) und Hafniumsilikate (HfSi_xO_y), und metallischen Gateelektroden, wie die Nitride von Ti, Ta und Mo entwickelt, auf ihre Grundeigenschaften und Verwendbarkeit bei der Herstellung von Silicium-Halbleiterbauelementen getestet und verfahrenstechnisch optimiert. Dabei wird das Zusammenspiel von neuartiger Precursorchemie und Gasphasenchemie auf Siliciumoberflächen erforscht und die gewonnenen Schichtsysteme anhand von MOS-Bauelementen charakterisiert.

MOCVD von Zirkon- und Hafniumsilikaten

Precursorherstellung und Charakterisierung

Die Precursoren für die MOCVD-Abscheidung von Zirkon- bzw. Hafniumsilikat wurden am Lehrstuhl für Oberflächentechnik, Departement Werkstoffe der Eidgenössischen Technischen Hochschule (ETH) Zürich hergestellt. Aufgrund früherer Erfahrungen auf diesem Gebiet entschied man sich, die Entwicklung von Molekülen mit einer mittleren Koordinationszahl von sechs zu verfolgen, was einen guten Kompromiss zwischen Flüchtigkeit und Feuchteempfindlichkeit der Precursorchemie darstellt. Eine allgemeine Strukturformel für die erlangten Precursoren lautet $\text{M}^{\text{IV}}(\text{acac})_n(\text{OSiRR}'\text{R}'')_{4-n}$. Hierbei steht M^{IV} für Zirkon (Zr) bzw. Hafnium (Hf), acac für eine Acetylacetonato-Gruppe und R, R' und R'' für organische Gruppen. Die hergestellten Precursoren, bei Raumtemperatur Feststoffe, wurden eingehend untersucht, was etwa ihre Ausbeute bei der Herstellung (bis zu 80 %), ihre Reinheit (größer 99 %) oder ihren Dampfdruck anbelangt.

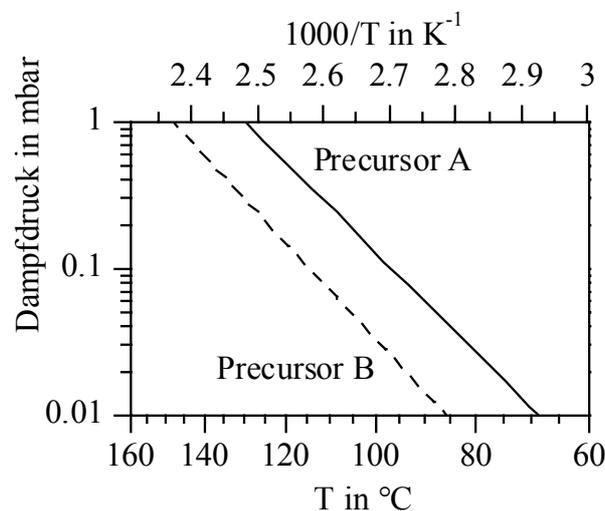


Abb. 6.1: Exemplarisch für zwei unterschiedliche Zirkonprecursoren dargestellte Dampfdruckkurven. Dampfdrücke größer als 0,2 mbar werden für Temperaturen kleiner als 130 °C erreicht, die gut im Arbeitsbereich von CVD-üblichen Verdampfersystemen liegen.

Exemplarisch sind in Abb. 6.1 Dampfdruckkurven von zwei unterschiedlichen Zirkonprecursoren dargestellt. Es zeigt sich, dass Dampfdrücke größer etwa 0,2 mbar bei moderaten Temperaturen kleiner 130 °C erreicht werden können, was sehr gut in dem Bereich üblicher CVD-Verdampfersysteme liegt. Anhand erster Abscheidungen in einem Versuchsreaktor für 1^{er} Wafer an der ETH Zürich konnte gezeigt werden, dass sich der Bereich einer kinetischen Ab-

scheidung, je nach Precursor, zwischen 400 °C und 600 °C bewegt, und somit im Rahmen üblicher CVD-Temperaturen liegt.

