

LEHRSTUHL FÜR ELEKTRONISCHE BAUELEMENTE

Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

Jahresbericht 2002/2003



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.eei.uni-erlangen.de>

IMPRESSUM

Redaktion

Tobias Dirnecker

Michael Jank

Mikhail Lazarev

Bálint Meliorisz

Heiner Ryssel

Gestaltung, Satz und Realisierung

Tobias Dirnecker

Michael Jank

© Lehrstuhl für Elektronische Bauelemente 2004

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, Praktikanten	4
2.5. Mitarbeit in Gremien und Mitgliedschaften.....	5
2.6. Umbenennung des Fraunhofer Instituts IIS-B	6
2.7. Zusammenarbeit mit der Firma NanoWorld Services GmbH.....	6
2.8. Ausstattung.....	7
3. Veranstaltungen und wissenschaftliche Beiträge.....	11
3.1. Veranstaltungen unter Mitwirkung des LEB	11
3.1.1. Chronik 2002 / 2003	11
3.2. Prof. Ryssel nimmt an Winterakademie am IIT Kanpur in Indien teil	12
3.3. Jugendpreis Mikroelektronik	14
3.4. Praktikum "Mädchen und Technik"	14
3.5. Blockpraktikum Halbleitertechnologie für die Fachhochschule Aschaffenburg	15
3.6. Kolloquium zur Halbleitertechnologie und Messtechnik	16
3.7. Wissenschaftliche Beiträge der LEB-Mitarbeiter	19
3.7.1. Bücher und Buchbeiträge	19
3.7.2. In Zeitschriften und Konferenzbänden erschienene Beiträge	20
3.7.3. Vorträge und Posterpräsentationen	23

4. Lehre und Ausbildung am LEB.....	26
4.1. Lehrveranstaltungen im Grundstudium.....	26
4.1.1. Halbleiterbauelemente.....	26
4.1.2. Ringvorlesung Mechatronische Systeme	27
4.1.3. Praktikum Mechatronische Systeme	27
4.2. Vorlesungen im Hauptstudium	28
4.2.1. Produktion in der Elektrotechnik	28
4.2.2. Technologie integrierter Schaltungen	28
4.2.3. Prozessintegration und Bauelementearchitekturen	29
4.2.4. Halbleiter- und Bauelementemesstechnik	30
4.2.5. Ionenimplantation.....	31
4.2.6. Zuverlässigkeit und Fehleranalyse integrierter Schaltungen.....	31
4.2.7. Leistungshalbleiterbauelemente	32
4.2.8. Smart Power Technologien	32
4.2.9. Prozess- und Bauelementesimulation.....	33
4.2.10. Festkörperphysikalische Grundlagen der Halbleiterbauelemente.....	34
4.2.11. Technik der Halbleiterfertigungsgeräte.....	35
4.2.12. Siliciumcarbid Hochleistungsbauelemente - Grundlagen, Technologie und Systemaspekte	36
4.2.13. Bauelementmodelle für die Schaltkreissimulation.....	36
4.2.14. Mikrosystemtechnik I - Technologie der Mikrostrukturen	37
4.2.15. Mikrosystemtechnik II - Komponenten und Anwendungen	37
4.3. Praktika im Hauptstudium	38
4.3.1. Praktikum zur Technologie der Silicium-Halbleiterbauelemente	38
4.3.2. Praktikum zur Halbleiter- und Bauelementemesstechnik	38
4.3.3. Praktikum Produktionstechnik II.....	39
4.4. Seminare im Hauptstudium.....	39
4.4.1. Hauptseminar über ausgewählte Kapitel der Silicium-Halbleitertechnologie	39
4.4.2. Numerische Simulation grundlegender Vorgänge in Halbleiterbauelementen....	40
4.5. Vorlesungsangebot bei der virtuellen Hochschule Bayern	41
4.5.1. Technologie und Architektur mikroelektronischer Schaltungen.....	41
4.6. Praktikum Mechatronische Systeme	43
4.7. Exkursionen	44
4.8. Belegungsmatrix	45
4.9. Ausbildung zum Mikrotechnologen am LEB	48

5.	Arbeiten im Rahmen der Ausbildung von Studenten und Mitarbeitern	49
5.1.	Studien- und Bachelorarbeiten.....	49
5.1.1.	Erweiterung eines Kapazitäts-Spannungs-Messplatzes	49
5.1.2.	Charakterisierung von Siliciumdioxid-Silicium-Grenzflächen mit Hilfe des ELYMAT-Messverfahrens.....	50
5.1.3.	Weiterentwicklung der Charakterisierung von Siliciumoxiden mit Hilfe des Elymat-Verfahrens	51
5.1.4.	Aufbau und Inbetriebnahme eines Messplatzes zur Charakterisierung von Feldemitter-Strukturen	52
5.2.	Diplom- und Masterarbeiten	52
5.2.1.	Nanostrukturen für nichtflüchtige Speicher	52
5.2.2.	Entwicklung eines kostenoptimierten Frequenzumrichters	53
5.2.3.	Untersuchungen zur Realisierbarkeit einer mehrkanaligen analogen Signalübertragung über eine Stromschleife unter Berücksichtigung der extremen elektromagnetischen Störfelder in einem Hochleistungsumrichter.....	54
5.2.4.	Entwicklung eines bidirektionalen isolierenden DC/DC-Wandlers.....	55
5.2.5.	Untersuchung von Masseninterferenzen in der Ionenimplantation.....	55
5.2.6.	Entwicklung eines bidirektionalen 15 kW DC/DC-Wandlers	55
5.2.7.	Monte-Carlo Simulation von Rückstreuung und Sputtering.....	56
5.2.8.	Implementierung eines effizienten Level-Set-Algorithmus zur Simulation von Photolackprofilen für die (optische) Lithographie	57
5.2.9.	Entwicklung eines Messsystems zur Erfassung von Widerstand, Dicke und Leitungstyp von Siliciumscheiben und Integration in eine Fertigungsumgebung	57
5.3.	Promotionen	58
5.3.1.	Contamination Aspects in Integrating High Dielectric Constant and Ferroelectric Materials into CMOS Processes	58
5.3.2.	Entwicklung eines Modelles zur Diffusion von Aluminium in Silicium.....	61
5.3.3.	Entwurf und Herstellung von integrierten ionensensitiven Feldeffekttransistoren in CMOS-Technologie	65
5.3.4.	Algorithmen für die dreiecksbasierte dreidimensionale Simulation bewegter Oberflächen in der Halbleitertechnologie	70
5.3.5.	Rückseitenkontaktierte Kohlenstoff-Interdigitalelektroden für bioelektronische Anwendungen.....	72
5.3.6.	Modellierung von transienten Effekten bei der Diffusion von Bor in Silicium..	76
5.3.7.	Entwicklung eines integrierbaren optischen Messsystems zur Kontrolle der Linienbreiten periodischer sub-Mikrometerstrukturen	78

6. Forschung	81
6.1. Arbeitsgebiete	81
6.1.1. Prozesstechnik	81
6.1.2. Mikrosystemtechnik	81
6.1.3. Leistungshalbleiter-Bauelemente, Smart-Power IC-Technologien.....	81
6.1.4. Technologie- und Bauelementesimulation	82
6.1.5. Halbleiterfertigungsgeräte und -methoden	82
6.1.6. Leistungselektronische Systeme	82
6.2. Beispiele aus der Forschung	83
6.2.1. CVD-Prozesse mit neuartigen metallorganischen Precursoren zur Herstellung hoch-dielektrischer Gatedielektrika und metallischer Gateelektroden zukünftiger CMOS-Generationen	83
6.2.2. Herstellung von polykristallinen Silicium-Germanium-Schichten durch die Niederdruckgasphasenabscheidung.....	86
6.2.3. Untersuchung von p-dotierten Schichten in Siliciumcarbid.....	89
6.2.4. Experimentelle Demonstration eines bipolaren Hochspannungsschalters mit beidseitig gesteuerten Emitterstrukturen	91
6.2.5. Grundlagen der Hochvoltbauelemente in Smart-Power IC-Technologien für zukünftige Kfz.-Anwendungen	93
6.2.6. Zerstörungsfreie Charakterisierung von ferroelektrischen und hoch- dielektrischen Dünnschichten.....	94
6.2.7. Verwendung von dünnen Aluminiumnitrid-Filmen zur Herstellung eines mikromechanischen Ultraschall-Flüssigkeitszerstäubers.....	96
6.2.8. Optimierung eines Systems zur atomaren Schichtabscheidung aus der Dampfphase	100
6.3. Geförderte Forschungsvorhaben	100
7. So finden Sie zu uns	102

1. Grußwort

Der vorliegende Bericht bietet einen Einblick in die Arbeit des Lehrstuhls für elektronische Bauelemente in den Jahren 2002 und 2003. Neben der Chronik wichtiger Ereignisse und Veranstaltungen und der Auflistung der wichtigsten Daten zu den Mitarbeitern bietet er in erster Linie umfassende Übersichten zu den Leistungen in Forschung und Lehre. Mit der ausführlichen Beschreibung des kompletten Lehrangebots, der dem Lehrstuhl zur Verfügung stehenden Laborausstattung und der Arbeitsgebiete verstehen wir ihn jedoch nicht nur als Rückblick sondern auch als aktuelles Informationsangebot.

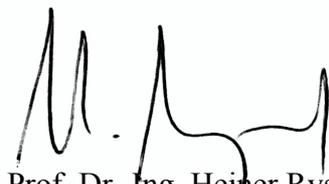
Meine Teilnahme an der Winterakademie am Indian Institute of Technology in Kanpur (Indien), die Ansiedlung der Firma Nanoworld Services GmbH in der Technologiehalle des LEB und die Anschaffung neuer Anlagen zur Abscheidung und Trockenätzung von Metallschichten und zur epitaktischen Abscheidung von Siliciumcarbid sind nur die herausragenden Ereignisse eines Rückblicks auf die beiden vergangenen Jahre.

Im Bereich der Lehre wurden neben der aktiven Mitarbeit meines Lehrstuhls am weiter fortschreitenden Aufbau des Studiengangs Mechatronik vor allem die Unternehmungen auf dem Gebiet neuer Lehrformen fortgeführt und intensiviert. Die multimediale Aufbereitung der Vorlesung Technologie und Architektur integrierter Schaltungen für die Virtuelle Hochschule Bayern (vhb) ist mittlerweile weitgehend abgeschlossen, ein neues Gemeinschaftsprojekt mit dem Lehrstuhl für Technische Elektronik der TU München zur Umsetzung einer Grundlagenvorlesung mit dem Thema Halbleiterbauelemente ist im Sommer 2004 angelaufen. Mit der bereits vierten Durchführung des einwöchigen Technologiepraktikums für Studenten der Fachhochschule Aschaffenburg im Herbst 2003 wurde die Idee, unseren Raum auch für externe Interessenten aus dem Lehrbereich zu öffnen konsequent und erfolgreich weitergeführt.

Der Abschluss von 13 Studien-, Diplom-, Bachelor- und Masterarbeiten und sieben Promotionen sowie die (Mit-)Arbeit an 9 Forschungsprojekten sind ein lebendiger Beweis für die regen Aktivitäten des Lehrstuhls für Elektronische Bauelemente im Bereich der Forschung.

Bei der Entwicklung des Lehrstuhls, der sich mittlerweile im zwanzigsten Jahr seines Bestehens befindet, war der Einsatz und Ideenreichtum meiner ehemaligen und gegenwärtigen Mitarbeiter unverzichtbar. Ihnen allen bin ich zu großem Dank verpflichtet.

Erlangen, im Oktober 2004



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 Direktor

Dr. rer. nat. Lothar Frey

Messtechnik / Ionenstrahltechniken

Wissenschaftliche Mitarbeiter:

Dipl.-Ing. Tobias Dirnecker

Bauelemente / Elektrische Aufladungseffekte
(seit 10/02)

Jovan Hadzi-Vukovic, M.Sc. E.E.

Leistungsbaulemente (01/02 bis 12/03)

Dipl.-Ing. Volker Häublein

Ionenimplantation (bis 12/02)

Dipl.-Ing. Michael Jank

Bauelemente / Prozessintegration

Dipl.-Phys. Oliver Krause

Diffusion (bis 08/02)

Dipl.-Ing. Ralf Kühnhold

Bauelemente / Mikrosystemtechnik (bis 09/02)

Dipl.-Phys. Trixi Leistner

Schichtabscheidung / Ferroelektrika

Dipl.-Phys. Peter Balint Meliorisz

Ionenimplantation (seit 12/02)

Dipl.-Ing. Martin Lemberger

Schichtabscheidung

Damijan Movrin, M.Sc.

(10/02 – 03/03)

Dipl.-Phys. Martin Rambach

Siliciumcarbid-Bauelemente (seit 03/02)

Thomas Richter, M.A.

Multimedia in der Lehre (seit 09/02)

Dipl.-Phys. Thomas Rotter

Leistungsbaulemente (seit 02/02)

Dipl.-Ing. Irene Wehfritz

Multimedia in der Lehre (01/02 – 06/02)

Dipl.-Ing. Roland Weiß

Siliciumcarbid-Bauelemente

Dipl.-Chem. Nedyu Nedev Yassenov

Mikrosystemtechnik

Technische Mitarbeiter / Verwaltung:

Diana Arnold

Verwaltung / Sekretariat (in Elternzeit)

Sieglinde Elsesser

Photolithographie / Nasschemie

Judit Gabler

Dokumentation / Sekretariat

Fortsetzung: Technische Mitarbeiter / Verwaltung

Christian Heilmann	Prozessgeräte / Elektrofachkraft / Sicherheitsbeauftragter
Stefan Knopf	Physikalische Schichtabscheidung / Mechanische Werkstatt
Dipl.-Ing. (FH) Thomas Klauser	Rechner / Leitsysteme
Sandra Löffler	Verwaltung / Sekretariat (bis 08/02)
Angela Meixner	Photolithographie / Nasschemie (seit 03/02)
Katharina-Luise Meziane-Bettahar	Reinigung Reinraumlabor
Susann Oswald	Verwaltung / Sekretariat (seit 09/02)
Anna-Maria Rehm	Reinigung Reinraumlabor
Andrea Riedl	Verwaltung / Sekretariat (seit 10/03)
Heinrich Schier	Infrastruktur / Reinraum
Lydia Wolf	Verwaltung / Sekretariat (bis 09/02)

2.2. Lehrbeauftragte

Dr.-Ing. Hans Betz	West STEAG Partners GmbH
Dr.-Ing. Jürgen Lorenz	FhG IISB, Erlangen
Hon.-Prof. Dr.-Ing. Lothar Pfitzner	FhG IISB, Erlangen
Dr.-Ing. Peter Pichler	FhG IISB, Erlangen
Hon.-Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Schmutz	ACR, Automation in Cleanroom GmbH, Niedereschbach
Dr.-Ing. Dietrich Stephani	SiCED GmbH, Erlangen

2.3. Gastwissenschaftler

Prof. Dr. Istvan Barsony MTA Research Institute for Technical Physics and Materials Science (MTA-MFA), Budapest, Ungarn	Ionenstrahltechnik
Hocine Boubekeur Infineon Technologies AG, München	Kontamination bei der Prozessintegration ferroelektrischer Schichten
Dr. Miklos Fried MTA Research Institute for Technical Physics and Materials Science (MTA-MFA), Budapest, Ungarn	Mikroelektronik
Prof. Dr. Jozsef Gyulai MTA Research Institute for Technical Physics and Materials Science (MTA-MFA), Budapest, Ungarn	Ionenstrahltechnik



Fortsetzung: Gastwissenschaftler

Dr. Zsolt Horvath MTA Research Institute for Technical Physics and Materials Science (MTA- MFA), Budapest, Ungarn	Röntgendiffraktometrie
Dr. Gyorgy Juhasz MTA Research Institute for Technical Physics and Materials Science (MTA- MFA), Budapest, Ungarn	Optische Messtechnik
Dr. Albena Paskaleva Institute of Solid-State Physics, Bulgarian Academy of Sciences, Bulgarien	Abscheidung und Charakterisierung neuartiger dielektrischer Schichten
Dr. Peter Petrik MTA Research Institute for Technical Physics and Materials Science (MTA- MFA), Budapest, Ungarn	Spektralellipsometrische Messungen an Poly- siliciumschichten
Dr. Vaclav Svorčík Chemisch-Technische Hochschule Prag, Lehrstuhl für Festkörperchemie, Tschechi- sche 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

2.4. Studentische und wissenschaftliche Hilfskräfte, Praktikanten

In den Jahren 2002 und 2003 waren insgesamt 10 studentische Hilfskräfte und 2 Praktikanten zur Unterstützung der Mitarbeiter in Forschung und Lehre beschäftigt.

Michael Angerer	Mechanische Konstruktion, Membranätzung an Si/SiO ₂ /Si-Scheiben
Tobias Erlbacher	Programmierung Messplätze
Stefan Groh	Multimedia in der Lehre
Jochen Hecker	Multimedia in der Lehre
Florian Hofmann	Tutorium Halbleiterbauelemente, Elektrische Mess- technik, Programmierung
Jörg Hofmann	Programmierung interaktiver Lehrmaterialien, Graphik
Aravind Kumar Kolla	Simulation CMOS-Prozessvariationen
Thomas Meyer	Durchführung von Arbeiten zur Modellierung der Ab- scheidung von dünnen Schichten
Matthias Oberst	Programmierung Scheibentest-Umgebung, Auswerte- programm zur Darstellung von Zuverlässigkeitsdaten

Fortsetzung: Studentische und wissenschaftliche Hilfskräfte, Praktikanten

Kai Oschmann	Dokumentation Masken/Layout, Programmierung Messplätze
Martin Päge	Multimedia in der Lehre (Praktikum)
Martina Ryssel	Tutorium Halbleiterbauelemente
Michael Spoliaric	Multimedia in der Lehre (Praktikum)

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“ Leiter der Fachgruppe 6.2.6 „Inspektion und Analytik“ der GMM VDE/VDI Gesellschaft für Mikroelektronik, Mikro und Feinwerktechnik Mitglied in der Deutschen Physikalischen Gesellschaft Mitglied in der Böhmischen Physikalischen Gesellschaft Mitglied der Studienkommission Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik der Universität Erlangen-Nürnberg
Dipl.-Ing. Michael Jank	Mitglied der Studienkommission Mechatronik der Universität Erlangen-Nürnberg
Prof. Dr.-Ing. Heiner Ryssel	Mitglied des Internationalen Komitees der Konferenz „Ion Implantation Technology (IIT)“. Die Konferenz findet alle zwei Jahre abwechselnd in Europa, den USA und Ostasien statt. Mitglied des wissenschaftlichen Programmkomitees der “European Solid State Device Research Conference” (ESSDERC). Die Konferenz findet jährlich in einem anderen europäischen Land statt. Mitglied der Informationstechnischen Gesellschaft (ITG). Leiter des Fachausschusses 8.1 „Festkörpertechnologie“ Mitglied der VDE/VDI-Gesellschaft für Mikroelektronik, Mikro- und Feinwerktechnik, Leiter des Fachbereichs 1, „Mikro- und Nanoelektronik-Herstellung“ Leiter der Fachgruppe 1.2.2 „Ionenimplantation“ Mitglied des Beirats der Bayerischen Kooperationsinitiative Elektronik/Mikrotechnologie (Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Verkehr und Technologie) Mitglied in der Electrochemical Society Mitglied in der Materials Research Society Mitglied (Fellow) im Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) Mitglied in der Böhmischen Physikalischen Gesellschaft Mitglied des Editorial Board der Zeitschrift „Radiation Effects and Defects in Solids“, Abingdon, U.K.

Fortsetzung: Mitarbeit in Gremien und Mitgliedschaften (Prof. Dr.-Ing. Heiner Ryssel)

	Mitglied der Studienkommission Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik
	Mitglied des Fachbereichsrats der Technischen Fakultät
	Mitglied der Studienkommission Maschinenbau der Universität Erlangen-Nürnberg
	Mitglied der Studienkommission Mechatronik der Universität Erlangen-Nürnberg
	Mitglied des Komitees für den „European SEMI Award“
	Mitglied des internationalen wissenschaftlichen Komitees der Konferenz „Computational Methods in Electrical Engineering and Electromagnetics“ (ELECTROCOMP). Die Konferenz findet alle zwei Jahre in einem anderen europäischen Land statt.
Prof. Dr. rer. phil. Michael Stoisieck	Mitglied in der VDE/VDI Gesellschaft für Mikroelektronik, Mikro- und Feinwerktechnik
	Mitglied in der Deutschen Physikalischen Gesellschaft (DPG)
	Mitglied in der VDE/ETG Energietechnischen Gesellschaft
	CIPS 2002, (Technical and Scientific Committee, Session-Chairman)
	ESSDERC 2003 (Technical Program Committee, Session-Chairman)

2.6. Umbenennung des Fraunhofer Instituts IIS-B

Das Fraunhofer Institut für Integrierte Schaltungen - Bauelementetechnologie (IIS-B), das unter der Leitung von Prof. Ryssel in Zusammenarbeit mit dem LEB seine Forschungslabors betreibt, firmiert seit 01.01.2003 unter dem neuen Namen „Fraunhofer Institut für Integrierte Systeme und Bauelementetechnologie (IISB)“.

Grund dafür ist die Trennung der beiden IIS-Teilinstitute IIS-A (Angewandte Elektronik, neu: IIS) und IIS-B in zwei eigenständige Einrichtungen. Die beiden Schwesterinstitute hatten sich in den vergangenen Jahren zu zwei eigenständigen Forschungseinrichtungen mit deutlich unterschiedlichen Schwerpunkten entwickelt.

Bezüglich der Aufgaben des IISB sowie der Kooperation mit dem LEB ergeben sich aus der Umbenennung keine Veränderungen. Die bisherigen Arbeitsgebiete Halbleiter- und Nanotechnologie, Halbleiterfertigung und chemische Analytik, Technologiesimulation, Kristallzüchtung und Leistungselektronische Systeme bleiben bestehen.

2.7. Zusammenarbeit mit der Firma NanoWorld Services GmbH

NanoWorld AG ist der weltweit führende Hersteller von Sonden für die Rasterkraftmikroskopie (Abb. 2.1). Rasterkraftmikroskope werden zur Messung von Dimensionen und Materialeigenschaften im Mikrometer- bis hinab in den sub-Nanometerbereich verwendet. Mit immer kleiner werdenden Strukturgrößen bei der Herstellung von Computerchips und Halbleiterbauelementen gewinnt die Rasterkraftmikroskopie eine wachsende Bedeutung bei der Charakterisierung von Prozessen zur Herstellung dieser Bauelemente. Um optimale Messresultate zu

erhalten ist es notwendig, für die jeweilige Art der Messung speziell angepasste Sensoren zu verwenden.

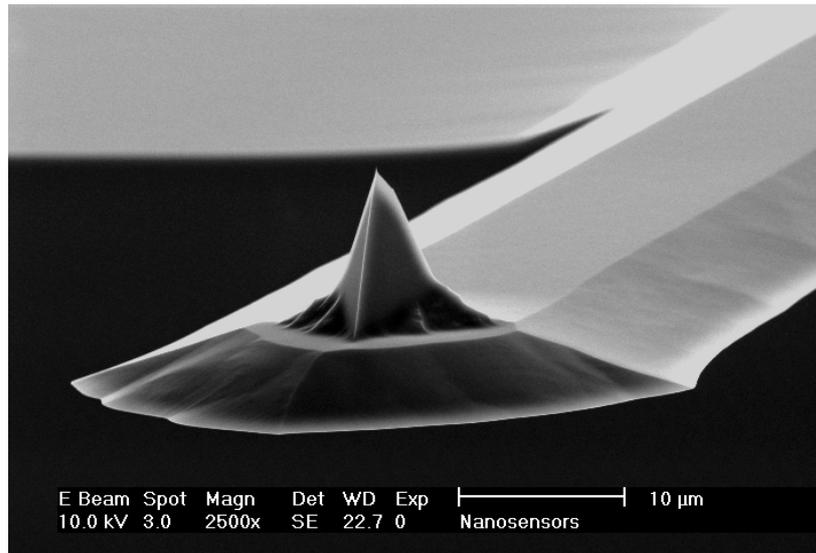


Abb. 2.1: Sensor der Firma NanoWorld für die hochauflösende Rasterkraftmikroskopie.

Seit vielen Jahren arbeiten das Fraunhofer Institut für Integrierte Systeme und Bauelementetechnologie, der Lehrstuhl Elektronische Bauelemente und NanoWorld in einer Vielzahl von Projekten zusammen, deren Ziel die Entwicklung neuartiger Sensoren für die Rasterkraftmikroskopie ist (Abb. 2.2). Das Anwendungsspektrum der gemeinsam entwickelten Sonden reicht von der optischen Nahfeldmikroskopie bis hin zur Messung extremer geometrischer Strukturen bei der Herstellung von DRAM-Speicherchips. Angeregt durch die langjährige erfolgreiche Zusammenarbeit und die Möglichkeiten der Nutzung der am LEB und FhG-IISB vorhandenen Erfahrungen in der Siliciumtechnologie, entschloss sich die Firma NanoWorld 2003 ihre Forschungs- und Entwicklungstochter NanoWorld Services GmbH an das IISB nach Erlangen zu verlagern und in Kooperation mit dem Fraunhofer Institut für Integrierte Systeme und Bauelementetechnologie und dem Lehrstuhl für Elektronische Bauelemente neue Rastersonden speziell für Anwendungen in der Mikroelektronik zu entwickeln.

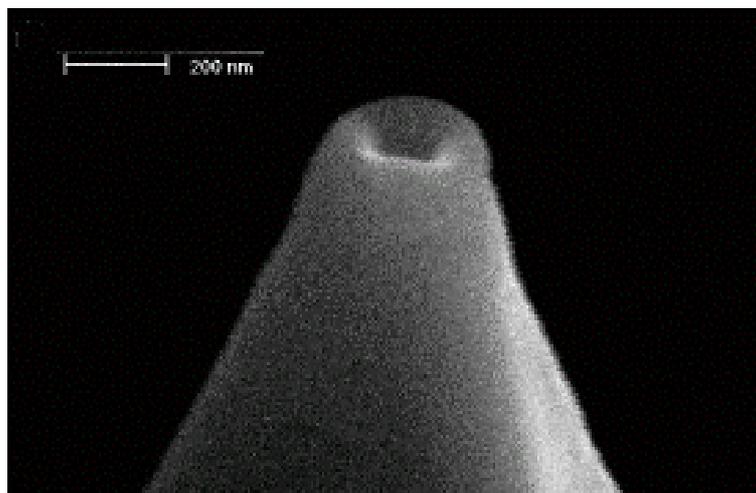


Abb. 2.2: Sensor für die optische Nahfeldmikroskopie. Mittels fokussiertem Ionenstrahl wird ein Loch in die Spitze des Sensors geschnitten durch das Licht austreten kann.

2.8. Ausstattung

Im Jahr 2002 konnten Neuanschaffungen wichtiger Prozessgeräte für das von Lehrstuhl und Fraunhofer IISB gemeinsam genutzte Reinraumlabor abgeschlossen werden.

Eine neue Trockenätzanlage zur Strukturierung von Metallbahnen beseitigt einen technischen Engpass, da bisher nur nasschemisch geätzte Metallisierungsstrukturen verfügbar waren. Die messtechnischen Möglichkeiten konnten durch die Inbetriebnahme eines neuen Rasterkraftmikroskopes, das auch elektrische Charakterisierungsmöglichkeiten mit hoher Ortsauflösung bietet, erweitert werden.

Im Jahr 2003 wurden eine SiC-Epitaxieanlage und ein neues Sputtersystem über die Kooperation zwischen dem LEB und dem IISB aufgebaut.

Alles in allem stehen dem Lehrstuhl etwa 1000 m² Reinraumfläche zur Verfügung. Die gemeinsam mit dem IISB betriebene Prozesstechnologie ermöglicht die Fertigung von Teststrukturen und CMOS-Bauelementen bzw. -Testschaltungen in 150 mm-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 Aufstellung der Geräte und Anlagen:

Si- und SiC-Prozesstechnik

- Oxidation: Oxidationsöfen (bis zu 300 mm), RTO-Anlage, Rohrwäscher
- Dotierung: Ionenimplantationsanlagen (bis zu 6 MeV), Öfen für Diffusions- und Ausheil-schritte, RTA-Anlagen
- Schichtabscheidung: Niederdruck-Dampfphasenabscheidung (LPCVD) von Standard-CMOS-Dünnschichten, Metallorganische Dampfphasenabscheidung (MOCVD) für Ferroelektrika, neue Gatedielektrika und sensitive Schichten, Aufdampfanlage, Sputteranlagen, SiC-Epitaxie
- Ätzverfahren: Plasmaätzanlage, RIE-Trockenätzter, Lackverascher, Nassätzbänke, automatische Reinigungsstationen
- Lithographie: Kontakt- und Proximity-Belichtung, vollautomatische Horde-zu-Horde Lack- und Entwicklerstraßen
- Chipbonder (manuell, automatisch), Wafersäge
- Klasse 100-Reinräume für die Entwicklung, Erprobung und Qualifizierung von Halbleiterfertigungsgeräten.
- MESC-kompatible Cluster-Plattform mit XPS-Messmodul, Messgeräte für Partikelmes-sung und Plasmadiagnose, Vertikalofen mit *in-situ* Schichtdickenkontrolle
- Scheibenbeschriftungsanlage

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 Leistungselementen

Messung geometrischer Dimensionen

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

Analytik

- Rasterelektronenmikroskop, Energiedispersive Röntgenstrahlanalyse (EDX)
- Rasterkraftmikroskop (SSRP [Scanning Spreading Resistance Profiling], SCM [Scanning Capacitance Measurement], TUNA [Tunneling / Conductive AFM])
- Feldemissions-Rasterelektronenmikroskop
- Sekundärionen-Massenspektroskopie (SIMS)
- Flugzeit-SIMS (ToF-SIMS)
- Sekundär-Neutralteilchen-Massenspektroskopie (SNMS)
- Rutherford-Rückstreuung (RBS)
- Röntgen-Photoelektronenspektroskopie (XPS)
- Atomabsorptionsspektroskopie (AAS), Gasphasenaufschluss (VPD)
- *Pack Extraction*-Methode (PEM)



Fortsetzung: Analytik

- 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. Chronik 2002 / 2003

Datum	Veranstaltung	Teilnehmer / Verantwortlich
22.02.2002	Schülerinformationstag des Instituts für Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik	Assistenten
12.06.2002	Informationsveranstaltung der ETG Kurzschluss zur Vertiefung im Hauptstudium	Dipl.-Ing. Michael Jank
14.06.2002	Exkursion des LEB zur Firma Philips SMST, Böblingen	Assistenten
27.06.2002- 29.06.2002	Tage der Technischen Fakultät	Dr. Lothar Frey, Prof. Dr. Michael Stoisiek
28.06.2002	Tag der Elektrotechnik – Lehrstuhlführung und Präsentationen im Rahmenprogramm	Assistenten
15.07.2002	Lehrstuhlpräsentation im Rahmen der Ringvorlesung EEI für Studenten des 2. und 4. Semesters	Prof. Dr.-Ing. Heiner Ryssel
15.07.2002	Viertsemester-Informationsveranstaltung am LEB – Lehrstuhlbesuch, Information über das Angebot des LEB für EEI-Studenten im Hauptstudium	Dipl.-Ing. Tobias Dirnecker, Dipl.-Ing. Michael Jank
27.06.2002	Betriebsausflug IISB und LEB	Mitarbeiter, Studenten
02.09.2002- 06.09.2002	Teilnahme am Praktikum Mädchen und Technik	Assistenten
14.09.2002- 20.09.2002	Durchführung des Blockpraktikums Siliciumtechnologie für die Fachhochschule Aschaffenburg	Assistenten
20.10.2002	Erstsemesterkontaktmesse EEI und Mechatronik	Assistenten
08.11.2002	Veranstaltung des 29. Treffens der Nutzergruppe Ione- nimplantation am Fraunhofer IISB	Prof. Dr.-Ing. Heiner Ryssel
09.12.2002	Exkursion des LEB zur Firma Texas Instruments, Freising	Assistenten
21.02.2003	Schülerinformationstag des Instituts für Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik	Assistenten
21.02.2003	Veranstaltung des Treffens der Nutzergruppe Inspektion & Analytik am Fraunhofer IISB	Dr. rer. nat. Lothar Frey
29.03.2003	FoBiT '03 – Schülerinformationstag der Forchheimer Gymnasien in Ebermannstadt	Dipl.-Ing. Michael Jank

Fortsetzung: Chronik 2002/2003

24.03.2003- 04.04.2003	Gastprofessur zum Thema "Ionenstrahlen in der Halbleitertechnologie" an der Technischen Universität Wien	Dr. rer. nat. Lothar Frey
06.05.2003	Informationsveranstaltung der ETG Kurzschluss zur Vertiefung im Hauptstudium	Dipl.-Ing. Michael Jank
26.05.2003	Lehrstuhlpräsentation im Rahmen der Ringvorlesung EEI für Studenten des 2. und 4. Semesters	Prof. Dr.-Ing. Heiner Ryssel
02.06.2003	Exkursion des LEB zur Firma Renesas, Landshut	Assistenten
05.06.2003	Betriebsausflug IISB und LEB	Mitarbeiter, Studenten
11.06.2003	Viertsemester-Informationsveranstaltung am LEB – Lehrstuhlbesuch, Information über das Angebot des LEB für EEI-Studenten im Hauptstudium	Dipl.-Ing. Tobias Dirnecker, Dipl.- Ing. Michael Jank
07.07.2003	Veranstaltung der Abschlusspräsentation zum Praktikum Mechatronische Systeme durch den LEB (siehe Abschnitt 4.6.)	Prof. Dr.-Ing. Heiner Ryssel, Dipl.-Ing. Michael Jank
16.07.2003/ 17.07.2003	Organisation des DFG-Siliciumkarbid-Rundgesprächs in Paderborn	Dr. rer. nat. Lothar Frey
01.09.2003- 05.09.2003	Teilnahme am Praktikum Mädchen und Technik, Versuch "Untersuchungen an Solarzellen"	Assistenten
13.09.2003- 19.09.2003	Durchführung des Blockpraktikums Siliciumtechnologie für die Fachhochschule Aschaffenburg	Assistenten
21.11.2003	Erstsemester-Kontaktmesse EEI und Mechatronik	Assistenten
28.11.2003	Veranstaltung des 31. Treffens der Nutzergruppe Ionenimplantation am Fraunhofer IISB	Prof. Dr.-Ing. Heiner Ryssel
04.12.2003	Organisation des Treffens der Nutzergruppe Inspektion & Analytik bei Fa. Elmos in Dortmund	Dr. rer. nat. Lothar Frey
05.12.2003	Kontaktnachmittag mit Lehrstuhlführung im Rahmen der Erstsemester-Kontaktmesse	Dipl.-Ing. Tobias Dirnecker, Dipl.- Ing. Michael Jank
15.12.2003	Exkursion des LEB zur Firma Bosch, Reutlingen	Assistenten

3.2. Prof. Ryssel nimmt an Winterakademie am IIT Kanpur in Indien teil

(Kontakt vor Ort in Indien geknüpft - Erlanger Nachrichten vom 30.12.2002)

Eine erstmals durchgeführte "Winter-Akademie" in Indien soll dazu beitragen, vermehrt Studierende vom asiatischen Subkontinent nach Deutschland und speziell nach Erlangen zu locken.

Insgesamt 42 Studenten der "Indian Institutes of Technology (IIT)" von Kanpur, Guwahati und Karaghpur, die im Bereich der Ingenieurausbildung zu den Eliteuniversitäten Indiens gehören, nahmen an der Winter-Akademie teil.

Sie bestand aus drei Kursen zu den Themen "Strömungsmechanik und Wärmeübertragung", "Verbrennungstechnik" und "Werkstoffwissenschaften" und wurden von den Dozenten Prof. Franz Durst, Prof. Heiner Ryssel und Privatdozent Friedrich Dinkelacker betreut.

Hintergrund für die Aktivität ist das Werben um ausländische Studierende, vor allem im Bereich der Ingenieurwissenschaften. Hier sieht sich die Technische Fakultät in Erlangen im Wettstreit mit "klassischen" Technischen Universitäten bzw. Hochschulen.



Abb. 3.1 Prof. Durst (4.v.r.), PD Dr. Dinkelacker (2.v.r.) und Prof. Ryssel (r.) im Kreise der gastgebenden Dozenten des Indian Institute of Technology in Kanpur

"München, Stuttgart, Darmstadt, Hamburg, Berlin und Dresden erhalten die besondere Aufmerksamkeit von Ingenieurstudenten des Auslandes", weiß Durst zu berichten. Nicht zuletzt durch die besondere Förderung des Deutschen Akademischen Austauschdienstes (DAAD), der ein besonderes Programm der Anwerbung ausländischer Ingenieurstudenten aus Indien nach Deutschland unterhält, "entsteht der Eindruck, dass an diesen Universitäten die beste Ingenieurausbildung erfolgt".