Der MOCVD-Reaktor am LEB

Um den Transfer des Abscheidungsprozesses auf einen industrienahen CVD-Reaktor des Lehrstuhls für Elektronische Bauelemente möglichst einfach zu gestalten, wurde ein zum Forschungsreaktor in Zürich vergleichbares Gaszuführsystem aufgebaut. Hierbei handelt es sich um ein "Bubbler"-System, bei dem ein Trägergas (Argon) über einen beheizten Topf mit Chemie fließt und so den Precursor direkt in die Prozesskammer führt. Der CVD-Reaktor ist ausgelegt für die Beschichtung von 150 mm und 200 mm Wafern. Zur Verbesserung der Schichtdickenhomogenität über der Scheibe besitzt der Reaktor eine rotierende Wafereaufnahme. Erste Abscheidungen mit einem Zirkonprecursor verliefen vielversprechend. Um einen

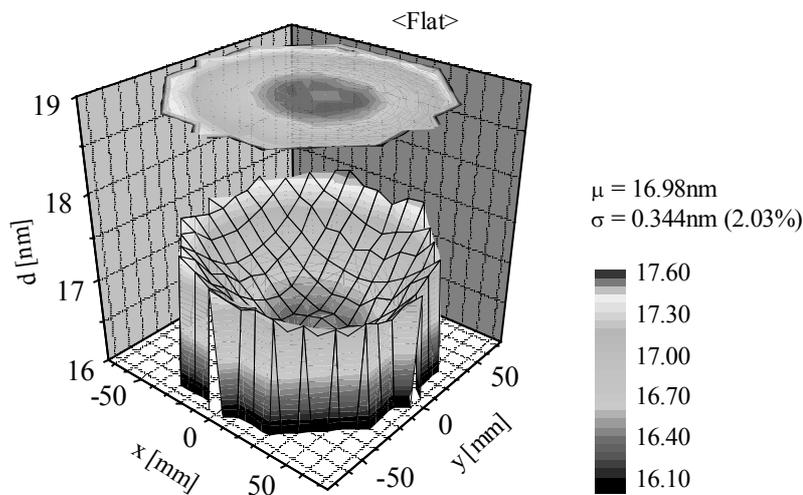


Abb. 6.2: Ellipsometrisch ermittelte Dicke der Zirkonsilikatschicht eines 150 mm Wafers. Deutlich ist der Einfluss der Scheibenrotation während der Abscheidung zu sehen.

besseren Einblick in die Abscheidkinetik und auf den Einfluss unterschiedlicher Abscheidungs- und Anlagenparameter, wie Gasflüsse, Druck oder Rotationsgeschwindigkeit, zu erlangen, wurden zunächst dickere Schichten abgeschieden. So ist in Abb. 6.2 die mittels eines Ellipsometers bestimmte Schichtdicke über einen 150 mm Wafer dargestellt, wobei der Einfluss der Rotation gut zu erkennen ist.

Charakterisierung der abgeschiedenen Schichten

Hierbei wurden sowohl an der ETH Zürich und am LEB hergestellte Proben untersucht. Eine quantitative Untersuchung der Schichtzusammensetzungen mittels Röntgen-Photoelektronenspektroskopie (XPS) zeigt, dass Silicium nur teilweise in die Filme eingebaut wurde. Empirisch kann man, abhängig von Precursor und Prozessparametern, eine Schichtzusammensetzung von $M_{1-x}Si_xO_2$ angeben, wobei x im Bereich von 0,05 bis 0,25 liegt und M für Zr bzw. Hf steht. Ebenso abhängig von Precursor und Abscheidungsbedingungen wurden unterschiedliche Konzentrationen (bis einige at-%) an Kohlenstoff gefunden. Kohlenstoff ist insofern kritisch, da die abgeschiedenen Schichten als Dielektrikum dienen und Kohlenstoff elektrisch leitfähig ist. Eine Messung des Tiefenprofils mittels Sekundär-Neutralteilchen-Massenspektroskopie (SNMS) zeigt eine relativ homogene Schichtzusammensetzung. Die Strukturanalyse einer bei 575 °C abgeschiedenen Zirkonsilikatschicht mittels Röntgenbeugung (XRD) zeigt allerdings, dass die Schicht nanokristallines kubisches Zirkondioxid enthält.