Um diesem Eindruck entgegenzuwirken, bemüht sich die Technische Fakultät seit einiger Zeit verstärkt, an Universitäten in Asien präsent zu sein, um dort die besten Studenten für eine Ausbildung in Erlangen zu gewinnen. Zum Beispiel wird für die internationalen Studiengänge mit Bachelor- und Masterabschluss in "Chemical and Bio Engineering" und "Computational Engineering" geworben.

Welche Mittel dabei am besten geeignet sind, ist bei den Verantwortlichen noch umstritten. Als besonders vielversprechende Form gelten indes sogenannte zehn- bis zwölf-tägige "Akademien", die von Erlanger Dozenten im Ausland abgehalten werden, um persönliche Kontakte zu potenziellen Studieninteressenten vor Ort zu knüpfen.

Die erste Winter-Akademie in Indien stieß laut Prof. Ryssel "auf hohe Beachtung, vor allem in den Medien: In diversen Presseberichten wurde über die Eröffnung der Akademie durch den Direktor des IIT Kanpur berichtet".

Auch das Interesse der Studierenden war laut Aussage von Franz Durst "sehr groß: Doch weil amerikanische Universitäten die besten Studenten der IITs mit exzellenten Stipendien abwerben, liegt deutlich eine Neigung vor, in den USA zu studieren". Es werde daher "noch einiger Anstrengungen bedürfen, um diesem Trend entgegenzuwirken".

3.3. Jugendpreis Mikroelektronik

Der Förderkreis für die Mikroelektronik hat zum zweiten Mal den "Jugendpreis Mikroelektronik" verliehen. Gymnasiasten und Fachoberschüler aus ganz Bayern waren aufgerufen, Projekte und Facharbeiten zu Themen der Mikroelektronik einzureichen.

Die Jury, die sich sehr erfreut über die Qualität der Arbeiten zeigte, wählte fünf Gewinner aus insgesamt 17 Preisvorschlägen aus. Die Jury bestand aus Vertretern der beiden Erlanger Fraunhofer-Institute, der Universität Erlangen-Nürnberg, des Förderkreises sowie von Unternehmen und der IHK Nürnberg für Mittelfranken.

Im Rahmen einer Feierstunde am 25. Juni 2002 am Fraunhofer Institut für Integrierte Systeme und Bauelementetechnologie (IISB) zeichnete der Vorsitzende des Förderkreises Dr. Dietrich Ernst die 5 hervorragenden Projekte mit Preisen von jeweils 500 Euro aus:

Andreas Pösch (Bayreuth) entwickelte in seiner Arbeit "WAP Integration" einen Internet-Server mit angeschlossenen Elektronikschaltgruppen, der -gesteuert über ein handelsübliches WAP-Handy- beliebige Stromverbraucher schalten kann. Einsatzmöglichkeiten sind z.B. das ferngesteuerte Ein- und Ausschalten von Haushaltsgeräten.

Jürgen Schober, Paul Linsmaier und Alexander Stockinger (Deggendorf) konstruierten einen "Roboter mit der neuesten PC-Prozessor-Technik", der in der Lage ist, sich selbständig in einem Raum zurechtzufinden. Er ist lernfähig, fernbedienbar und kann seine Akkus selber in einer Ladestation aufladen.

Andreas Wieser (Penzberg) zeigte mit der Arbeit "Einsatz von Sensoren zur Robotersteuerung" die Möglichkeiten unterschiedlicher Sensortechniken auf. Optische, Ultraschall- und Lagesensoren kommen in seinem Roboter zum Einsatz.

Jürgen Eckert (Weiden i.d. Opf.) konstruierte einen "Roboter auf sechs Beinen", der sich mit Hilfe von diversen Sensoren stabil bewegen und Hindernisse erkennen kann.

Daniel Gurdan (Weiden i.d. Opf.) entwickelte ein "Zweirad mit elektronischem Gleichgewichtssinn" und zeigt mit seinem Zweirad die schnelle Reaktionsfähigkeit Mikroelektronik-basierter Steuerungs- und Regelungstechnik auf. Das Zweirad ist u.a. in der Lage, selbst bei Störimpulsen die Balance zu halten.

Im Anschluss an die Preisverleihung präsentierten die Schüler ihre Arbeiten im Rahmen einer kleinen Ausstellung.

3.4. Praktikum "Mädchen und Technik"

Die Universität Erlangen-Nürnberg und die beiden Fraunhofer-Institute für Integrierte Schaltungen und für Integrierte Systeme und Bauelementetechnologie veranstalteten auch 2002 und 2003 wieder das Schnupperpraktikum „Mädchen und Technik“ für interessierte Mädchen aus der 8. bis 10. Jahrgangsstufe am Gymnasium. Bereits in den vorangegangenen Jahren ist das

Praktikum auf stetig steigendes Interesse gestoßen, mittlerweile nehmen über 300 Schülerinnen eine Woche lang an den angebotenen Versuchen teil. In dieser Zeit können sie sich davon überzeugen, wie spannend und anregend die Beschäftigung mit Technik sein kann. Aus fast vierzig Versuchen kann sich jede Teilnehmerin ihre vier Favoriten auswählen. Die Themen reichen dabei von Computeranimation und Nanotechnologie über das Gießen von Aluminiumlegierungen bis hin zur Kryptographie.

In Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer Institut für Integrierte Systeme und Bauelemente-technologie (IISB) bot der LEB 2002/2003 zwei Versuche an, die von Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern von LEB und IISB betreut wurden.

Beim ersten Versuch konnten die Schülerinnen eigene Erfahrungen mit Solarzellen gewinnen. Die Zellen wurden zuerst auf ihre Leistungsfähigkeit in Abhängigkeit von der Sonneneinstrahlung untersucht, um die Erkenntnisse anschließend an Modellradfahrern und -flugzeugen in die Praxis umzusetzen. Die Herausforderung dabei: wie schafft man es, den Radfahrer möglichst schnell treten zu lassen? Im Rahmen des zweiten Versuchs wurde ein Rundgang durch die Technologiehalle des LEB angeboten. An zwei Vormittagen wurde je eine Gruppe von zwanzig Schülerinnen durch den Besuchergang der Technologiehalle geführt und mit den besonderen Arbeitsbedingungen des Reinraums bekannt gemacht.

3.5. Blockpraktikum Halbleitertechnologie für die Fachhochschule Aschaffenburg

Zusammen mit der Fachhochschule Aschaffenburg beschreitet der LEB neue Wege bei der Studentenausbildung. Von 13.09. bis 19.09.2003 fand bereits zum vierten Mal das Blockpraktikum zur Halbleitertechnologie für die Aschaffener Elektro- und Informationstechnik-Studenten statt.

Das in Kooperation mit dem Fraunhofer Institut für Integrierte Systeme und Bauelemente-technologie betriebene, umfangreich ausgestattete Halbleitertechnologielabor bietet dem LEB eine optimale Forschungsumgebung und ermöglicht den Studierenden der Friedrich-Alexander-Universität Einblicke in aktuelle Fragestellungen der Mikroelektronik.

Weil Aufbau und Unterhaltung derartiger Einrichtungen aus finanzieller und personeller Sicht sehr aufwendig sind, findet man ein vergleichbares Umfeld für gewöhnlich nur in den Chipfabriken der Halbleiterindustrie. Der LEB ist daher seit langem bemüht, seine Kapazitäten auch externen Nutzern zur Verfügung zu stellen. Ein Beispiel dafür ist das einwöchige Blockpraktikum "Technologie der Silicium-Halbleiterbauelemente", das seit dem Jahr 2000 für die Fachhochschule Aschaffenburg durchgeführt wird.

Für die Fachhochschule Aschaffenburg ist die Ausbildung im Bereich der Halbleitertechnologie zentraler Bestandteil des Studienschwerpunktes Mikroelektronik im Studiengang Elektro- und Informationstechnik. Dabei liegt der Nutzen des Blockpraktikums in Erlangen auf der Hand. Die angehenden Ingenieure erhalten hier die Möglichkeit, neben den auch an anderen Hochschulen üblichen theoriebetonten Lehrveranstaltungen die Prozesse und Methoden der Halbleitertechnologie an modernen und industrietypischen Fertigungs- und Messeinrichtungen zu erlernen, die auch bei der Fertigung von Mikroprozessoren oder Speicherchips zum Einsatz kommen. Im Praktikum selbst stellen die jeweils 10-15 Elektrotechnikstudenten Solarzellen her, die später in den Laboren der Fachhochschule weiter charakterisiert werden.

Eine besondere Herausforderung stellt der zeitliche Ablauf des Praktikums dar. Während die Einzelversuche von Laborpraktika meistens in beliebiger Reihenfolge durchgeführt werden können, muss in diesem Fall eine enge Verzahnung von Herstellungsprozess und Versuchsreihenfolge gewährleistet sein. Darüber hinaus muss genügend Zeit eingeplant werden, um

aus didaktischer Sicht irrelevante oder sich wiederholende Herstellungsschritte zwischen den einzelnen Versuchseinheiten abzarbeiten. Dies ist kein Problem, wenn die Versuche, wie in dem zu Grunde liegenden Praktikum an der Universität Erlangen, in einwöchigem Turnus stattfinden. Eine Durchführung als fünftägige Blockveranstaltung ist jedoch nur durch eine detaillierte Zeitplanung und das hohe Engagement der ausführenden Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter zu realisieren.

Bei den Studierenden findet das Halbleitertechnologiepraktikum zu einer äusserst positiven Resonanz und soll deshalb zu einem festen Bestandteil des Aschaffenburgs Elektro- und Informationstechnik-Lehrplans werden. Die Fachhochschule Aschaffenburg sieht hierin die Möglichkeit ihr Profil zu schärfen und die Qualität der Ingenieursausbildung weiter zu steigern, um junge Menschen für ein ingenieurtechnisches Studium zu begeistern.

Auch im Hinblick auf die in Bayern angestrebte engere Zusammenarbeit zwischen Universitäten und Fachhochschulen setzen die Universität Erlangen und die Fachhochschule Aschaffenburg mit diesem Blockpraktikum Akzente. Die enge Zusammenarbeit der beiden Hochschulen führt zu einer Verbesserung der Lehre und zu einer stärkeren Profilierung der heimischen Hochschulen. Damit wird ein weiterer Beitrag zur Steigerung der Attraktivität technischer und naturwissenschaftlicher Studiengänge in Bayern geliefert.

Der Fachbereich Ingenieurwissenschaften der Fachhochschule Aschaffenburg gliedert sich in drei Studiengänge. Neben der Elektro- und Informationstechnik wird das Studium der Mechatronik und des Wirtschaftsingenieurwesens angeboten. Schwerpunkte in der Elektro- und Informationstechnik bilden die Mikroelektronik und die Automatisierungstechnik, wobei in mehr als 20 Laboren eine praxisorientierte Ausbildung gewährleistet wird, die im Rahmen von industrienahen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten vertieft wird. Im Hinblick auf die Halbleitertechnologie seien hier die Labore für Elektronische Bauelemente und Aufbau- und Verbindungstechnik genannt.

3.6. Kolloquium zur Halbleitertechnologie und Messtechnik

Das von Dr. rer. nat. Lothar Frey organisierte Kolloquium bietet die Möglichkeit, aktuelle Forschungsarbeiten aus dem LEB und Fraunhofer IISB sowie von Kooperationspartnern aus Industrie und Wissenschaft einem breiten Publikum vorzustellen. In den Jahren 2002 und 2003 wurden die im Folgenden aufgeführten Beiträge angeboten.

Vorträge 2002

- 14.01.2002 *Leistungselektronik im Automobilbau*
Dr. Martin März, Fraunhofer Institut für Integrierte Systeme und Bauelementetechnologie, Erlangen
- 21.01.2002 *Inline-Prozesskontrolle mittels Photoelektronen-Spektroskopie*
Dr. Annemarie Schröder-Heber, Fraunhofer Institut für Integrierte Systeme und Bauelementetechnologie, Erlangen
- 28.01.2002 *Analytische Verfahren in der Halbleiterfertigung*
Dr. Günther Zoth, Infineon Technologies, Regensburg
- 04.02.2002 *SiC Schottky-Dioden mit ionenimplantierter Randfeldbegrenzung*
Roland Weiß, Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Elektronische Bauelemente

Fortsetzung: Kolloquium Halbleiter- und Messtechnik 2002

- 11.02.2002 *Injektionsabhängige Ladungsträger-Lebensdauerermessungen*
Mathias Rommel, Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Elektronische Bauelemente
- 06.05.2002 *Der Weg der LIGA-Technologie von der Forschung zur industriellen Nutzung*
Dr. Joachim Schulz, Forschungszentrum Karlsruhe, Institut für Mikrostrukturtechnik, Karlsruhe
- 13.05.2002 *Integration einer Elektronenquelle in eine Silicium-AFM-Sonde*
Marcus Schäfer, Westfälische-Wilhelms-Universität Münster
- 10.06.2002 *Resource-driven and job-driven simulations of semiconductor wafer fabs*
Theresa M. Roeder, Department of Industrial Engineering and Operations Research, University of California, Berkeley (USA)
- 10.06.2002 *Charakterisierung von MOCVD Titandioxidschichten auf der Basis von neuartigen Precursoren*
Trixi Leistner, Lehrstuhl für Elektronische Bauelemente, Universität Erlangen-Nürnberg
- 01.07.2002 *Monolithische SiGe Photodiodentechnologie*
Dr.-Ing. Gerd Wöhl, Institut für Halbleitertechnik, Universität Stuttgart
- 08.07.2002 *Einfluß von Lackstrukturen auf Schädigungen durch elektrische Aufladung während der Ionenimplantation*
Tobias Dirnecker, Fraunhofer Institut für Integrierte Systeme und Bauelemente-technologie, Erlangen
- 15.07.2002 *The Modal Method by Fourier Expansion (MMFE): Application to scatterometry and EUV lithography Simulation*
Dr. Patrick Schiavone, Laboratoire des Technologies de la Microélectronique, Grenoble, Frankreich
- 11.11.2002 *Implantationsinduzierte Defekte in dünnen Gateoxiden*
Michael Jank, Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Elektronische Bauelemente
- 18.11.2002 *Oberflächeneigenschaften und elektrische Leitfähigkeit von RTA-ausgeheiltem 4H SiC*
Martin Rambach, Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Elektronische Bauelemente
- 25.11.2002 *Wissenschaftliches Publizieren*
Dr. Claus Ascheron, Springer-Verlag, Heidelberg
- 02.12.2002 *Elektrische Charakterisierung von Zirkonsilikat-Schichten erzeugt mittels neuer MOCVD-Prekursoren*
Martin Lemberger, Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Elektronische Bauelemente
- 12.12.2002 *Isotopenangereicherte Halbleiterheterostrukturen: Ideale Strukturen für Diffusionsuntersuchungen*
Dr. Hartmut Bracht, Universität Münster, Institut für Materialphysik

Vorträge 2003

- 13.01.2003 *Mikrofabrizierte Silicium-Sensoren für die Rastersondenmikroskopie*
Thomas Sulzbach, NanoWorld Services GmbH, Erlangen
- 27.01.2003 *Ansteuerkonzepte für IGBTs und Leistung-MOSFETs*
Markus Billmann, Fraunhofer-Institut für Integrierte Systeme und Bauelementetechnologie, Erlangen
- 03.02.2003 *Entwicklung einer neuartigen Oxidations- und Ätztechnik für Gruppe III – Nitride: Photoelektrochemische Grundlagen und Anwendungen in Feldeffekttransistoren*
Thomas Rotter, Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Elektronische Bauelemente
- 12.05.2003 *Züchtung und Charakterisierung von versetzungsarmen Silicium-dotierten GaAs Substratkristallen“*
Dr. Bernhard Birkmann, Fraunhofer Institut für Integrierte Systeme und Bauelementetechnologie, Erlangen
- 19.05.2003 *3D Prozesssimulation und Anwendung in der Mikro- und Nanoelektronik*
Dr. Jürgen Lorenz, Fraunhofer Institut für Integrierte Systeme und Bauelementetechnologie, Erlangen
- 23.05.2003 *Schnelle Leistungsdioden*
Prof. Josef Lutz, TU Chemnitz, Chemnitz
- 09.06.2003 *Künstliche Neuronale Netze für die Prozesskontrolle in der Halbleiterfertigung*
Martin Schellenberger, Fraunhofer Institut für Integrierte Systeme und Bauelementetechnologie, Erlangen
- 16.06.2003 *Diskrete Simulation von Cluster Tools mit Arena*
Markus Pfeffer, Fraunhofer Institut für Integrierte Systeme und Bauelementetechnologie, Erlangen
- 23.06.2003 *Die Erzeugung holographischer Gitter und ihre Anwendungen*
Christian Moormann, AMO GmbH/AMICA, Aachen
- 30.06.2003 *Transiente elektrisch-thermische Simulation in der Leistungselektronik*
Dr. Martin März, Fraunhofer Institut für Integrierte Systeme und Bauelementetechnologie, Erlangen
- 07.07.2003 *Herstellung von Solarsilicium mit dem EFG-Verfahren*
Dr. Albrecht Seidl, RWE Schott Solar GmbH, Alzenau
- 14.07.2003 *Ausgewählte Prozeßtechnologien und Bauelementkonzepte integrierbarer Leistungsbaulemente*
Sven Berberich, Fraunhofer Institut für Integrierte Systeme und Bauelementetechnologie, Erlangen
- 10.11.2003 *Untersuchung und Modellierung von Schottky-Dioden auf SiC*
Roland Weiß, Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Elektronische Bauelemente
- 17.11.2003 *FECLAM – Ferroelektrische CVD Schichten für Speicheranwendungen*
Christian Schmidt, Fraunhofer Institut für Integrierte Systeme und Bauelementetechnologie, Erlangen

Fortsetzung: Kolloquium Halbleiter- und Messtechnik 2003

- 24.11.2003 *GaN-Field Effect Chemical Sensors*
Dr. Martin Eickhoff, Walter Schottky Institut, TU München
- 01.12.2003 *GaAs Kristallzüchtung – Probleme und Herausforderungen*
Dr. Stefan Eichler, Freiburger Compound Materials, Freiberg
- 08.12.2003 *Leistungsfähigkeit und Grenzen moderner Leistungshalbleiter am Beispiel eines 16 kW-Wandlers für ein Brennstoffzellen-Fahrzeug*
Daniel Kübrich, Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Elektronische Bauelemente
- 15.12.2003 *The Bonding of Si at Heterostructure Interfaces*
Gerd Duscher, North Carolina State University, Raleigh, NC (USA)

3.7. Wissenschaftliche Beiträge der LEB-Mitarbeiter

3.7.1. Bücher und Buchbeiträge

D. Stiebel: „Modellierung von transienten Effekten bei der Diffusion von Bor in Silicium“, Shaker Verlag, Aachen, 2002 (Erlanger Berichte Mikroelektronik; Hrsg.: **H. Ryssel**; Band 2002,1; ISBN 3-8322-0707-4), zugl.: Universität Erlangen-Nürnberg, Diss., 2002

R. Kühnhold: „Entwurf und Herstellung von integrierten ionensensitiven Feldeffekttransistoren in CMOS-Technologie“, Shaker Verlag, Aachen, 2002 (Erlanger Berichte Mikroelektronik; Hrsg.: **H. Ryssel**; Band 2002,2; ISBN 3-8322-0746-5), zugl.: Universität Erlangen-Nürnberg, Diss., 2002

R. Schnupp: „Rückseitenkontaktierte Kohlenstoff-Interdigitalelektroden für bioelektronische Anwendungen“, Shaker Verlag, Aachen, 2002 (Erlanger Berichte Mikroelektronik; Hrsg.: **H. Ryssel**; Band 2002,3; ISBN 3-8322-0755-4), zugl.: Universität Erlangen-Nürnberg, Diss., 2002

O. Krause: „Entwicklung eines Modells zur Diffusion von Aluminium in Silicium“, Shaker Verlag, Aachen, 2002 (Erlanger Berichte Mikroelektronik; Hrsg.: **H. Ryssel**; Band 2002,4; ISBN 3-8322-0871-2), zugl.: Universität Erlangen-Nürnberg, Diss., 2002

O. Lenhart: „Algorithmen für die dreiecksbasierte dreidimensionale Simulation bewegter Oberflächen in der Halbleitertechnologie“, Shaker Verlag, Aachen, 2002 (Erlanger Berichte Mikroelektronik; Hrsg.: **H. Ryssel**; Band 2002,5; ISBN 3-8322-0960-3), zugl.: Universität Erlangen-Nürnberg, Diss., 2002

N. Benesch: „Entwicklung eines integrierbaren optischen Meßsystems zur Kontrolle der Liniensbreiten periodischer sub-Mikrometerstrukturen“, Shaker Verlag, Aachen, 2002 (Erlanger Berichte Mikroelektronik; Hrsg.: **H. Ryssel**; Band 2003,6; ISBN 3-8322-1766-5), zugl.: Universität Erlangen-Nürnberg, Diss., 2003

3.7.2. In Zeitschriften und Konferenzbänden erschienene Beiträge

T. Dirnecker, A. Ruf, **L. Frey**, A. Beyer, A. Bauer, D. Henke, **H. Ryssel**: „Influence of Photoresist Pattern on Charging Damage During High Current Ion Implantation“, in: Proceedings of the 7th International Symposium On Plasma & Process Induced Damage (P2ID 2002) Maui (HI), USA, June 5-7, 2002, American Vacuum Soc., Santa Clara, USA, 2002, S. 106-109

A. Beyer, A. Hausmann, M. Junack, J. Radecker, A. Ruf, **T. Dirnecker**: „Plasma induced damage monitoring for HDP processes“, in: Proceedings of the 7th International Symposium On Plasma & Process Induced Damage (P2ID 2002) Maui (HI), USA, June 5-7, 2002, American Vacuum Soc., Santa Clara (CA), USA, 2002, S. 84-87

T. Dirnecker, **L. Frey**, A. Ruf, D. Henke, A. Bauer, A. Beyer, **H. Ryssel**: „Influence of Antenna Shape and Resist Patterns on Charging Damage During Ion Implantation“, in: 2002 14th International Conference on Ion Implantation Technology (IIT2002) - Proceedings, Taos (NM), USA 22.-27.09.2002, IEEE, Piscataway (NJ), 2003, S. 291-294

D. Henke, S. Walther, J. Weemann, **T. Dirnecker**, A. Ruf, A. Beyer, K. Lee: „Characterization of Charging Damage in Plasma Doping“, in: 2002 14th International Conference on Ion Implantation Technology (IIT2002) - Proceedings, Taos (NM), USA 22.-27.09.2002, IEEE, Piscataway (NJ), 2003, S. 201-204

L. Frey, M. März: „Verkohlttes Silicium - Neues Halbleitermaterial für die Leistungselektronik“, in: Design-Elektronik, 01/2002, S. 40, 2002.

H. Boubekour, T. Mikolajick, N. Nagel, A.J. Bauer, **L. Frey**, **H. Ryssel**: „Effect of Barium Contamination on Gate Oxide Integrity in High-k DRAM“, in: Journal of Non-Crystalline Solids 303 (1) 2002, S. 12

M. Fujita, J. Tajima, T. Nakagawa, S. Abo, A. Kinomura, F. Pászti, M. Takai, R. Schork, **L. Frey**, **H. Ryssel**: „Development of Enhanced Depth-resolution Technique for Shallow Dopant Profiles“, in: Nuclear Instruments and Methods in Physics Research 190 (1-4) 2002, S. 26

S. E. Berberich, A.J. Bauer, **L. Frey**, **H. Ryssel**: „Trench Sidewall Doping for Lateral Power Devices“, Proceedings of the 33rd European Solid-State Device Research Conference ESSDERC 2003, 16.-18.09.2003, Estoril, Portugal, S. 397

L. Frey, C. Lehrer: „Materialbearbeitung mittels fokussierter Ionenstrahlen zur TEM-Probenpräparation und Nanostrukturierung“, in: Materialography 40, 2003, S. 4

L. Frey, C. Lehrer, **H. Ryssel**: „Nanoscale Effects in Focused Ion Beam Processing“, in: Applied Physics A 76 (7) 2003, S. 1017-1023

V. Häublein, **L. Frey**, **H. Ryssel**: „ENCOTION - A New Simulation Tool for Energetic Contamination Analysis“, in: 2002 14th International Conference on Ion Implantation Technology (IIT2002) - Proceedings, Taos (NM), USA 22.-27.09.2002, IEEE, Piscataway (NJ), 2003, S. 217-220

V. Häublein, H. Walser, **L. Frey**, **H. Ryssel**: „Investigation of Lanthanum Contamination from a Lanthanated Tungsten Ion Source“, in: 2002 14th International Conference on Ion Implantation Technology (IIT2002) - Proceedings, Taos (NM), USA 22.-27.09.2002, IEEE, Piscataway (NJ), 2003, S. 346-349

Fortsetzung: In Zeitschriften und Konferenzbänden erschienene Beiträge

J. Hadži-Vukovič, M.M. Jevtič, D. Simič: „Phase Noise Amplitude Distribution as Indicator of Origin of Random Phase Perturbation in a Test Oscillator“, in: Proceedings of the 23. International Conference on Microelectronics, 12.-15.05.2002, Nis, Jugoslawien

R. Ramovič, M. Jevtič, **J. Hadži-Vukovič**, D. Randjelović: „A Novel Analytical Model of a SiC MOSFET“, in: Proceedings of the 23. International Conference on Microelectronics, 12.-15.05.2002, Nis, Jugoslawien

M.P.M. Jank, **L. Frey**, A.J. Bauer, **H. Ryssel**: „Investigation of Implantation-Induced Defects in Thin Gate Oxides Using Low Field Tunnel Currents“, in: 2002 14th International Conference on Ion Implantation Technology (IIT2002) - Proceedings, Taos (NM), USA 22.-27.09.2002, IEEE, Piscataway (NJ), 2003, S. 197-200

O. Krause, P. Pichler, **H. Ryssel**: „Determination of Aluminum Diffusion Parameters in Silicon“ in: Journal of Applied Physics, 91 (9) 2002, S. 5645

T. Leistner, K. Lehmbacher, P. Härter, C. Schmidt, A.J. Bauer, **L. Frey**, **H. Ryssel**: „MOCVD of Titanium Dioxide on the Basis of New Precursors“ in: Journal of non-crystalline solids 303 (1) 2002, S. 64-68

S. Zürcher, M. Morstein, N. D. Spencer, **M. Lemberger** und A. J. Bauer: „New Single-Source Precursors for the MOCVD of High-k Dielectric Zirconium Silicates to Replace SiO₂ in Semiconducting Devices“, in: Chemical Vapor Deposition, 8 (4) 2002, S. 171-177

A. Paskaleva, **M. Lemberger**, S. Zürcher, A. J. Bauer, **L. Frey** und **H. Ryssel**: „Electrical Characterization of Zirconium Silicate Films Obtained from Novel MOCVD Precursors“, in: Proceedings of the 12th Workshop on Dielectrics in Microelectronics (WoDiM 2002), IMEP, Grenoble, Frankreich, 2003, S. 53-56, zudem erschienen in: Microelectronics Reliability 43 (8) 2003, S. 1253-1257

S. Zürcher, M. Morstein, **M. Lemberger** und A. J. Bauer: „Hafnium Titanium Silicate High-k Dielectric Films Deposited by MOCVD using Novel Single Source Precursors“, in: Chemical Vapor Deposition XVI and EUROCVD 14, Volume 2, Electrochemical Society Proceedings, Volume 2003-08, S. 863-870

M. Lemberger, A. Paskaleva, S. Zürcher, A. J. Bauer, **L. Frey** und **H. Ryssel**: „Zirconium silicate films obtained from novel MOCVD precursors“, Journal of Non-Crystalline Solids, 322 (1-3) 2003, S. 147-153

M. Rambach, **R. Weiß**, **L. Frey**, A.J. Bauer, **H. Ryssel**: „Investigation of Rapid Thermal Annealed p-n Junctions in SiC“, Proceedings of the International Conference on Silicon Carbide and Related Materials (ICSCRM 2003)

A. J. Bauer, **M. Rambach**, **L. Frey**, **R. Weiß**, R. Rupp, P. Friedrichs, R. Schörner, D. Peters: „Surface Properties and Electrical Characteristics of Rapid Thermal Annealed 4H-SiC“ in: Materials Science Forum, 433-436 (Proceedings of the European Conference on Silicon Carbide and Related Materials, ECSCRM 2002), 2003, S. 609

D. Mistele, **T. Rotter**, Z. Bougrioua, M. Marso, H. Roll, H. Klausning, F. Fedler, O.K. Semchinova, J. Aderhold, I. Moerman, and J. Graul: „Influence of Surface Treatments on DC-Performance of GaN-Based HFETs“ in: physica status solidi (a) 194 (2) 2002, S. 452-455

D. Mistele, **T. Rotter**, K.S. Röver, S. Paprotta, M. Seyboth, V. Schwegler, F. Fedler, H. Klausning, O.K. Semchinova, J. Stemmer, J. Aderhold, and J. Graul: „First AlGaIn/GaN MOSFET with Photoanodic Gate Dielectric“ in: Mat. Sci. Eng. B 93 (1-3) 2002, S. 107-111

Fortsetzung: In Zeitschriften und Konferenzbänden erschienene Beiträge

D. Mistele, **T. Rotter**, K.S. Röver, S. Paprotta, Z. Bougrioua, F. Fedler, H. Klausning, O.K. Semchinova, J. Stemmer, J. Aderhold, J. Graul: „AlGaN/GaN-Based MOSHFETs with Different Gate Dielectrics and Treatments” in: Mat. Res. Soc. Symp. Proc. 693, 16.54, 2002

F. Fedler, J. Stemmer, R. J. Hauenstein, **T. Rotter**, A. M. Sanchez, A. Ponce, S. I. Molina, D. Mistele, H. Klausning, O. Semchinova, J. Aderhold, J. Graul: „Effect of High Temperature Single and Multiple AlN Intermediate Layers on N-polar and Ga-polar GaN Grown by Molecular Beam Epitaxy” in: Mat. Res. Soc. Symp. Proc. 693, 13.34, 2002

H. Klausning, F. Fedler, J. Aderhold, D. Mistele, **T. Rotter**, J. Stemmer, O. Semchinova, J. Graul, S. Günster: „Characterization of $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}$ Distributed Bragg Reflectors Grown by Plasma Assisted Molecular Beam Epitaxy“ in: Mat. Res. Soc. Symp. Proc. 693, 16.12, 2002

T. Rotter und **M. Stoisiek**: „High-Voltage Devices (>600 V) Produced with a Low-Voltage (<150 V) Smart-Power IC-Technology“, Proceedings of the 33th European Solid-State Device Research Conference (ESSDERC) 2003

D. Mistele, **T. Rotter**, A. Horn, O. Katz, Z. Bougrioua, J. Aderhold, J. Graul, G. Bahir, and J. Salzman: „Incorporation of Dielectric Layers into the Processing of III-Nitride Based Heterostructure Field Effect Transistors“ in: J. Electron. Mater., 32 (5) 2003, S. 355

J. Frickinger, A. Nutsch, L. Pfitzner, **H. Ryssel**, G. Zielonka: „Wafer Reclaim in Semiconductor Manufacturing“ in: VDMA Productronics, 7th edition, 2003, S. 23

P. Deák, Á. Gali, P. Pichler, **H. Ryssel**: „Quantum Mechanical Studies of Boron Clustering in Silicon“, in: High Performance Computing in Science and Engineering 2003, Hrsg.: E. Krause, W. Jäger, M. Resch, Stuttgart, 2003, S. 381

E. Bär, J. Lorenz, **H. Ryssel**: „Simulation of the Influence of Via Sidewall Tapering on Step Coverage of Sputter-deposited Barrier Layers“, in: Microelectronic Engineering, 64 (1-4) Okt. 2002, S. 321-328

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: Solid State Phenomena, 82-84, 2002, S. 373

V. Svorcik, K. Rockova, B. Dvorancova, L. Broz, V. Hnatowicz, R. Öchsner, **H. Ryssel**: „Cell Adhesion on Modified Polyethylene“ in: Journal of Materials Science, 37 (6) 2002, S. 1183

P. Petrik, N.Q. Khanh, Z. E. Horváth, Z. Zolnai, I. Bársony, T. Lohner, M. Fried, J. Gyulai, C. Schmidt, C. Schneider, **H. Ryssel**: „Characterisation of $\text{Ba}_x\text{Sr}_{1-x}\text{TiO}_3$ Films Using Spectroscopic Ellipsometry, Rutherford Backscattering Spectrometry and X-Ray Diffraction“, in: Journal of Non-Crystalline Solids, 303 (1) 2002, S. 179-184

A. Hettwer, N. Benesch, C. Schneider, L. Pfitzner, **H. Ryssel**: „Phi-Scatterometry for Integrated Linewidth and Process Control in DRAM Manufacturing“, in: IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing, 15 (4) 2002, S. 470

R. Trunk, H. Schmid, C. Schneider, L. Pfitzner, **H. Ryssel**, H. Bernhardt, E. Marx: „Hand-Mon-IPSM: Handling Monitoring in a Loading Station of a Furnace“ in: Proceedings of the 13th Annual IEEE/SEMI Advanced Semiconductor Manufacturing Conference and Workshop 2002, Boston, Massachusetts, 2002, S. 113

Fortsetzung: In Zeitschriften und Konferenzbänden erschienene Beiträge

E. Bär, J. Lorenz, **H. Ryssel**: „Three-Dimensional Simulation of Superconformal Copper Deposition Based on the Curvature-Enhanced Accelerator Coverage Mechanism“, in: Copper Interconnects, New Contact Metallurgies/Structures, and Low-k Interlevel Dielectrics II, Proceedings of the ECS Fall Meeting, Orlando (FL), USA, The Electrochemical Soc., 2003-10, S. 21

A. Nutsch, M. Fritsche, H.M. Dudenhausen, L. Pfitzner, **H. Ryssel**: „Defect Inspection Method for Quality Control in a Reclaim Line“, in: Proceedings of the 4th European AEC/APC Conference 2003, S. 119

P. Petrik, N. Q. Khanh, Z. E. Horváth, Z. Zolnai, I. Bársony, T. Lohner, M. Fried, J. Gyulai, C. Schmidt, C. Schneider, **H. Ryssel**, „Non-destructive characterization of strontium bismuth tantalate films“, Materials Science in Semiconductor Processing 5, 2003, S. 141

C. Schmidt, P. Petrik, C. Schneider, M. Fried, T. Lohner, I. Bársony, J. Gyulai, and **H. Ryssel**, „Optical characterization of ferroelectric Strontium-Bismuth-Tantalate (SBT) thin films“, in: Proceedings of the 3rd International Conference on Spectroscopic Ellipsometry (ICSE-3), 06.-11.07.2003, Wien

R. Weiß, **L. Frey** und **H. Ryssel**: „Different Ion Implanted Edge Terminations for Schottky Diodes on SiC“, in: 2002 14th International Conference on Ion Implantation Technology (IIT2002) - Proceedings, Taos (NM), USA 22.-27.09.2002, IEEE, Piscataway (NJ), 2003, S. 139-142

R. Weiß, **L. Frey**, **H. Ryssel**: „Modelling of the Influence of the Schottky Barrier Inhomogeneities on SiC Diode Characteristics“, Proceedings of the International Conference on Silicon Carbide and Related Materials (ICSCRM 2003)

3.7.3. Vorträge und Posterpräsentationen

T. Dirnecker: „Influence of Photoresist Pattern on Charging Damage During High Current Ion Implantation“, 7th International Symposium on Plasma and Process-induced Damage, Maui (HI), USA, 06.-07.06.2002

T. Dirnecker: „Influence of Antenna Shape and Resist Patterns on Charging Damage During Ion Implantation“, Posterpräsentation, 14th International Conference on Ion Implantation Technology, IIT 2002, Taos (NM), USA, 23.-27.09.2002

T. Dirnecker: „Untersuchung von Aufladungseffekten während der Ionenimplantation anhand von MOS-Kondensatoren“, Nutzertreffen Ionenimplantation, Fraunhofer Institut für Integrierte Systeme und Bauelementetechnologie IISB, Erlangen, 08.11.2002

T. Dirnecker: „Untersuchung von Aufladungseffekten“, IISB-Jahrestagung „Ionenstrahlen in der Siliciumtechnologie“, Fraunhofer Institut für Integrierte Systeme und Bauelementetechnologie IISB, Erlangen, 24.10.2003

L. Frey: „Auf dem Weg zur Siliciumcarbid-Elektronik“, Tage der Technischen Fakultät 2002, Universität Erlangen, 27.-29.06.2002