Elektrische Charakterisierung

Zur elektrischen Charakterisierung der dielektrischen Schichten wurden die Proben zunächst bei 900 °C für 10 s in Sauerstoffatmosphäre getempert. Anschließend wurde Aluminium durch eine Schattenwurfmaske aufgedampft. Eine Formiergastemperung fand nicht statt. Die Kapazitäts-Spannungs- (CV) und Strom-Spannungs- (IV) Messungen wurden an MOS-Strukturen unterschiedlicher Größe durchgeführt. Aus den Kapazitätswerten in Akkumulation wurden effektive Oxiddicken errechnet, aus denen sich in Relation zu den physikalischen Schichtdicken die relativen Dielektrizitätskonstanten ermitteln lassen. So ergaben sich für unterschiedliche Precursoren ϵ -Werte von etwa 9 bis 15. Abb 6.3 zeigt exemplarisch CV- und IV-Kennlinien einer Zirkonsilikatprobe, an denen einige Besonderheiten kurz angesprochen werden sollen. Zwischen den Vorwärts- und Rückwärtskennlinien der CV-Messungen ist eine deutliche Verschiebung zu beobachten. Auch eine Verschiebung der Kennlinien von Messung zu Messung ist zu sehen, etwa +0,2 V von der ersten bis zur zehnten Messung. Dies ist ein Zeichen dafür, dass während der Messung negative Ladungen im Dielektrikum aufgebaut werden. Die Änderung der Ladung in der dielektrischen Schicht ist auch anhand der IV-Messungen zu sehen, wobei der Messablauf wie folgt war. Zunächst wurden mehrere Messungen in Akkumulation (1.) durchgeführt, wobei sich die erste (durchgezogene Linie) von nachfolgenden Kennlinien (gestrichelte Linien) unterscheidet. Die nachfolgenden Kennlinien fallen zusammen und sind gegenüber der ersten zu negativen Spannungen hin verschoben. Eine Änderung der Polarität der angelegten Spannung, Inversion (2.), zeigt ein vergleichbares

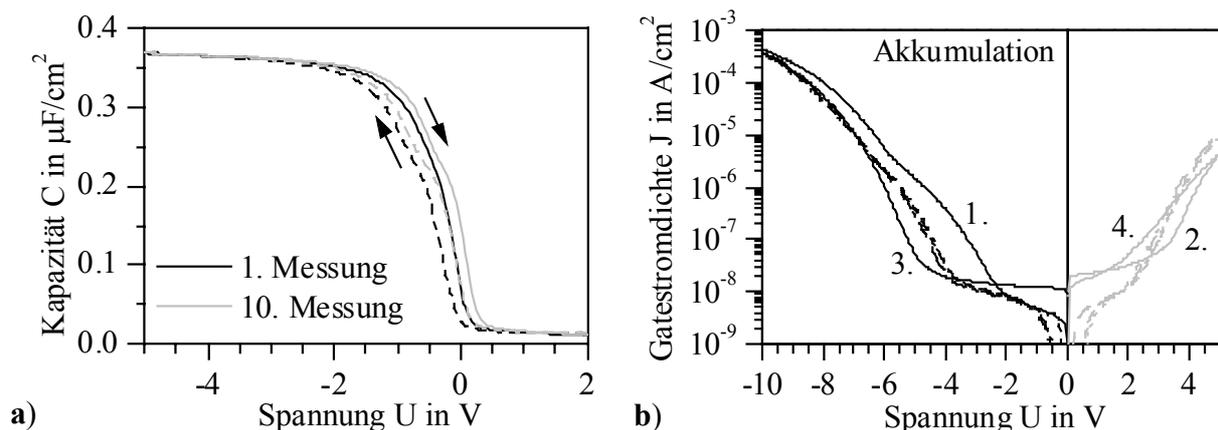


Abb. 6.3: Elektrische Messungen an einer Zirkonsilikatprobe auf p-Substrat. a) Kapazitäts-Spannungs-Messungen. b) Strom-Spannungs-Messungen. Aus beiden ist ersichtlich, dass Ladungen in der Silikatschicht eine Rolle spielen.

Ergebnis. Bei einem zweiten Satz Messungen in Akkumulation (3.) und Inversion (4.) erhält man neue, sozusagen „erste“ Kennlinien und alle nachfolgenden fallen mit den letzteren Kennlinien des jeweils ersten Messsatzes zusammen. Wie bei den CV-Messungen angesprochen, ist möglicherweise der Aufbau negativer Ladungen im Dielektrikum die Ursache dieses Verhaltens.

Ausblick

Aktuelle Arbeiten haben zum Ziel, den Abscheidprozess mit allen Precursoren auf dem industriennahen CVD-Reaktor des LEB durchzuführen. Weitere Untersuchungen beschäftigen sich mit dem Ausheilverhalten hinsichtlich Ladungen, der Charakterisierung der Grenzflächen, der Ätzbeständigkeit der Schichten und neuer Gateelektroden, was ein zweiter Schwerpunkt des Projekts ist.

6.2.4. FOROB II: Chemische Dampfphasenabscheidung von Schichten hoher Dielektrizitätskonstanten am Beispiel Barium-Strontium-Titanat

Bayerischer Forschungsverbund für Oberflächen-, Schicht- und Trocknungstechnik
(Dipl.-Phys. Trixi Leistner)

Im Rahmen des Projektes sollten Abscheideprozesse zur Erzeugung des hoch- ϵ Schichtsystems Barium-Strontium-Titanat und der medium- ϵ Schicht Titanoxid mittels chemischer Dampfphasenabscheidung unter Verwendung geeigneter, im Laufe des Projektes angepasst entwickelter metallorganischer Ausgangsmaterialien stattfinden. Zur Verfügung stand ein horizontalliegender Kaltwandreaktor für Einzelscheibenprozesse. Außerdem wurde ein neuer Reaktor mit Rotation und Showerhead aufgebaut. Es sollte eine den Ausgangsmaterialien angepasste Schichtentwicklung stattfinden, wobei die Untersuchung der Schichteigenschaften eine umfassende Schichtcharakterisierung in Wechselwirkung mit der Optimierung der Abscheideprozesse beinhaltet. Vorrangige Eigenschaften der Substanzen sollten ein genügend hoher Dampfdruck bei weitest gehender thermischer Stabilität sein, so dass die Zersetzung der Substanz überwiegend an der Oberfläche stattfindet. Zu den besonders kritischen Eigenschaften gehört vor allem die Kontrolle der Hydrolysestabilität der Precursoren. Da die Synthese der Barium- und Strontiumprecursoren unerwartete Probleme bereitete, wurden ausschließlich TiO_2 -Schichten auf der Basis von drei neuartig entwickelten Precursoren hergestellt und charakterisiert. Diese liefern gegenüber den konventionell vorhandenen Precursoren deutlich verbesserte Abscheideresultate. In diesem Zusammenhang wurden Experimente mit unterschiedlichen Temperaturen, Drücken und Gaszusammensetzungen durchgeführt.

Herstellung und Charakterisierung von Schichten aus neuentwickelten Precursoren

Neben dem handelsüblichen Precursor Titan-*i*-propoxid $\text{Ti}(\text{OC}_3\text{H}_7)_4$ (im folgenden als Ti0 bezeichnet) wurden drei neuartige Verbindungen $\text{Ti}(\text{OC}(\text{CH}_3)_2\text{CH}_2\text{OCH}_3)_4$ (als Ti1 bezeichnet), $\text{Ti}(\text{OC}(\text{CH}_3)_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CH}_3)_4$ (als Ti2 bezeichnet) und $\text{Ti}(\text{OC}(\text{CH}_3)_2\text{CH}_2\text{CH}_3)_4$ (als Ti3 bezeichnet) verwendet. Es wurde für die Abscheidung ein Druckbereich zwischen 0,3 mbar und 1,5 mbar gewählt, wobei die Untergrenze durch die Bauart des Reaktors bestimmt wird. Die Experimente wurden bei Temperaturen in einem Bereich zwischen 280 °C und 400 °C durchgeführt. Die flüssigen Chemikalien wurden mittels thermischer Massenflussregler dosiert und unter dem Zusatz von Stickstoff als Trägergas in einem Verdampfer in die Gasphase überführt, um dann mittels einer ebenfalls beheizten Leitung in den Reaktor eingeleitet zu werden. Unter dem Zusatz von Sauerstoff findet in der Reaktorkammer die Abscheidung statt. Unterhalb von 280 °C ist nur eine sehr geringe Aufwachsrate zu beobachten, da in diesem Temperaturbereich nur ein kleiner Anteil des verdampften Precursors tatsächlich auf dem Wafer eine chemische Reaktion erfährt. Ein Großteil der Substanz wird unverbraucht in die Abluft geleitet. Bei Temperaturen über 380 °C bei Ti1 und Ti0 und über 340 °C bei Ti2 und Ti3 reagiert der Großteil des Precursors schon vor Erreichen der Waferoberfläche. Es kommt zu einer kompletten Verarmung der dem Gasfluss abgewandten Waferseite.

Tab. 6.1: Aktivierungsenergien und -temperaturen der Precursoren.