L. Frey, C. Lehrer: „Live-Vorführung einer Schaltungsmodifikation“, IISB-Jahrestagung „Ionenstrahlen in der Siliciumtechnologie“, Fraunhofer Institut für Integrierte Systeme und Bauelementetechnologie IISB, Erlangen, 24.10.2003

Fortsetzung: Vorträge und Posterpräsentationen

J. Hadži-Vuković, „Simulationsstudien zu den Kenndaten integrierbarer Hochvolttransistoren für 42 V-Bordnetz Anwendungen“, 2. Statustreffen SINA 42, Nürnberg, 17.12.2002

M.P.M. Jank: „Investigation of Implantation-Induced Defects in Thin Gate Oxides Using Low Field Tunnel Currents“, 14th International Conference on Ion Implantation Technology, Taos (NM), USA, 27.09.2002

M.P.M. Jank: „Through the Gate - Implantationen / Anwendung und Auswirkungen auf die Gateoxid-Zuverlässigkeit“, IISB-Jahrestagung „Ionenstrahlen in der Siliciumtechnologie“, Fraunhofer Institut für Integrierte Systeme und Bauelementetechnologie IISB, Erlangen, 24.10.2003

O. Krause: „Aluminiumdiffusion“, DFG-Kolloquium „Halbleiterbauelemente hoher Leistung“, Ilmenau, 18.09.2002

O. Krause: „Modellierung und Simulation der Diffusion von Aluminium in Silicium“, DFG-Abschlusskolloquium „Halbleiterbauelemente hoher Leistung“, Aachen, 24.09.2003

M. Lemberger: „Herstellung und Abscheidung neuartiger metallorganischer Precursoren für Gatedielektrika“, 1. Doktoranden-Workshop zum DFG Schwerpunktprogramm 1119 „Anorganische Materialien durch Gasphasensynthese: Interdisziplinäre Ansätze zu Entwicklung, Verständnis und Kontrolle von CVD-Systemen“, Bochum, 07.-08.06.2002

M. Lemberger: „Zirconium Silicate Films Obtained from Novel MOCVD Precursors“, IV. Symposium SiO₂ and Advanced Dielectrics, Trento, Italien, 16.-18.09.2002

M. Lemberger: „Electrical Characterization of Zirconium Silicate Films Obtained from Novel MOCVD Precursors“, 12th Workshop on Dielectrics in Microelectronics (WoDiM), Grenoble, Frankreich, 18.-20.11.2002

M. Lemberger: „Electrical Characterization and Reliability Aspects of Zirconium Silicate Films Obtained from Novel MOCVD Precursors“, Posterpräsentation, 13th Bi-annual Conference on Insulating Films on Semiconductors (INFOS '03), Barcelona, Spanien, 18.-20.06.2003

M. Lemberger: „Elektrische Charakterisierung von Zirkonsilikatschichten abgeschieden mittels neuartiger metall-organischer Ausgangsstoffe“, Klausur-Workshop zum DFG Schwerpunktprogramm 1119 „Anorganische Materialien durch Gasphasensynthese: Interdisziplinäre Ansätze zu Entwicklung, Verständnis und Kontrolle von CVD-Systemen“, Hamminkeln-Dingden, 05.-07.10.2003

M. Rambach: „Investigation of Rapid Thermal Annealed p-n Junctions in SiC“, Posterpräsentation, International Conference on Silicon Carbide and Related Materials (ICSCRM 2003), Lyon, Frankreich, 07.10.2003

M. Rambach: „Implantation und Ausheilung von SiC“, IISB-Jahrestagung „Ionenstrahlen in der Siliciumtechnologie“, Fraunhofer Institut für Integrierte Systeme und Bauelementetechnologie IISB, Erlangen, 24.10.2003

T. Rotter: „Grundlagen zu einem lateralen Bipolarschalter mit beidseitiger Emittersteuerung“, DFG-Kolloquium „Halbleiterbauelemente hoher Leistung“, Ilmenau, 17.-18.09.2002

T. Rotter: „Integrierbare laterale Hochvoltdiode ($V_{BR} > 1000V$) in Substrat-Substitutionstechnologie“, 31. Kolloquium „Halbleiter-Leistungsbaulemente und ihre systemtechnische Anwendung“, Freiburg im Breisgau, 28.-29.10.2002

Fortsetzung: Vorträge und Posterpräsentationen

T. Rotter: „Entwurfsaspekte zum lateralen Bipolarschalter mit steuerbaren Emitterstrukturen“, DFG-Kolloquium „Halbleiterbauelemente hoher Leistung“, Aachen, 23.-24.09.2003

T. Rotter: „High-Voltage Devices (>600 V) Produced with a Low-Voltage (<150 V) Smart-Power IC-Technology“, 33th European Solid-State Device Research Conference (ESSDERC 2003), Estoril, Portugal, 16.-18.09.2003

T. Rotter: „Status UBS, erste experimentelle Ergebnisse“, Seminarvortrag, Institut für Elektrophysik, Technische Universität Braunschweig, 19.12.2003

H. Ryssel: „Die Entwicklung der Mikroelektronik bis 2015 nach der ITRS (International Technology Roadmap for Semiconductors)“, 11. GMM/ITG Fachtagung, E.I.S-Workshop 2003, Kongreßzentrum Erlangen, 31.03.-01.04.2003

H. Ryssel: „Ionenimplantation in Halbleiter – 30 Jahre und kein Ende“, IISB-Jahrestagung „Ionenstrahlen in der Siliciumtechnologie“, Fraunhofer Institut für Integrierte Systeme und Bauelementetechnologie IISB, Erlangen, 24.10.2003

H. Ryssel: „Ion Implantation and Shallow Junction Formation“, IMEC-Workshop „Silicon Processing for ULSI Circuit Fabrication“, Leuven, Belgien, 27.-30.10.2003

H. Ryssel: „Die Rolle der Technologie: Leading Edge Silicon“, Treffen des ZVEI Präsidial-Arbeitskreises, Frankfurt, 30.10.2003

M. Stoisiek: „Leistungshalbleiter mit dotierungskompensierter Driftzone, eine neue Klasse von Leistungshalbleitern“, Fachtagung "Elektrische Energiewandlungssysteme", Magdeburg, 13.-14.03.2002

M. Stoisiek: „Monolithisch integrierte Smart-Power ICs für leistungselektronische Systeme“, ETG-Fachtagung „Bauelemente der Leistungselektronik und ihre Anwendungen“, Bad Nauheim, 23.-24.04.2002

M. Stoisiek: „45 Jahre Leistungshalbleiter: Wie ein Bauelement unsere Alltags-Umwelt verändert hat“, Tage der Technischen Fakultät 2002, Universität Erlangen, 27.-29.06.2002

R. Weiß: „Modeling of the Influence of the Schottky Barrier Inhomogeneities on SiC Diode Characteristics“, Posterpräsentation, International Conference on Silicon Carbide and Related Materials (ICSCRM 2003), Lyon, Frankreich, 09.10.2003

4. Lehre und Ausbildung am LEB

Obwohl der Lehrstuhl für Elektronische Bauelemente als Mitglied des Instituts für Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik (IEEI) vor allem für die Ausbildung von Elektroingenieurinnen und –ingenieuren im Studiengang EEI verantwortlich ist, wurden die Lehrveranstaltungen seit je her auch von Studierenden der Werkstoffwissenschaften, der Informatik und des Maschinenbaus besucht. Mit dem Entstehen der neuen Studiengänge Mechatronik (zur Hälfte vom IEEI getragen) und Computational Engineering sind Veranstaltungen des LEB mittlerweile in 5 Studienrichtungen fest verankert und in weiteren Richtungen als Wahllehrveranstaltungen belegbar. Als Konsequenz aus dieser Entwicklung wurde das vorliegende Kapitel grundsätzlich neu strukturiert. Die vom LEB angebotenen Lehrveranstaltungen werden nicht mehr nach ihrer Zuordnung zu Fächergruppen des Studiums der EEI aufgelistet, sondern zunächst allgemein nach ihrer Zugehörigkeit zu Grund- oder Hauptstudium bzw. weiter nach Vorlesungen, Praktika und Seminaren. Dabei wird zu jeder Veranstaltung angegeben, wie sie in die entsprechenden Studienpläne integriert ist. Zur besseren Orientierung dient die im Abschnitt 4.8 wiedergegebene Belegungsmatrix, mit deren Hilfe vom Studiengang bzw. von der gewählten Vertiefungsrichtung auf die zugeordneten Lehrveranstaltungen zu schließen ist oder umgekehrt zu einer bestimmten Veranstaltung ermittelt werden kann, in welcher Form sie in einem Studiengang wählbar ist.

4.1. Lehrveranstaltungen im Grundstudium

4.1.1. Halbleiterbauelemente

Dozent: Prof. Dr.-Ing. Heiner Ryssel

Übung: Dipl.-Ing. Tobias Dirnecker

Zeitraum: Wintersemester

Inhalt

In der Vorlesung Halbleiterbauelemente werden den Studierenden die physikalischen Grundlagen moderner Halbleiterbauelemente vermittelt. Nach einer Einleitung werden Bewegungsgleichungen von Ladungsträgern im Vakuum sowie die Ladungsträgerremission im Vakuum und daraus abgeleitete Bauelemente besprochen. Anschließend werden Ladungsträger im Halbleiter behandelt: Hier werden die wesentlichen Aspekte der Festkörperphysik zusammengefasst, die zum Verständnis moderner Halbleiterbauelemente nötig sind. Darauf aufbauend werden im Hauptteil der Vorlesung die wichtigsten Halbleiterbauelemente, d.h. Dioden, Bipolartransistoren und Feldeffekttransistoren detailliert dargestellt. Einführungen in die wesentlichen Grundlagen von Leistungsbauelementen und optoelektronischen Bauelementen runden die Vorlesung ab.

Einordnung

Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik

- Pflichtfach Grundstudium (3. Semester)

Mechatronik

- Pflichtfach Grundstudium (3. Semester)

4.1.2. Ringvorlesung Mechatronische Systeme

Dozent: Prof. Dr.-Ing. Heiner Ryssel u.a.

Zeitraum: Sommersemester

Inhalt

In der Ringvorlesung Mechatronische Systeme stellen 12 der am Studiengang Mechatronik beteiligten Lehrstühle den Beitrag ihres Spezialgebiets und die Vernetzung der Disziplinen Mechanik, Elektronik und Informationstechnologie zur Mechatronik dar. Als Demonstrator wird dabei das Automobil herangezogen. Die Vorlesungseinheit des LEB beschäftigt sich mit elektronischen Bauelementen und elektronischen beziehungsweise leistungselektronischen Systemen.

Einordnung

Mechatronik

- Pflichtfach Grundstudium (2. Semester)

4.1.3. Praktikum Mechatronische Systeme

Betreuer: Dr.-Ing. Martin März (FhG IISB),
Dipl.-Ing. (FH) Alexander Hofmann (FhG IISB),
Dipl.-Ing. Michael Jank,
Dipl.-Ing. Tobias Dirnecker

Zeitraum: Sommersemester

Inhalt

Zum Abschluss des Grundstudiums der Mechatronik werden im Praktikum Mechatronische Systeme einerseits die erlernten Grundlagen angewandt, andererseits bietet sich den Studierenden die Möglichkeit, potenzielle Vertiefungsgebiete in der Praxis näher kennen zu lernen.

Im Praktikum entwickelt eine Gruppe von etwa 10 Studierenden gemeinsam ein autonom navigierendes Fahrzeug, das einen Hindernisparcours mit variabel platzierbaren Gegenständen in möglichst kurzer Zeit überwinden soll. Dabei beschäftigen sich die Teilnehmer/innen mit allen Phasen der technischen Produktentwicklung. Auf Basis einer gemeinsam erarbeiteten Grundkonzeption werden die zu erledigenden Aufgaben separiert und die Arbeitspakete von je zwei bis drei Teilnehmer/innen detailliert ausgearbeitet. Nach dem Test der Einzelkomponenten kann das Fahrzeug zusammenmontiert und die Funktion überprüft werden. In einem Wettkampf der Gruppen untereinander werden am Ende der Veranstaltung die besten und günstigsten funktionsfähigen Konzepte ermittelt.

Weitere Informationen zum Praktikum Mechatronische Systeme finden Sie in Abschnitt 4.7.

Einordnung

Mechatronik

- Pflichtveranstaltung Grundstudium (4. Semester)

4.2. Vorlesungen im Hauptstudium

4.2.1. Produktion in der Elektrotechnik

Dozenten: Prof. Dr.-Ing. Heiner Ryssel (12 Einheiten, Wintersemester),
Prof. Dr.-Ing. Dr. e.h. mult. Dr. h.c. Manfred Geiger (LFT, 2+2 Einheiten
Winter- + Sommersemester),
Prof. Dr.-Ing. Klaus Feldmann (FAPS, 12 Einheiten, Sommersemester)

Inhalt

Die Vorlesung Produktion in der Elektrotechnik wird interdisziplinär vom Lehrstuhl für Elektronische Bauelemente, vom Lehrstuhl für Fertigungstechnologie (LFT) sowie vom Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik (FAPS) angeboten. Gegenstand der Vorlesung sind Geräte und Verfahren, die in der Produktion von elektronischen Bauelementen und Baugruppen zum Einsatz kommen. Von der Halbleitertechnologie über die Aufbau-technik bis zur Bestückung von Schaltungsträgern werden dabei in erster Linie fertigungs- und gerätetechnische Aspekte dargestellt und mechatronische Ansätze zur Bewältigung der Anforderungen diskutiert.

Einordnung

Mechatronik

- Pflichtveranstaltung Hauptstudium (5.+6. Semester)

4.2.2. Technologie integrierter Schaltungen

Dozent: Prof. Dr.-Ing. Heiner Ryssel
Übung: Dipl.-Ing. Ralf Kühnhold (WS 2001/02),
Damian Movrin, M. Sc. (WS 2002/03),
Dipl.-Phys. Bálint Meliorisz (WS 2003/04)
Zeitraum: Wintersemester

Inhalt

Die Vorlesung Technologie integrierter Schaltungen behandelt die wesentlichen Technologieschritte und Geräte zur Herstellung elektronischer Silicium-Bauelemente sowie integrierter Schaltungen. Nach einer Darstellung von Kristallzucht, Reinraum und Reinigung werden die Prozessschritte Oxidation, Diffusion, Ionenimplantation, sowie chemische und physikalische Schichtabscheidung behandelt. Es folgt ein Überblick über die Prozessschritte Lithographie, Ätztechnik und Chemisch-Mechanisches Polieren.

Einordnung

Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik

- Pflichtfach der Studienrichtung **Mikroelektronik** und im **freien Fachstudium**
- Wahlpflichtfach in der Studienrichtung **Allgemeine Elektrotechnik**
- Wahlfach

Fortsetzung Technologie integrierter Schaltungen

Mechatronik

- Bestandteil der Vertiefungsrichtung **Mikroproduktionstechnik**
- Wahlfach

Maschinenbau (Studienbeginn vor WS 2003/04)

- Vertiefungsfach in der Studienrichtung **Produktion in der Elektrotechnik**

Werkstoffwissenschaften

- Bestandteil des Wahl- oder technischen Schwerpunktfachs **Elektronische Bauelemente** (Diplom- oder Masterstudiengang mit Studienbeginn nach WS 2000/2001)

Computational Engineering

- Bestandteil des Technical Application Field **Microelectronics/Technology** (Bachelor)
- Wahlfach im Rahmen des Interdisciplinary Field (Bachelor/Master)

4.2.3. Prozessintegration und Bauelementearchitekturen

Dozent: Prof. Dr.-Ing. Heiner Ryssel

Übung: Dipl.-Ing. Ralf Kühnhold (SS 2002)
Dipl.-Phys. Bálint Meliorisz (SS 2003)

Zeitraum: Sommersemester

Inhalt

In dieser Vorlesung werden die physikalischen Anforderungen an integrierte Bauelemente und deren Umgebung definiert und Lösungsansätze anhand von Prozess-Sequenzen vorgestellt. Insbesondere wird dabei dargelegt, 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 der Architektur 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.

Einordnung

Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik

- Pflichtfach der Studienrichtung **Mikroelektronik** und im **freien Fachstudium**
- Wahlfach

Fortsetzung Prozessintegration und Bauelementearchitekturen

Mechatronik

- Bestandteil der Vertiefungsrichtung **Elektronische Bauelemente und deren Zuverlässigkeit**

Computational Engineering

- Bestandteil des Technical Application Field **Microelectronics/Technology** (Bachelor)
- Wahlfach im Rahmen des Interdisciplinary Field (Bachelor/Master)

4.2.4. Halbleiter- und Bauelementemesstechnik

Dozent: Dr. rer. nat. Lothar Frey

Übung: Dipl.-Ing. Volker Häublein (SS 2002)

Dr. rer. nat. Lothar Frey (SS 2003)

Zeitraum: Sommersemester

Inhalt

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 bilden die Messung von Dotierungs- und Fremdatomkonzentrationen sowie die Messung geometrischer Dimensionen (Schichtdicken, Linienbreiten) den Schwerpunkt.

Einordnung

Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik

- Wahlpflichtfach der Studienrichtung **Mikroelektronik**
- Wahlfach

Mechatronik

- Bestandteil der Vertiefungsrichtung **Elektronische Bauelemente und deren Zuverlässigkeit**
- Wahlfach

Werkstoffwissenschaften

- Bestandteil des Wahl- oder technischen Schwerpunktfachs **Elektronische Bauelemente** (Diplom- oder Masterstudiengang mit Studienbeginn nach WS 2000/2001)

Computational Engineering

- Wahlfach im Rahmen des Interdisciplinary Field (Bachelor/Master)

4.2.5. Ionenimplantation

Dozent: Prof. Dr.-Ing. Heiner Ryssel
Übung: Dr. rer. nat. Lothar Frey
Zeitraum: Wintersemester

Inhalt

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.

Einordnung

Wahlfach in den Studiengängen Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik, Mechatronik und im Interdisciplinary Field im Studiengang Computational Engineering

4.2.6. Zuverlässigkeit und Fehleranalyse integrierter Schaltungen

Dozenten: Dr. rer. nat. Lothar Frey
Dr.-Ing. Peter Pichler (Fraunhofer IISB)
Übung: Dr. rer. nat. Lothar Frey
Dr.-Ing. Peter Pichler (Fraunhofer IISB)
Zeitraum: Wintersemester

Inhalt

Diskutiert werden (inkl. der üblichen Verfahren für beschleunigte Zuverlässigkeitstests und zur Prognose der Lebensdauer) die wichtigsten Ausfallmechanismen für Transistoren, Metallisierung, Aufbau- und Verbindungstechnik.