Precursor	Ti0	Ti1	Ti2	Ti3
Aktivierungsenergie	1.2 eV	0.95 eV	0.87 eV	0.97 eV
Verdampfungstemperatur	90 °C	135 °C	120 °C	120 °C

Die Precursoren unterscheiden sich sowohl in ihrer Abscheidetemperatur als auch in der Aktivierungsenergie und in der Reaktionskinetik (siehe Abb. 6.4). Während Ti0 bei einer Temperatur von 90 °C verdampft, wurden für Ti2 und Ti3 120 °C und für Ti1 sogar 135 °C benötigt. Die Aktivierungsenergien E_A werden aus den Steigungen der unten abgebildeten Geraden ermittelt. Die aufgeschlüsselten Ergebnisse sind in Tab. 6.1 zusammen mit den Verdampfungstemperaturen der Precursoren aufgelistet.

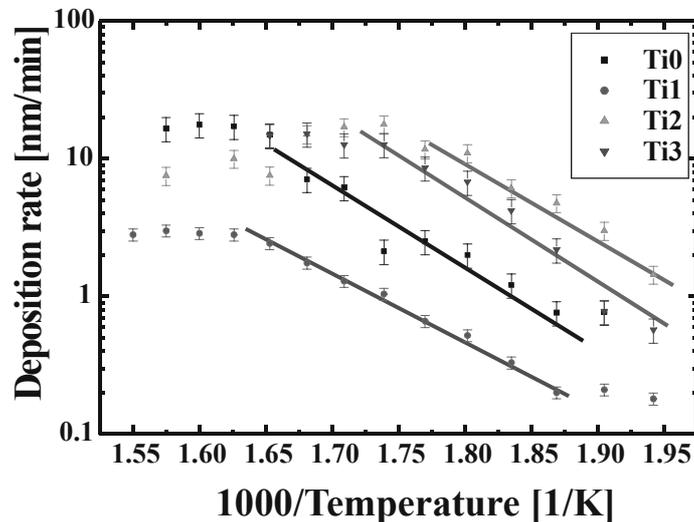


Abb. 6.4: Darstellung der Abscheideraten der verschiedenen Precursoren in Abhängigkeit von der inversen Temperatur im Vergleich.

Sowohl die Schichthomogenität als auch die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse sind bei Ti1 und Ti3 am besten, wohingegen vor allem bei Ti2 eine geringe Schichthomogenität zu beobachten war. Die Abscheideraten unterscheiden sich bei den verschiedenen Precursoren wesentlich. Während bei Ti0 die maximale Rate bei 380 °C ca. 17,2nm/min beträgt, erreicht sie bei Ti1 einen Wert von 2,8nm/min, bei Ti2 von 10,1nm/min und bei Ti3 einen Wert von 14,8nm/min bei 370 °C. Die Schichthomogenität über den Wafer ist bei niedrigen Raten deutlich höher. Die optimalen Gasflüsse für Ti0 während des Prozesses betragen 150sccm für Stickstoff, welcher als Trägergas verwendet wird, und 100sccm für Sauerstoff. Beim Precursor Ti1 haben sich 200sccm Stickstoff und 100sccm Sauerstoff bewährt, während bei Ti2 und Ti3 aufgrund der Flüchtigkeit der Verbindung der Stickstofffluss auf 140sccm reduziert werden muss, der Sauerstofffluss wurde ebenfalls auf 100sccm eingestellt.

Bei Ausheiltemperaturen um 750 °C kristallisiert TiO_2 in der anatase Phase. Mittels Röntgenbeugung wurden Spektren der aufgetragenen Schichten gemessen. Die Peaks, welche die Kristallinität des TiO_2 anzeigen, sind gering gegenüber der Intensität des Si-Peaks. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Schicht sehr dünn im Vergleich zum Siliciumsubstrat ist.

Mittels Messungen mit dem Transmissionselektronenmikroskop (TEM) wurde die Polykristallinität der Schichten nachgewiesen, welche sich in kolumnaren Strukturen zeigt. Mit Hilfe von Röntgen-Photoelektronen-Spektroskopie (XPS) wurden Zusammensetzung und Stöchiometrie der TiO_2 -Schichten gemessen. Bei einer Abscheidetemperatur von 350 °C traten bei den verschiedenen Precursoren leichte Unterschiede auf. Während für Ti0 das Verhältnis von Titan zu Oxid 31/69 betrug, ergab sich für Ti1 ein Wert von 24/76, für Ti2 von 29,5/70,5 und für Ti3 30/70. Es ist somit bei den neuentwickelten Precursoren ein leichter Sauerstoffüberschuss vorhanden. Während bei den anderen drei Precursoren Kohlenstoff nachweisbar nur in der obersten Schicht vorhanden war, war bei Ti2 ab einer Temperatur von 380 °C auch nach Abtragung von 7,5nm der Schicht noch eine Kohlenstoffkonzentration von 3% zu beobachten.

Zur elektrischen Messung wurden auf die TiO₂-Schicht Aluminiumkontakte mittels Elektronenstrahlverdampfung durch eine Schattenmaske aufgebracht. Dadurch entstehen sogenannte MIS (Metall-Isolator-Halbleiter)-Strukturen, die elektrisch charakterisiert wurden. Es wurden Schichtdicken zwischen 30 nm und 150 nm untersucht. Bei allen Oxidschichten kristallisierten sich bei Strom-Spannungsmessungen ähnliche Leckströme heraus, wobei allerdings die Messungen durch die zwischenliegende Siliziumdioxidschicht verfälscht werden. Precursor Ti2 liefert die bezüglich Leckstrom besten Ergebnisse.

Kapazitäts-Spannungsmessungen wurden durchgeführt, um die Dielektrizitätskonstante der Schichten zu bestimmen. Sie errechnet sich aus dem Kapazitätsplateau in Akkumulation. Wie auf Abb. 6.5 (rechts) deutlich zu erkennen, ist es schwierig, die Dielektrizitätskonstante der Schicht aus Precursor Ti1 zu bestimmen, da das Kapazitätsplateau keine Sättigung erreicht und weiterhin von der Spannung abhängt.

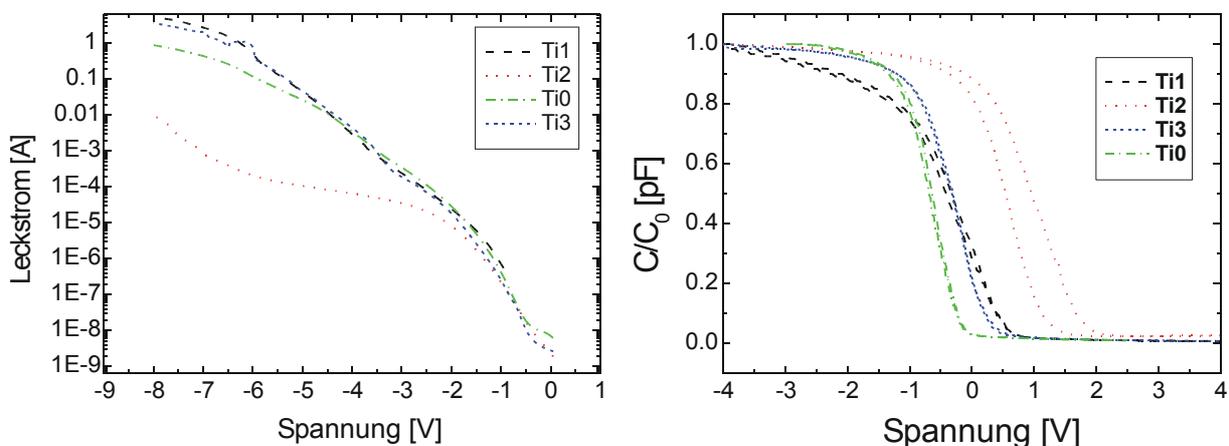


Abb. 6.5: Strom-Spannungs-Kennlinie (links) und Kapazitäts-Spannungs-Kennlinie (rechts) von MIS-Strukturen unterschiedlicher Precursoren.

Bei Ti2 und auch schwach bei Ti0 ist zu erkennen, dass die Rückwärtscharakteristik der CV-Kurve durch Oberflächenladungen, Grenzflächenladungen und möglicherweise mobile Ionen verschoben wurde. Dennoch ist in diesen Fällen das Kapazitätsplateau und damit auch die Dielektrizitätskonstante bestimmbar. Die idealste Kurve ergab sich für Schichten aus Ti3. Die Werte der Dielektrizitätskonstante lagen hauptsächlich zwischen 30 und 80 und sind abhängig von der Dicke der Schicht. Als Ursachen für diese Abhängigkeit sind zum Beispiel Texturunterschiede zwischen dünnen und dickeren Schichten und eine schwache Ausbildung der Polarisation in dünnen Schichten anzumerken.