Einordnung

Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik

- Wahlpflichtfach Studienrichtung **Mikroelektronik**
- Wahlfach (falls nicht anderweitig belegt)

Mechatronik

- Bestandteil der Vertiefungsrichtung **Elektronische Bauelemente und deren Zuverlässigkeit**
- Wahlfach

Computational Engineering

- Wahlfach im Rahmen des Interdisciplinary Field (Bachelor/Master)

4.2.7. Leistungshalbleiterbauelemente

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

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

Zeitraum: Wintersemester

Inhalt

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 10 V bis 10 kV bzw. Stromtragfähigkeit der Bauelemente von $0,1 \text{ A}$ 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 Leistungstransistor 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 im Sommersemester.

Einordnung

Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik

- Wahlpflichtfach in den Studienrichtungen **Allgemeine Elektrotechnik** und **Elektrische Energie- und Antriebstechnik**
- Wahlfach (falls nicht anderweitig belegt)

Mechatronik

- Wahlfach

Computational Engineering

- Wahlfach im Rahmen des Interdisciplinary Field (Bachelor/Master)

4.2.8. Smart Power Technologien

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

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

Zeitraum: Wintersemester

Fortsetzung Smart Power Technologien

Inhalt

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 (< ca. 300 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 Produkthanforderungen 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?“

Einordnung

Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik

- Wahlpflichtfach der Studienrichtungen **Mikroelektronik** und **Elektrische Energie- und Antriebstechnik**
- Wahlfach (falls nicht anderweitig belegt)

Mechatronik

- Wahlfach

Computational Engineering

- Wahlfach im Rahmen des Interdisciplinary Field (Bachelor/Master)

4.2.9. Prozess- und Bauelementesimulation

Dozent: Dr.-Ing. Dipl.-Phys. Dipl.-Math. Jürgen Lorenz (Fraunhofer IISB)

Übung: Dr.-Ing. Dipl.-Phys. Dipl.-Math. Jürgen Lorenz (Fraunhofer IISB)

Zeitraum: Sommersemester

Inhalt

In der Halbleitertechnologie wird eine Vielzahl von Prozessschritten zur Herstellung der Bauelemente verwendet. Aufgabe der Prozesssimulation ist die Voraussage vor allem der Geometrien und Dotierungsverteilungen dieser Bauelemente, woraus dann mit Hilfe der Bauelementesimulation die elektrischen Eigenschaften abgeleitet werden können.

In dieser zweistündigen Vorlesung werden die zur Beschreibung der einzelnen Prozessschritte verwendeten physikalischen Modelle dargestellt, wobei sowohl auf die historische Entwicklung als auch auf den aktuellsten Stand der Forschung eingegangen wird. Zur Auswertung dieser Modelle in ein- und mehrdimensionalen Simulationsprogrammen benötigte Algorithmen werden zusammengefasst. Anhand von Anwendungsbeispielen werden spezielle technologische Effekte und ihre simulationsmäßige Beschreibung diskutiert. Des Weiteren werden die Grundlagen der Bauelementesimulation dargestellt. Die Vorlesung schließt mit einer Bestandsaufnahme der in der Industrie verbreitetsten Prozesssimulationsprogramme sowie einem Ausblick auf die weitere Entwicklung des Gebiets sowie seiner Anwendungen.

Einordnung

Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik

- Wahlpflichtfach Studienrichtung **Mikroelektronik**
- Wahlfach (falls nicht anderweitig belegt)

Mechatronik

- Wahlfach

Computational Engineering

- Wahlfach im Rahmen des Interdisciplinary Field (Bachelor/Master)

4.2.10. Festkörperphysikalische Grundlagen der Halbleiterbauelemente

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

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

Zeitraum: Wintersemester

Inhalt

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.

Einordnung

Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik

- Wahlpflichtfach Studienrichtung **Mikroelektronik**
- Wahlfach (falls nicht anderweitig belegt)

Fortsetzung Festkörperphysikalische Grundlagen der Halbleiterbauelemente

Mechatronik

- Wahlfach

Computational Engineering

- Wahlfach im Rahmen des Interdisciplinary Field (Bachelor/Master)

4.2.11. Technik der Halbleiterfertigungsgeräte

Dozenten: Prof. Dr.-Ing. Heiner Ryssel

Hon.-Prof. Dr.-Ing. Lothar Pfitzner (Fraunhofer IISB)

Hon.-Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Schmutz (Fa. ACR, s. Abschnitt 2.2)

Zeitraum: Wintersemester

Inhalt

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, Scheibenhandhabung, 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.

Einordnung

Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik

- Wahlfach (falls nicht anderweitig belegt)

Mechatronik

- Bestandteil der Vertiefungsrichtung **Produktionssysteme**

- Wahlfach

Computational Engineering

- Wahlfach im Rahmen des Interdisciplinary Field (Bachelor/Master)

Maschinenbau

- In der Studienrichtung **Produktion in der Elektrotechnik** Bestandteil des Hauptfachs Produktionssysteme in der Elektrotechnik

4.2.12. Siliciumcarbid Hochleistungsbauelemente - Grundlagen, Technologie und Systemaspekte

Dozent: Dr.-Ing. Dietrich Stephani (Fa. SiCED, s. Abschnitt 2.2)

Zeitraum: Sommersemester

Inhalt

Die Vorlesung behandelt zunächst wesentliche Grundlagen wie Kristallstruktur, charakteristische Halbleitereigenschaften und abgeleitete Gütefaktoren. Anschließend werden Aspekte der Kristallzüchtung und Homoepitaxie, der Dotierung, der weiteren Halbleiter-Prozesstechnologie und der Aufbau- und Verbindungstechnik angesprochen. Schließlich werden die erreichten und erreichbaren Leistungsdaten von unipolaren Hochleistungsbauelementen wie MESFETs, SITs, Schottkydioden, MOSFETs, JFETs aber auch von bipolaren Bauelementen diskutiert. Auswirkungen dieser Siliciumcarbid-Hochleistungsbauelemente auf die Eigenschaften und Leistungsfähigkeit von Systemen werden abschließend analysiert.

Einordnung

Wahlfach in den Studiengängen Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik, Mechatronik und im Interdisciplinary Field im Studiengang Computational Engineering

4.2.13. Bauelementmodelle für die Schaltkreissimulation

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

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

Zeitraum: Wintersemester

Inhalt

Im Rahmen des Entwicklungsprozesses für integrierte oder mit diskreten Bauelementen aufgebauten Schaltungen wird das elektrische Verhalten vor ihrer Realisierung üblicherweise durch eine Schaltkreissimulation vorausberechnet und optimiert, z. B. mit dem Netzwerksimulationsprogramm SPICE. Dabei müssen die in der jeweiligen Schaltung vorkommenden Halbleiterbauelemente durch Bauelementmodelle (Kompaktmodelle) beschrieben werden, die einer Reihe von Ansprüchen genügen müssen: 1. Genaue Beschreibung von Klemmenströmen und Klemmenspannungen sowohl für stationäres als auch transientes Verhalten. 2. Integrierbarkeit in ein Netzwerksimulationsprogramm mit passiven Komponenten und gesteuerten Strom- und Spannungsquellen. 3. Keine wesentliche Verschlechterung von Konvergenzverhalten und Rechenzeitbedarf. 4. Verfügbarkeit von Mess- und Rechenverfahren, mit denen in einfacher und eindeutiger Weise die ein konkretes Bauelement beschreibenden Modellparameter experimentell bestimmt werden können (Parameterextraktion). Neben den seit langer Zeit eingeführten Modellen für Bipolartransistoren (Ebers-Moll-, Gummel-Poon-Modell, ...) und MOS-Transistoren (Pao-Sah, SPICE LEVEL1, -LEVEL2, -LEVEL3, ...) werden heute weiterentwickelte Modelle verwendet, die einerseits immer komplexere „Sonderbauelemente“ wie z. B. bipolare Leistungshalbleiter und andererseits immer detailliertere Betriebszustände der Bauelemente realistisch simulieren lassen. Gegenstand der Vorlesung ist die Darstellung der heute verwendeten Kompaktmodelle sowohl für die Simulation von integrierten Schaltungen als auch von Schaltungen mit diskreten Bauelementen. Es wird insbesondere auf ihre Begründung und den Zusammenhang mit den physikalischen Grundvorstellungen über das Bauelementverhalten eingegangen. Die besondere Rolle der Temperatur bildet einen eigenen Schwerpunkt: Die Auswirkung der Temperatur auf das stationäre Bauelementverhalten und die Möglichkeit der transienten Schaltkreissimulation unter Einbeziehung der Temperaturerhöhung durch die eigene Wärmeentwicklung eines Bauelementes wird behandelt. Ein weiterer

Schwerpunkt der Vorlesung besteht in der Darstellung der Verfahren und Geräte zur Parameterextraktion.

Einordnung

Wahlfach in den Studiengängen Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik, Mechatronik und im Interdisciplinary Field im Studiengang Computational Engineering

4.2.14. Mikrosystemtechnik I - Technologie der Mikrostrukturen

Dozent: Dr.-Ing. Hans Betz (Fa. STEAG Industrie, s. Abschnitt 2.2.)

Zeitraum: Wintersemester

Inhalt

Strukturierungstechniken sowie spezielle Dünnschichtprozesse für die Fertigung von mikro-mechanischen Komponenten und Bauteilen der Mikrosystemtechnik. 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.

Einordnung

Vorlesung wird seit dem Wintersemester 2002/2003 nicht mehr angeboten

4.2.15. Mikrosystemtechnik II - Komponenten und Anwendungen

Dozent: Dr.-Ing. Dietrich Stephani (Fa. SiCED, s. Abschnitt 2.2.)

Zeitraum: Sommersemester

Inhalt

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.

Einordnung

Vorlesung wird seit dem Sommersemester 2003 nicht mehr angeboten

4.3. **Praktika im Hauptstudium**

4.3.1. **Praktikum zur Technologie der Silicium-Halbleiterbauelemente**

Organisation: Dipl.-Ing Tobias Dirnecker (Sommersemester)

Dipl.-Ing. Michael Jank (Wintersemester)

Betreuer: Assistenten

Inhalt

Das Praktikum zur Technologie der Silicium-Halbleiterbauelemente vermittelt einen praktischen Überblick zum Themengebiet 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 vorgestellt. Zum Schluss werden die hergestellten Solarzellen an Hand ihrer Strom/Spannungs-Kennlinie elektrisch charakterisiert.

Einordnung

Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik

- Wahlpflichtpraktikum Studienrichtung **Mikroelektronik**
- frei wählbares „3. Praktikum“
- Wahllehrveranstaltung

Mechatronik

- Wahlpflichtpraktikum aus dem Institut für Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik
- Wahllehrveranstaltung

Werkstoffwissenschaften

- Bestandteil des 10-stündigen Wahlfachs **Elektronische Bauelemente** im Diplomstudengang und des gleichnamigen 10-stündigen technischen Schwerpunktfachs im Masterstudengang

Computational Engineering

- Bestandteil des Technical Application Field **Microelectronics/Technology** (Bachelor)
- Wahllehrveranstaltung im Rahmen des Interdisciplinary Field (Bachelor/Master)

4.3.2. **Praktikum zur Halbleiter- und Bauelementemesstechnik**

Organisation: Dipl.-Ing. Michael Jank, Dipl.-Ing. Mikhail Lazarev

Betreuer: Assistenten

Inhalt

Im Praktikum zur Halbleiter- und Bauelementemesstechnik werden einige der in der gleichnamigen Vorlesung besprochenen Messverfahren praktisch durchgeführt. Zu Beginn des Praktikums wird die Relevanz der Messtechnik zur Prozesskontrolle aber auch in der Bauelementeentwicklung 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.

Einordnung

Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik

- Wahlpflichtpraktikum Studienrichtung **Mikroelektronik**
- frei wählbares „3. Praktikum“
- Wahllehrveranstaltung

Mechatronik

- Wahlpflichtpraktikum aus dem Institut für Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik
- Wahllehrveranstaltung

Computational Engineering

- Wahllehrveranstaltung im Rahmen des Interdisciplinary Field (Bachelor/Master)

4.3.3. Praktikum Produktionstechnik II

Betreuer: Dipl.-Ing. Michael Jank

Inhalt

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 Dioden und MOS-Transistoren durch. In der theoretischen Einführung wird der Bezug zum Herstellungsprozess entwickelt. Anhand der Charakterisierung werden Methoden zur Fertigungsüberwachung mittels elektrischer Messtechnik vorgestellt.

Einordnung

Maschinenbau

- Pflichtpraktikum in der Studienrichtung **Produktion in der Elektrotechnik**

4.4. Seminare im Hauptstudium

4.4.1. Hauptseminar über ausgewählte Kapitel der Silicium-Halbleitertechnologie

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

Zeitraum: findet in jedem Semester statt

Inhalt

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 wer-

den in jedem Semester aus einem anderen Schwerpunkt gewählt. In den zurückliegenden Semestern wurden folgende Schwerpunktthemen behandelt:

- WS 2001/2002: CMOS-basierte Bildsensoren und Displays
SS 2002: Neue Bauelementekonzepte für die Forschung
WS 2002/2003: Übersicht über neuartige CMOS-Bauelemente
SS 2003: Technologien für hochintegrierte Speicherbausteine
WS 2003/2004: Einzelprozesse für zukünftige Technologiegenerationen

Einordnung

Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik

- Wahlpflichtseminar Studienrichtung **Mikroelektronik**
- frei wählbares „2. Seminar“
- Wahllehrveranstaltung

Mechatronik

- Wahlpflichtseminar aus dem Institut für Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik
- Wahllehrveranstaltung

Computational Engineering

- Wahllehrveranstaltung im Rahmen des Interdisciplinary Field (Bachelor/Master)

Maschinenbau

- Wahlpflichtseminar in der Studienrichtung **Produktion in der Elektrotechnik**

4.4.2. Numerische Simulation grundlegender Vorgänge in Halbleiterbauelementen

Organisation Prof. Dr. phil. nat. Michael Stoisiek

Zeitraum: Wintersemester

Inhalt

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.

Einordnung

Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik

- frei wählbares „2. Seminar“
- Wahllehrveranstaltung

Mechatronik

- Wahllehrveranstaltung

Computational Engineering

- Wahllehrveranstaltung im Rahmen des Interdisciplinary Field (Bachelor/Master)

4.5. Vorlesungsangebot bei der virtuellen Hochschule Bayern

4.5.1. Technologie und Architektur mikroelektronischer Schaltungen

Dozent: Prof. Dr.-Ing. Heiner Ryssel

Umsetzung: Thomas Richter, M.A.

Tutor: Dipl.-Phys. Bálint Meliorisz

Zeitraum: Kurs wird in jedem Semester angeboten

Inhalt

Darstellung verschiedener Einzelprozesse der Silicium-Halbleitertechnologie sowie Prozessfolgen zur Herstellung elektronischer Bauelemente (CMOS-Technologie) in Form einer asynchronen virtuellen Vorlesung. Zur Ergänzung und Vertiefung stehen im WWW zusätzliche Seiten zur Verfügung. Übungsblätter inkl. eines 1D-Prozess-Simulationsprogrammes können ebenfalls im WWW abgerufen werden.

Weitere Informationen zum Projekt „Technologie und Architektur integrierter Schaltungen“

Im Rahmen der Virtuellen Hochschule Bayern (vhb) werden von verschiedenen Hochschulen und Fachhochschulen in Bayern Lehrveranstaltungen erarbeitet, die mittels neuer Medien den Lernenden angeboten werden. Informationen über die vhb finden sich unter <http://www.vhb.org>.

Die vhb gliedert sich in verschiedene Fachbereiche. Der LEB ist an der so genannten „School of Engineering“ beteiligt und bietet seit dem Wintersemester 2003/2004 die vollständig überarbeitete Lehrveranstaltung „Technologie und Architektur mikroelektronischer Schaltungen“ in Form einer virtuellen Vorlesung an, die als interaktive Selbstlernumgebung zu Verfügung

gestellt wird. Aufgrund des Umfangs des Datenmaterials und der technischen Konzeption erfolgt die Distribution auf CD-ROM.

Der Kurs „Technologie und Architektur mikroelektronischer Schaltungen“ ist aus dem vhb-Pilotprojekt „Prozessintegration und Bauelementearchitekturen“ hervorgegangen. Bei seiner Entwicklung konnte nicht nur eine finanzielle Förderung, sondern auch die Betreuung durch das Projektmanagement der vhb in Anspruch genommen werden. Das Lehrangebot wendet sich an Studierende der Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik, Studierende der Werkstoff- und Materialwissenschaften sowie Studierende der Physik und sonstiger verwandter Studienrichtungen, jeweils mit entsprechenden Vorkenntnissen (Vordiplom).

Ziel ist die anschauliche Darstellung komplexer Vorgänge bei der Herstellung von Halbleiterbauelementen, die Erläuterung der zugrunde liegenden theoretischen Sachverhalte und angewendeten Fertigungsverfahren sowie der technologischen Architektur verschiedener Bauelemente. Abb. 4.1 zeigt ein Beispiel aus der virtuellen Vorlesung.

Für die Vorlesung sind zwei Semesterwochenstunden veranschlagt. Dazu werden auf der Internetseite des LEB wöchentlich aktualisierte Übungsblätter und Lösungsvorschläge (PDF-Format) im Umfang von 2 Semesterwochenstunden zur Festigung der vermittelten Inhalte zur Verfügung gestellt.

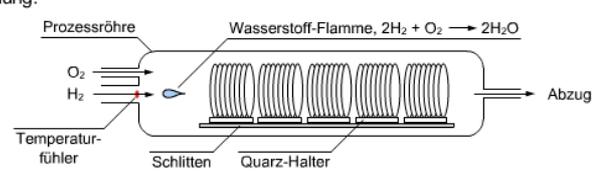
Zusätzlich wird das Material auf der CD-ROM um weitere Internetpräsentationen, z.B. diverse CMOS-Fertigungsprozesse, ergänzt. Der Zugang erfolgt jeweils über entsprechende Verweise in der Lernumgebung. Benötigt werden Benutzerkennung und Passwort, welche vom LEB bei Zustellung des Lehrmaterials nach Anmeldung bei der vhb den Kursteilnehmern mitgeteilt werden. Es besteht die Möglichkeit zum Erwerb eines benoteten Leistungsnachweises durch Teilnahme an einer Klausur oder, bei nur geringer Teilnehmerzahl, durch eine mündliche Prüfung bei Prof. Ryssel. Es werden 5 ECTS-Punkte vergeben.