6.2.5. Grundlagen der Hochvoltbauelemente in Smart-Power IC-Technologien für zukünftige Kfz-Anwendungen

BMBF-Verbundprojekt "SINA 42 V"

(Prof. Dr. rer. phil. Michael Stoisiek)

Im Rahmen eines BMBF Verbundvorhabens "Systemintegration für neue automobile Bordnetze, SINA42V" werden die Grundlagen für die Konzeption, Erstellung und Anwendung von komplexen integrierten Systemen und Modulen für das zukünftige 42V- Bordnetz von Personenkraftfahrzeugen geschaffen. Ein Kraftfahrzeughersteller, ein Hersteller für elektrische Hilfsantriebe, ein Halbleiterhersteller sowie zwei Hochschulinstitute, darunter der LEB, arbeiten in diesem Projekt gemeinsam an der Realisierung eines Demonstrators für einen typi-

schen Hilfsantrieb zum Einsatz im 42V Kfz-Bordnetz. Aufgabe des Halbleiterherstellers ist die Entwicklung und Bereitstellung einer Herstellungstechnologie für monolithisch integrierte Smart-Power Schaltkreise, die den neuen Anforderungen des 42 V Bordnetzes gerecht werden sowie die Realisierung eines Demonstrator-ICs. Offen hierbei ist, ob diese Anforderungen durch Weiterentwicklung der für den Einsatz im heutigen 12 V Bordnetz bewährten Fertigungstechnologie unter Beibehaltung der vorhandenen Prozessarchitektur und ihrer Schlüsselparameter sowie des Grunddesigns der Hochvoltbauelemente erfüllt werden kann, oder ob wesentliche Änderungen an Prozessarchitektur und/oder Bauelementdesign erforderlich sind. Entsprechende Grundlagenuntersuchungen zur Beantwortung dieser Fragestellung werden im Auftrag und in Zusammenarbeit mit dem Halbleiterhersteller am LEB durchgeführt.

Das Projekt ist für eine Laufzeit von 2,5 Jahren konzipiert und wurde am 1. 4. 2001 gestartet. Die Arbeiten des LEB im Jahre 2001 hatten im wesentlichen konzeptionellen Charakter. In vollem Umfang wurden die vereinbarten Arbeiten am LEB am 1. 1. 2002 aufgenommen, da wegen der angespannten Arbeitsmarktsituation ein geeigneter wissenschaftlicher Mitarbeiter erst zu diesem Termin gewonnen werden konnte.