Technologie und Architektur mikroelektronischer Schaltungen

Oxidation - Einleitung

O₂/H₂-Verbrennung

- Verbrennung von Wasserstoff und Sauerstoff
(Partialdruck ca. 0,9 atm = 684 Torr bis 1 atm = 760 Torr)
- mittlerweile Standardverfahren
- schematische Darstellung:



- meist separate Brennkammer aufgrund von Temperaturproblemen bei offener H₂-Flamme



Separate O₂/H₂-Brennkammer im Graubereich des Reinraums am LEB

Abb. 4.1: Beispiel aus der virtuellen Vorlesung.

Die Vorlesungsinhalte gliedern sich wie folgt:

1. Einleitung
2. Kristallzucht
3. Reinraum
4. Reinigung
5. Oxidation
6. Diffusion
7. Ionenimplantation
8. Chemische Schichtabscheidung
9. Physikalische Schichtabscheidung
10. Lithographie
11. Strukturübertragung
12. Planarisierung
13. Aufbau- und Verbindungstechnik
14. Bauelemente-Architekturen

Das Angebot ist in dieser Form neu und wird ständig weiter entwickelt. Deshalb hat der LEB ein besonderes Interesse an einer möglichst engen Zusammenarbeit mit den Kursteilnehmern. Diese umfasst unter anderem das Ausfüllen eines Fragebogens bei Ende des Kurses und die Bitte um Rückmeldung eventuell auftretender technischer, formaler bzw. inhaltlicher Schwierigkeiten. Die Teilnahme am Kurs ist kostenlos. Als kleiner Anreiz zur Mitarbeit werden auch für die Auslieferung des Lehrmaterials an die Kursteilnehmer keinerlei Gebühren erhoben. Voraussetzung zur Teilnahme ist eine ordnungsgemäße Registrierung für den Kurs „Technologie und Architektur mikroelektronischer Schaltungen“ bei der vhb unter <http://www.vhb.org> („Kursprogramm“ / „Ingenieurwissenschaften“ / „B-Kurse“). Ein Quereinstieg ist nach persönlicher Absprache möglich.

Einordnung

Der Kurs bei der virtuellen Hochschule Bayern wird Studierenden aller bayerischen Hochschulen angeboten und kann nach Anerkennung durch den jeweiligen Studienfachberater als Wahlllehrveranstaltung eingebracht werden. An der Universität Erlangen kann der erfolgreich abgeschlossene Kurs zudem im Studiengang Werkstoffwissenschaften die Vorlesung Technologie integrierter Schaltungen als Teil der technischen Schwerpunkt- bzw. Wahlfächer ersetzen.

4.6. *Praktikum Mechatronische Systeme*

Im Sommersemester 2003 absolvierte der erste Jahrgang des im Aufbau befindlichen Studiengangs Mechatronik an der Technischen Fakultät der FAU das vierte Semester. Bevor im Herbst die letzten Prüfungen zum Vordiplom abgelegt wurden, stand von Mitte April bis Anfang Juli das neu geschaffene Praktikum Mechatronische Systeme auf dem Stundenplan. Mit der organisatorisch in mehrere Einzelprojekte gegliederten Veranstaltung wagten sich sowohl die Studienkommission Mechatronik als auch die Studierenden auf unbekanntes Terrain.

Ziel des Praktikums war die Entwicklung eines Roboterfahrzeugs, das unter Umfahren von Hindernissen selbsttätig einen 1,8m x 2,5m großen Parcours durchquert, der als Modell einer

Maschinenhalle konzipiert war. Dabei durfte weder dem Fahrzeug der Weg bekannt sein, noch von außen bei der Navigation nachgeholfen werden. Einziger Anhaltspunkt war eine Zielmarkierung, die gepulstes infrarotes Licht aussandte. Zur Zielfindung und Hinderniserkennung mussten an Bord des Roboters geeignete Sensoren angebracht und deren Signale ausgewertet werden. Die Koordination von Sensoren und Motoren sowie die Ablaufsteuerung übernahm ein Mikrocontroller, der mit kostenlos erhältlicher Software programmiert werden konnte.

Zur Bearbeitung wurden die 56 Studentinnen und Studenten in sechs Gruppen aufgeteilt, die unabhängig voneinander eigenständige Roboter entwickelten. Da bis auf die Abmessungen und den Kostenrahmen keine Vorgaben zu erfüllen waren, musste jede Gruppe zunächst verschiedene Lösungsmöglichkeiten für das Chassis, den Antrieb, die Sensorik und die Steuer-routinen erarbeiten, bewerten und daraus ein Gesamtkonzept entwickeln. In einer zweiten Phase wurden die Vorschläge in die Realität umgesetzt. Bei Fragen und Problemen standen Ansprechpartner an den sechs betreuenden Lehrstühlen aus den Instituten für Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik beziehungsweise Maschinenbau und Fertigungstechnik zur Verfügung.

Am 07. Juli war es dann so weit: Im Beisein der betreuenden Professoren, unter ihnen Prof. Ryssel, damaliger Vorsitzender der Studienkommission Mechatronik, wurden die Ergebnisse der Arbeiten am Fraunhofer Institut für Integrierte Systeme und Bauelementetechnologie vorgestellt. Dabei konnten die Beobachter ganz unterschiedliche Lösungskonzepte im direkten Wettstreit vergleichen. Unter dem Beifall der Anwesenden präsentierte jede der sechs Gruppen ein voll funktionsfähiges Fahrzeug, die gestellten Anforderungen wurden problemlos gemeistert. Zum Abschluss der Veranstaltung wurden die Gruppe, deren Roboter am schnellsten das Ziel erreichte, und die Gruppe, die den günstigsten funktionsfähigen Roboter entwickelt hatte, mit Gutscheinen belohnt.

Nach Meinung von Professoren und Studierenden erwies sich die Durchführung des Praktikums als großer Erfolg. Praktische Fertigkeiten, die Vorteile der Gruppenarbeit und das Zusammenwirken von Mechanik, Elektronik und Software konnten in eindrucksvoller Weise vermittelt werden.

4.7. Exkursionen

Auch 2002 und 2003 wurden wieder je zwei Exkursionen zu Firmen der Halbleiterindustrie durchgeführt.

Am 14.06.2002 waren wir bei der Firma Philips in Böblingen zu Gast. Der Besuch stand im Zeichen der in Böblingen eingesetzten Fertigungstechnologien. Nach einer Begrüßung und Vorstellung der Philips Semiconductor GmbH wurden anhand der neuesten in Böblingen gefertigten Prozesse, darunter auch Eigenentwicklungen aus dem hauseigenen Technologiezentrum, typische Aufgabengebiete für Ingenieure in der Halbleitertechnologie erläutert. Besonders erfreut waren die 17 Mitgereisten über die Möglichkeit, nach dem gemeinsamen Mittagessen einen Rundgang in der Fertigungslinie durchführen zu können. Nach einer Besichtigung des Fehleranalyselabors wurden in zwei weiteren Vorträgen Aspekte der Qualitätssicherung und Produktbetreuung vorgestellt. Der Besuch ging mit einer Präsentation der Personalabteilung zu Ende.

Ganz anders waren die thematischen Schwerpunkte der zweiten Exkursion im Jahr 2002 zu Texas Instruments in Freising gesetzt (09.12.2002). Neben der Firmenvorstellung und einem Fachvortrag über die Freisinger Halbleiterfertigung ging es dabei um Ingenieur-tätigkeiten in der in Freising ansässigen europäischen Vertriebszentrale von Texas Instruments. Nach einer

technischen Einführung konnte ein Speziallabor für Bausteine zur Synchronisierung verschiedener integrierter Schaltungen innerhalb eines Systems besichtigt werden, in dem Hochfrequenz-Bausteine aus allen weltweiten TI-Fertigungen spezifiziert werden. Tätigkeitsbeschreibungen von Ingenieuren aus den Bereichen Kundenbetreuung und Vertrieb sowie die Darstellung des „European Graduate Program“ rundeten die Veranstaltung ab. An dieser Exkursion nahmen seitens des LEB 20 Personen teil.

Im Jahr 2003 führte uns die Exkursion am 02.06. zu Renesas (früher Hitachi) in Landshut und am 15.12. zur Firma Bosch in Reutlingen.

Die Anreise nach Landshut wurde aus Kostengründen mit der Bahn vorgenommen. Der Besuch bei Renesas begann für die 13 Teilnehmer mit der Vorstellung der neuen Firmenstruktur: Renesas wurde als Joint Venture von Hitachi und Mitsubishi Electronics Corporation im April 2003 gegründet und bietet hochintegrierte Halbleiter-Systemlösungen für den Mobil-, Netzwerk- und Automotive-Sektor, Digital Home Electronics und den industriellen Bereich. Nach der Vorstellung möglicher Arbeitsgebiete für junge Ingenieure bei Renesas in Landshut konnte eine ausführliche Werksbesichtigung vorgenommen werden. Diese umfasste neben einem Rundgang im Besuchergang des Reinraums auch die Besichtigung der zugehörigen Infrastruktur wie z.B. der Luftzu- und ableitungen oberhalb des eigentlichen Reinraumbereichs sowie der Chemikalienaufbereitung. Die nachfolgende Diskussionsrunde wurde abschließend in einen Biergarten auf der Mühleninsel in Landshut verlagert.

Bei unserem Besuch in Reutlingen wurde zu Beginn in einem Einführungsvortrag die Firmenhistorie sowie die aktuelle Firmenstruktur der Bosch-Gruppe dargelegt. In einem anschließenden Fachvortrag wurden aktuelle Entwicklungen der Firma Bosch auf dem Gebiet der kundenspezifischen Schaltungsentwicklung vorgestellt. Nach dem gemeinsamen Mittagessen konnten die 20 Exkursionsteilnehmer die Fertigungslinie für kundenspezifische Integrierte Schaltungen über den Besuchergang des Reinraums besichtigen. Mit einer Präsentation der Personalabteilung über die verschiedenen Möglichkeiten als Student z.B. Praktika oder Studien- und Diplomarbeiten durchzuführen oder als junger Absolvent den Berufseinstieg bei Bosch vorzunehmen endete der Besuch in Reutlingen.

Wir bedanken uns bei den durchführenden Firmen, insbesondere den vor Ort mit der Organisation und Präsentation betrauten Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern, für die freundliche Aufnahme.

4.8. Belegungsmatrix

Wie bereits den vorangehenden Abschnitten zu entnehmen ist, werden die Veranstaltungen des LEB nicht nur für Studenten der Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik angeboten. Die Integration des aktuellen (Stand Anfang 2004) Lehrveranstaltungsangebots des LEB in das Curriculum verschiedener an der Technischen Fakultät der Universität Erlangen vertretener Studiengänge soll die auf den beiden folgenden Seiten angebotene Übersicht aufzeigen.

Darüber hinaus besteht für Studierende weiterer Studiengänge (z.B. Physik, Informatik) die Möglichkeit, Veranstaltungen des LEB in ihr Studium einzubringen. Bei Interesse stehen die Assistenten gerne beratend zur Verfügung.

Lehrveranstaltung	Studienfach				
	Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik				
	Grundstudium	SR Mikroelektronik	SR Allgemeine Elektrotechnik	SR Elektr. Energie- und Antriebstechnik	Wahlfächer
Vorlesungen					
Halbleiterbauelemente	P				
Mechatronische Systeme (Ringvorlesung)					
Produktion in der Elektrotechnik					
Technologie integrierter Schaltungen		P	W		
Prozessintegration und Bauelementarchitekturen		P			
Halbleiter- und Bauelementemesstechnik		W			
Ionenimplantation					
Zuverlässigkeit und Fehleranalyse integrierter Schaltungen		W			
Leistungshalbleiterbauelemente			W	W	
Smart Power Technologien		W		W	
Prozess- und Bauelementesimulation		W			
Festkörperphysikalische Grundlagen der Halbleiterbauelemente		W			
Technik der Halbleiterfertigungsgeräte					
Bauelementmodelle für die Schaltkreissimulation					
Siliciumcarbid Hochleistungsbauelemente - Grundlagen, Technologie und Systemaspekte					
Technologie und Architektur mikroelektronischer Schaltungen (Virtuelle Hochschule Bayern)					
Praktika					
Mechatronische Systeme					
Technologie der Silicium-Halbleiterbauelemente		W			
Halbleiter- und Bauelementemesstechnik		W			
Praktikum Produktion in der Elektrotechnik (interdisziplinär)					
Seminare					
Ausgewählte Kapitel der Silicium-Halbleitertechnologie		W			
Numerische Simulation grundlegender Vorgänge in Halbleiterbauelementen					

SR: Studienrichtung (Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik / Maschinenbau)

VR: Vertiefungsrichtung (Mechatronik)

TAF: Technical Application Field (Computational Engineering)

Studienfach											
Mechatronik						Werkstoffwissenschaften			Computational Engineering		Maschinenbau
Grundstudium	Hauptstudium	VR Mikroproduktions-technik	VR Elektron. Bauelemente und deren Zuverlässigkeit	VR Produktionssysteme	Wahlfächer	Technisches Schwerpunktfach (Diplom)	Wahlfach (Diplom)	Technisches Schwerpunktfach (Master)	TAF Microelectronics / Technology	Interdisciplinary Field	SR Produktion in der Elektrotechnik
P											W
P											
	P										
		P				P	P	P	P		W
			P						P		
			P			P	P	P			
				P							P
						P					
P											
		W	W	W			P	P	P		
		W	W	W							
											P
		W	W	W							W

P: Pflichtfach

W: Wahlpflichtfach

4.9. Ausbildung zum Mikrotechnologen am LEB

Für die Ausbildung im Ausbildungsberuf „Mikrotechnologe“ haben die Universität Erlangen-Nürnberg und das Erlanger Fraunhofer-Institut für Integrierte Systeme und Bauelementetechnologie (IISB) eine enge Zusammenarbeit vereinbart. Dadurch wird es möglich, die Zahl der verfügbaren Ausbildungsplätze für diesen zukunftssträchtigen High-Tech-Beruf in Erlangen zu erhöhen.

Die Forschung und Entwicklung für die Halbleitertechnologie ist die Grundlage für jegliche Anwendungen der Mikro- und Nanoelektronik, die aus unserem täglichen Leben nicht mehr wegzudenken sind und damit eine enorme wirtschaftliche Bedeutung haben. Entsprechend hoch ist der Bedarf an qualifizierten Fachkräften in der Industrie.

Bereits seit 1999 ist das IISB in der Ausbildung von Mikrotechnologen aktiv. Die in Erlangen ausgebildeten Mikrotechnologen werden dabei aufgrund ihrer breiten Fachkenntnis von der Elektronikindustrie äußerst gerne eingestellt. Durch die neue Vereinbarung von Universität und Fraunhofer-Institut wird die Zusammenarbeit in der Ausbildung neben Studenten und Doktoranden auf einen Ausbildungsberuf ausgeweitet, wodurch zusätzliche Ausbildungsplätze für Mikrotechnologen geschaffen werden können.

Die moderne, größtenteils gemeinsam betriebene Geräte- und Laborausstattung von LEB und IISB ermöglicht es, den Auszubildenden ihr Wissen in einer Umgebung zu vermitteln, wie sie sonst nur in der industriellen Fertigung zu finden ist. Herzstück der Einrichtungen ist dabei – an einer Universität einzigartig - das 1000m² große Reinraumlabor des LEB.

Die enge Kooperation zwischen Universität und Fraunhofer-Gesellschaft in Erlangen erhält durch diesen erfreulichen Vorstoß für den Ausbildungsmarkt eine weitere Facette. Der neue Ausbildungszeitraum von 3 Jahren beginnt im September 2004. LEB und IISB stehen allen Interessenten mit weiterführenden Auskünften gerne zur Verfügung.

5. Arbeiten im Rahmen der Ausbildung von Studenten und Mitarbeitern

5.1. Studien- und Bachelorarbeiten

5.1.1. Erweiterung eines Kapazitäts-Spannungs-Messplatzes

(Studienarbeit von Tobias Erlbacher)

In dieser Arbeit wird, ausgehend von einem existierenden HF-Kapazitäts-Spannungs-Messplatz ein Messaufbau entwickelt, mit dem die simultane Messung von HF- und NF-Kapazitäts-Spannungs-Kennlinien während des einmaligen Durchlaufs einer Spannungstreppe möglich ist.

Hierzu werden einführend die Messverfahren zur Ermittlung von Hochfrequenz- und Niederfrequenz-Kapazitäts-Spannungs-Kennlinien erläutert. Bei den NF-Messtechniken wird dabei speziell auf die Verfahren mit Spannungsrampe und -treppe eingegangen und deren Vor- und Nachteile gegeneinander abgewogen. Dabei wird gezeigt, dass zur Erweiterung des bestehenden Messaufbaus das Messverfahren mit Spannungstreppe für die simultane NF- und HF-Messung besser geeignet ist.

Ferner wird dargestellt, welche charakteristischen Parameter sich aus den HF- und NF-C(U)-Kennlinien gewinnen lassen. Neben den diskreten Größen wie effektive Substratdotierung und Flachbandspannung wird insbesondere auf Grenzflächenzustände eingegangen. Nach der Darstellung der physikalischen Eigenschaften von Grenzflächenzuständen wird erläutert, wie man aus der gemeinsamen Auswertung von HF- und NF- Kennlinie die Verteilung der Grenzflächenzustandsdichte über dem verbotenen Band des Halbleiters ermitteln kann.

Im Anschluss daran wird ein Aufbau zur gleichzeitigen Erfassung von HF- und NF-Kennlinie beschrieben. Es stellt sich heraus, dass eine wirklich gleichzeitige Messung der Kennlinien nicht möglich ist. Die Forderung nach Simultanität bezieht sich daher auf die Messung beider Kapazitäten beim einmaligen Durchlaufen des Spannungsbereichs. Für den weiteren Verlauf der Arbeit wird wegen der oben genannten Vorteile das Verfahren der Spannungstreppe betrachtet und ein Entwurf für einen solchen Aufbau präzisiert. Schließlich wird auf die sich bei diesem Entwurf ergebenden Probleme eingegangen.

Als nächstes werden der Messplatz aufgebaut und dabei die beschriebenen Probleme weitgehend gelöst. Einer kurzen Vorstellung der verwendeten Messgeräte schließt sich dann die Beschreibung der Verschaltung an, womit die simultane Messung von HF- und NF-C(U)-Kapazität mittels Spannungstreppe realisiert wird. Eine wechselseitige Beeinflussung der Messkreise durch Messgeräte im jeweils anderen Kreis wird anhand von Kontrollmessungen ausgeschlossen.