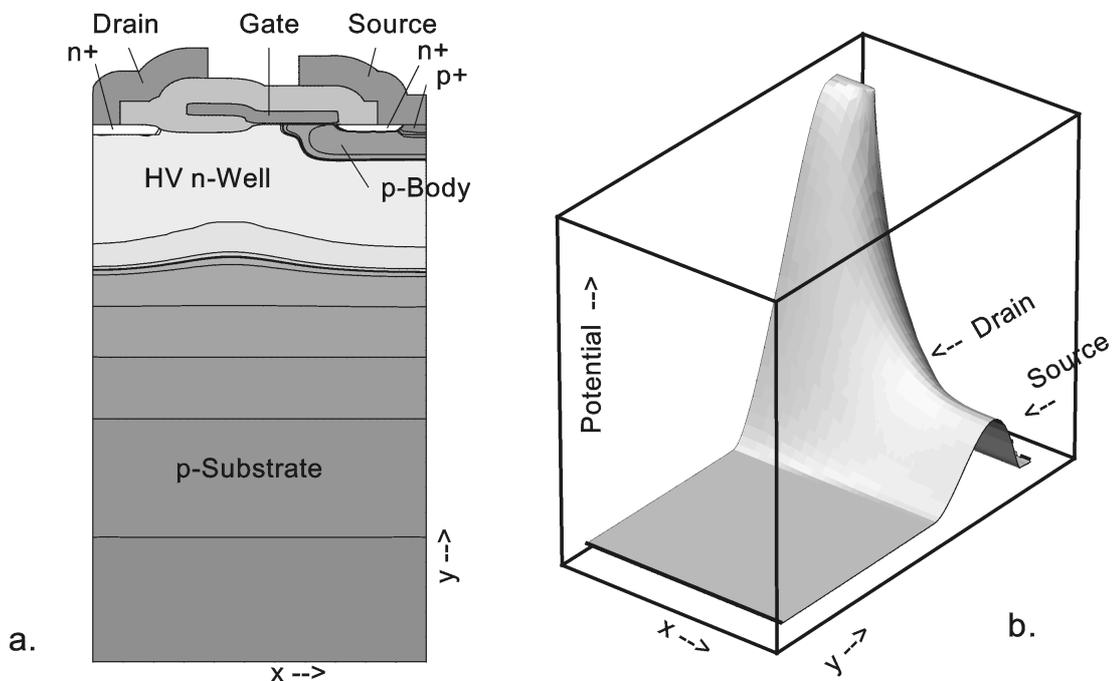


Abb. 6.6: Querschnitt eines LDMOS-Transistors in Hochvolt CMOS-Technologie (a) und Potentialverteilung bei Spannungsbelastung nahe der Durchbruchspannung $V_{DS(br)}$ (b).

6.3. Geförderte Forschungsvorhaben

Die im letzten Abschnitt wiedergegebenen Forschungsarbeiten entstammen Forschungsprojekten, die durch Drittmittel finanziert wurden bzw. werden. Wir möchten uns an dieser Stelle herzlich bei den Projektträgern für die Unterstützung bedanken.

Im folgenden findet sich eine Aufstellung aller im Jahr 2001 am LEB bearbeiteten Förderprojekte.

- "Modellierung und Simulation der Diffusion von Aluminium in Silicium", Träger: Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG), AZ: RY 1/18-2
- "Untersuchung der Diffusion von Aluminium in Silicium in Abhängigkeit von Oberflächeneigenschaften", Träger: Fraunhofer Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V. (FhG)
- "Untersuchung des Aktivierungs- und Diffusionsverhaltens von Bor in polykristallinen SiGe-Gate-Elektroden für MOS-Transistoren", Gemeinschaftsprojekt mit der Universität der Bundeswehr, München, Träger: Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG), AZ: RY 1/19-1 (LEB) und EI 234/5-1 (UniBw München)
- "Chemische Dampfphasenabscheidung von Schichten hoher Dielektrizitätskonstanten am Beispiel Barium-Strontium-Titanat", Bayerischer Forschungsverbund für Oberflächen-, Schicht- und Trocknungstechnik (FOROB II), Teilprojekt II.2, Träger Bayerische Forschungstiftung
- "CVD-Prozesse mit neuartigen metallorganischen Precursoren zur Herstellung von hoch- ϵ Gatedielektrika und metallischen Gateelektroden zukünftiger CMOS-Generationen", DFG-Schwerpunktprogramm: "Anorganische Materialien durch Gasphasensynthese: Interdisziplinäre Ansätze zu Entwicklung, Verständnis und Kontrolle von CVD-Verfahren" (SPP 1119), Träger: Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG), AZ: Ry 1/21-1
- "SINA 42 V", BMBF-Verbundprojekt, Projektstart: 01.04.2001, LEB: Unterauftragnehmer eines Halbleiterherstellers, Beginn der Arbeit eines wissenschaftl. MA des LEB: 01.01.2002
- "Experimentelle Demonstration eines bipolaren Hochspannungsschalters mit beidseitig gesteuerten Emitterstrukturen", DFG-Vorhaben, bewilligt zum 01.07.2001, Arbeit am Vorhaben aufgenommen: 01.01.2002 nach Einstellung eines wissenschaftlichen Mitarbeiters

7. So finden Sie zu uns

Anreise mit dem PKW

A3 bis Ausfahrt Tennenlohe/Erlangen, weiter auf B4 Richtung Erlangen, Abzweigung "Universität Südgelände". Der Beschilderung "Technische Fakultät" bzw. "Fraunhofer Institut für Integrierte Schaltungen-Bauelementetechnologie" folgen bis Cauerstraße. Weiter nach Plan.

Anreise mit dem Flugzeug

Flughafen Nürnberg; von dort mit dem Taxi (15 Minuten) oder den öffentlichen Verkehrsmitteln, Bus der Linie 32 nach Nürnberg Thon, von dort mit Bus der Linie 30 oder 30E (Richtung Erlangen Hugentotenplatz) bis Haltestelle Erlangen-Süd (30 Minuten) .

Anreise mit der Bahn

Erlangen-Hauptbahnhof, weiter mit dem Taxi (15 Minuten) oder mit den Bussen der Linien 287 (bis Haltestelle Stettiner Straße, ca. 20min) oder 30/30E/295 (bis Haltestelle Erlangen Süd ca. 20 min). Sehr gute Zugverbindungen von Nürnberg-Hauptbahnhof nach Erlangen-Hauptbahnhof.