Zur Programmierung der Ansteuerung des Messaufbaus kommt die graphische Programmiersprache LabView zum Einsatz. Das Programm gliedert sich in drei Blöcke: Das Hauptprogramm, die Messroutinen und die Auswerterroutinen. Die Routinen zur Durchführung von Messung und Auswertung werden ausführlich erläutert. Das Programm ist stark modularisiert aufgebaut und erlaubt es, Änderungen am Programm entsprechend schnell umzusetzen. Abschließend werden Messergebnisse diskutiert und Verbesserungen sowie Erweiterungen vorgeschlagen.

5.1.2. Charakterisierung von Siliciumdioxid-Silicium-Grenzflächen mit Hilfe des ELYMAT-Messverfahrens

(Studienarbeit von Andreas Ettinger)

Die vorliegende Arbeit untersucht einen neuartigen Ansatz zur Bestimmung der Grenzflächenzustandsdichte an Siliciumdioxid-Silicium-Grenzflächen und beruht auf der Detektion der Ladungsträgerrekombination an den Grenzflächenzuständen. Dabei wird eine modifizierte Elymat-Messapparatur eingesetzt, welche eine gezielte Kontrolle des Oberflächenpotenzials im Halbleiter erlaubt. Durch Anlegen einer Gleichspannung über der bei der Messanordnung vorliegenden Elektrolyt-Isolator-Halbleiter-Struktur kann der Halbleiter in Akkumulation, Verarmung oder Inversion versetzt werden. Der Einfluss des Oberflächenpotenzials auf die Grenzflächenrekombinationsrate kann mithilfe einer erweiterten Shockley-Read-Hall-Theorie modelliert werden. Demnach ergeben sich an der Grenzfläche minimale Rekombinationsraten für Akkumulation und Inversion sowie maximale Rekombinationsraten in der Verarmung. Aus der Differenz von maximaler und minimaler Oberflächenrekombinationsgeschwindigkeit können schließlich Aussagen über die Grenzflächenzustandsdichte getroffen werden.

Um diesen Ansatz zu überprüfen, wurde der am Institut vorhandene Elymat-Messaufbau entsprechend modifiziert und Messungen an mehreren thermisch oxidierten Siliciumscheiben durchgeführt, welche bei unterschiedlichen Prozessbedingungen hergestellt wurden. Bei den Experimenten wurde der beim Elymat-Verfahren durch Bestrahlung mit einem Laser induzierte Diffusionsstrom in Abhängigkeit von der angelegten Spannung gemessen. Für betragsmäßig höhere Spannungen war der Strom nahezu konstant, im Bereich um 0 V war der Diffusionsstrom deutlich geringer. Ursache dafür ist die Grenzflächenrekombination, welche im Zustand der Akkumulation und Inversion an der Halbleiteroberfläche nahezu vollständig unterdrückt wird (so genannte elektrostatische Passivierung der Grenzfläche) und im Verarmungsfall ihren Maximalwert annimmt.

Aus den Messergebnissen folgt, dass eine Formiergastemperung am Ende des Herstellungsprozesses eine Reduzierung der Oberflächenrekombinationsgeschwindigkeit bewirkt. Dies ist auf den Anteil an Wasserstoff in Formiergas zurückzuführen, welcher durch die Oxidschicht diffundiert und die offenen Silicium-Bindungen an der Isolator-Halbleiter-Grenzfläche absättigt. Aus dem gleichen Grund wurde bei Scheiben mit Feuchtoxiden eine geringere Oberflächenrekombinationsgeschwindigkeit als bei Scheiben mit Trockenoxid gemessen. Die Spannung, bei der jeweils maximale Rekombinationsgeschwindigkeit auftrat, differierte für die verschiedenen Scheiben, was durch Unterschiede bezüglich der Ladungen im Oxid bzw. unterschiedlicher Oxidkapazitäten begründet werden kann.

Bei weitergehenden Untersuchungen wurde die Abhängigkeit der Oberflächenrekombinationsgeschwindigkeit von der Laserleistung untersucht. Dabei wurde festgestellt, dass mit steigender Laserleistung die Oberflächenrekombinationsgeschwindigkeit abnimmt. Ursache dafür ist die bei hohen Injektionsniveaus auftretende Überschwemmung der Grenzflächenzustände mit Ladungsträgern.

Am Ende der Messreihen wurden die passivierenden Eigenschaften von Flußsäure mit der elektrostatischen Passivierung verglichen. Die Messergebnisse zeigen, dass die elektrostatische Passivierung vergleichbar mit der Passivierung durch Flußsäure ist. Bei den meisten Messungen war die elektrostatische Passivierung sogar effektiver.

5.1.3. Weiterentwicklung der Charakterisierung von Siliciumoxiden mit Hilfe des Elymat-Verfahrens

(Bachelorarbeit von Peter Mertas)

Die vorliegende Arbeit untersucht einen neuartigen Ansatz zur Charakterisierung der Grenzflächenzustandsdichte von Silicium-Siliciumdioxid-Grenzflächen mit der Elymat-Messapparatur. Diese wird üblicherweise für die Charakterisierung der Lebensdauer von Ladungsträgern im Halbleitervolumen verwendet. Für die Untersuchung der Grenzflächenrekombination von Ladungsträgern muss die Elymat-Apparatur modifiziert werden, um eine Gleichspannung über die Elektrolyt-Isolator-Halbleiter-Struktur (EIS-Struktur) anlegen zu können (sog. EIS-Spannung). Die Charakterisierung der Grenzflächenrekombination mit der erweiterten Elymat-Methode beruht auf der Messung eines durch einen Laser induzierten Diffusionsstroms in Abhängigkeit von der angelegten EIS Spannung. Die gemessenen Diffusionsströme werden mit theoretischen Betrachtungen verglichen.

Ausgehend von den Ergebnissen einer Arbeit von Ettinger sollte die Charakterisierung von Silicium-Siliciumdioxid-Grenzflächen mit der modifizierten Elymat-Messapparatur weiterentwickelt werden. Die von Ettinger untersuchten Proben wiesen eine niedrige Grenzflächenzustandsdichte auf, unter anderem bedingt durch Formiergastemperung. Um den Anwendungsbereich des neuartigen Verfahrens zu untersuchen, wurden weitere p-dotierte, thermisch oxidierte Siliciumscheiben charakterisiert, welche beim Herausfahren aus dem Oxidationsofen mit Stickstoff gespült wurden. Dadurch ist eine hohe Grenzflächenzustandsdichte bedingt.

Der Einfluss des Oberflächenpotenzials auf die Grenzflächenrekombination wird durch eine erweiterte Shockley-Read-Hall (SRH) Theorie modelliert. Das Oberflächenpotenzial selbst kann in Abhängigkeit von der angelegten Gleichspannung und der Laserintensität nach einer Theorie von Girisch bestimmt werden. Diese beschreibt die Oberflächenrekombination in beleuchteten MOS (Metal-Oxide-Semiconductor) Strukturen unter vereinfachten Bedingungen. Gemäß dieser Theorie ist die Grenzflächenrekombination in Akkumulation und starker Inversion vernachlässigbar, während in Verarmung bzw. schwacher Inversion maximale Oberflächenrekombination stattfindet. Durch den Vergleich von minimaler und maximaler Grenzflächenrekombinationsgeschwindigkeit können Rückschlüsse auf die Grenzflächenzustandsdichte gezogen werden. In Akkumulation erreichten die gemessenen Diffusionsströme ein Maximum, wohingegen für Verarmung bzw. schwache Inversion die kleinsten Diffusionsströme gemessen wurden. In starker Inversion wiederum wurden höhere Ströme gemessen als in Verarmung bzw. schwacher Inversion. Insoweit stimmen die Messergebnisse gut mit der Theorie und früheren Untersuchungen überein.

Es wurden jedoch zwei Effekte beobachtet, die mit der Theorie nach Girisch nicht erklärt werden konnten: Erstens waren die gemessenen Ströme in starker Inversion deutlich geringer als in Akkumulation. Zweitens waren die kleinsten gemessenen Diffusionsströme geringer als es theoretische Berechnungen erwarten ließen, und das selbst unter der Annahme einer unendlich hohen Grenzflächenrekombinationsgeschwindigkeit. Der zweite Effekt konnte mit der Abhängigkeit der Diffusionslänge der Ladungsträger vom Injektionsniveau erklärt werden. Was die geringen Diffusionsströme in starker Inversion betrifft, so lieferten komplexe numerische Simulationen erste Hinweise darauf, dass zweidimensionale Effekte die Ursache für unterschiedliche Diffusionsströme in starker Inversion und Akkumulation sind.

5.1.4. Aufbau und Inbetriebnahme eines Messplatzes zur Charakterisierung von Feldemitter-Strukturen

(Studienarbeit von Jörg Hejny)

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit dem Aufbau und der Inbetriebnahme eines Messplatzes zur Charakterisierung von integrierten Feldemitterstrukturen im Submikrometerbereich anhand von Strom-Spannungs-Kennlinien. Einige der zur Herstellung der Feldemitterstrukturen notwendigen Prozessschritte wurden mit Hilfe einer Feinfokus-Ionenstrahl-Anlage durchgeführt. Um die Messungen der Strom-Spannungs-Kennlinien im Vakuum durchführen zu können, wurde eine geeignete Vakuumkammer aufgebaut. Die Geräte zur Spannungsversorgung und Strommessung wurden aufgebaut, und der Versuchsaufbau wurde getestet.

Mit dem Messplatz wurden unterschiedliche Proben charakterisiert. Bei den meisten Proben konnte keine Emission beobachtet werden. Die Gründe hierfür waren, dass die Emmitter entweder auf Oxid abgeschieden wurden, die Emmitter zu instabil waren und kippten oder dass Probleme durch das Bonden oder Sägen der Proben auftraten. Die Ergebnisse dieser Messungen und die Erstellung von Rasterelektronenmikroskopaufnahmen der charakterisierten Proben wurden verwendet, um die Schritte zur Probenpräparation zu optimieren und um den Messplatz an die dadurch festgestellten Anforderungen anzupassen. Am Ende der Arbeit wurden an einer emittierenden Probe Strom-Spannungs-Kennlinien gemessen und diskutiert. Die Auswertung der Messungen erfolgte mit Fowler-Nordheim-Kurven. Die Einsatzspannung der Feldemitterstruktur lag im Bereich von -30 V. Die Dauerfestigkeit der integrierten Feldemitter ist noch zu verbessern, da auch diese Probe nur über einen relativ kurzen Zeitraum von etwa einer Stunde Feldemission zeigte. Durch die bei den Messungen gewonnenen Ergebnisse konnten die Prozessschritte zur Herstellung der Feldemitter optimiert werden.

5.2. Diplom- und Masterarbeiten

5.2.1. Nanostrukturen für nichtflüchtige Speicher

(Diplomarbeit von Andreas Vogl)

Der steigende Bedarf an nichtflüchtigen Speichern führt dazu, dass auch auf diesem Gebiet der Mikroelektronik neue Möglichkeiten untersucht werden, die Miniaturisierung voranzutreiben und die Herstellungsprozesse zu vereinfachen. Häufige für solche nichtflüchtigen Speicher eingesetzten Bauelemente sind sogenannte Floating-Gate-Transistoren. Diese besitzen verglichen mit herkömmlichen Transistoren ein zusätzliches isoliertes Gate im Dielektrikum des Transistors. Dies dient dazu darin Ladungen zu speichern und damit die Einsatzspannung des Transistors zu verschieben. Statt eines herkömmlichen kompakten Floating-Gates lässt sich ein sogenanntes nanokristallines Floating-Gate verwenden, das aus einzelnen Nanoinseln besteht, die ihrerseits ebenfalls geladen werden können. Solche Nanostrukturen lassen sich mit Hilfe der Ionenimplantation und anschließendem Ausheilen herstellen.

Ziel dieser Arbeit war es, verschiedene Implantationen und unterschiedliche Ausheilbedingungen hinsichtlich der Anwendbarkeit zur Herstellung solcher Nanoinseln zu untersuchen. Dazu wurden zunächst anhand von Angaben aus der Literatur - soweit möglich - die Implantationen von Ge und Si ins Gateoxid mit dem Simulationsprogramm TRIM simuliert und diese Simulationen als Vorgabe für die Herstellung der ersten Proben herangezogen. Die ursprüngliche Gateoxidstärke der Proben betrug 20 und 30 nm. Zunächst wurden Implantationen von Si in diese Strukturen durchgeführt. In 30 nm dicke Gateoxide wurden mit einer herkömmlichen Implantationsanlage SiF_3^+ -Ionen mit einer Energie von 25 keV implantiert und anschließend mit Hilfe von Kurzzeitausheilen (RTP) bei 950°C, 30 s bzw. im Ofen bei 950°C,

30 min lang ausgeheilt. In 20 nm dicke Oxide wurden Implantationen von Si mit Hilfe einer neuartigen Niedrigenergieimplantationsanlage vorgenommen. Dabei wurden bauartbedingt alle möglichen im Plasma vorhandenen Ionen mit einer gewissen Energieverteilung implantiert und die Strukturen anschließend wieder ausgeheilt. Bei dieser Implantationsart wurde ebenfalls eine große Menge an Fluor in die Strukturen eingebracht.

Die anschließenden elektrischen Messungen zeigten für beide Implantationsarten keine aufladbaren Strukturen. Die Ursache dafür ist vermutlich eine Veränderung der Ausscheidungsfähigkeit des Siliciums aufgrund der Anwesenheit von Fluor. Im Weiteren wurden deshalb Implantationen von Ge durchgeführt, das aufgrund seiner höheren Masse als elementares Ion bei einer Energie von 20 keV in 30 nm dicke Oxide implantiert werden konnte. Diese Implantationen wurden mit einer herkömmlichen Implantationsanlage vorgenommen. Die Proben wurden ebenfalls wieder mit den oben beschriebenen Ausheilarten nach der Implantation behandelt. Bei den elektrischen Messungen ergab sich eine Aufladbarkeit der Strukturen, die im Ofen ausgeheilt wurden. Die anschließend durchgeführten Untersuchungen mit dem Transmissionselektronenmikroskop ergaben für die mit einer Dosis von 10^{16}cm^{-2} implantierten Strukturen Ge-Nanoinseln mit einer Größe von maximal 8 nm, die in zwei Bändern angeordnet sind, wobei das untere Band weniger dicht mit Nanoinseln besetzt ist.

5.2.2. Entwicklung eines kostenoptimierten Frequenzumrichters

(Diplomarbeit von Andreas Baumüller)

Um eine Umstellung der Antriebssysteme im Konsumentenbereich von herkömmlicher mechanischer Laststeuerung auf eine elektronische Laststeuerung zu erleichtern, ist in dieser Arbeit ein Low-Cost-Frequenzumrichter der Leistungsklasse 750W entwickelt worden.

Das vollständige Aufbaukonzept eines Frequenzumrichters wird zur Kostenoptimierung überarbeitet. Hierbei sind spezielle Entwicklungsschwerpunkte auf die Bereiche Netzfilter, Zwischenkreis, Leistungsteil, Hilfsspannungsversorgung, Mikrocontroller und Leistungsfaktorkorrektur gelegt. Dort wird nach Einsparungsmöglichkeiten gesucht, ohne benötigte Funktionen einzuschränken. Ein besonderes Augenmerk wurde auf eine kostenoptimierte Aufbau-technik gerichtet. Diese Betrachtung erstreckt sich von der Produktion bis in die Qualitätssicherung über alle Sparten. Dabei sind viele Neuentwicklungen in diesen Bereichen entstanden, die eine deutliche Reduktion der Kosten des Frequenzumrichters ermöglichen.

Anhand dieser Ergebnisse wurde ein Schaltungskonzept entwickelt. Ausgehend von diesem wurden verschiedene Aufbaumöglichkeiten miteinander verglichen. Aus diesem Vergleich haben sich zwei Aufbauten für einen Low-Cost-Frequenzumrichter herauskristallisiert. Zum einen einer mit diskret aufgebautem Leistungsteil und passiver Leistungsfaktorkorrektur, zum anderen einer, bei dem ein Smart-Power-Modul mit integrierter aktiver Leistungsfaktorkorrektur zum Einsatz kommt. Beide Varianten haben eine kostenoptimale Aufbaustruktur und sind je nach Einsatzgebiet zu wählen. Auf die Einsatzgebiete, für die sich die jeweilige Variante eignet, wird in der Arbeit detailliert eingegangen.

Zusätzlich wird noch ein neues Konzept für den Kühlkörpereinsatz erarbeitet. Dabei werden bereits vorhandene Baugruppen im Endprodukt, in das der Low-Cost-Umrichter montiert werden soll, mit einbezogen. Dadurch ist ein erhebliches Einsparungspotenzial bei den gesamten Produktkosten möglich.

Im Rahmen der Arbeit wurde ein vollständiger Low-Cost-Umrichter entsprechend der hier gewonnenen Erkenntnisse dimensioniert und aufgebaut.

5.2.3. Untersuchungen zur Realisierbarkeit einer mehrkanaligen analogen Signalübertragung über eine Stromschleife unter Berücksichtigung der extremen elektromagnetischen Störfelder in einem Hochleistungsumrichter

(Diplomarbeit von Markus Hofmair)

In dieser Arbeit wurden Untersuchungen für eine leitungsgebundene Übertragung von analogen Größen unter Berücksichtigung der extremen elektromagnetischen Störfelder in Umrichteranwendungen durchgeführt.

Dabei ist die Störfestigkeit zweier unterschiedlicher Übertragungsverfahren - der analogen Stromschleife und der Übertragung eines Spannungssignals - miteinander verglichen worden. Ferner wurde das Verhalten der Parallelschaltung von mehreren räumlich getrennten Analogstromquellen im oben genannten Umfeld analysiert.

Zunächst erfolgten der Aufbau und die Inbetriebnahme der für die jeweilige Übertragungsart notwendigen Schaltungen. Für die Übertragung des Signals mittels analoger Stromschleife wurden bei der Umwandlung des Stromsignals in einen Spannungswert auf der Empfängerseite zwei verschiedene Möglichkeiten entworfen - der Widerstand als Messshunt und die stromgesteuerte Spannungsquelle.

Um den Einfluss eines RC - Tiefpasses auf die Qualität des Übertragungssignals zu untersuchen, erfolgten die Dimensionierung und der Aufbau eines solchen Filters für verschiedene Grenzfrequenzen.

Als Störungen werden einmalige Signale bzw. Transienten angesehen, die das Nutzsignal für eine gewisse Zeit und mit einer bestimmten Höhe überschreiten. Anhand eines Oszilloskops können bei Störeinkopplung solche Störungen sichtbar gemacht werden. Eine Beurteilung der Störfestigkeit ist so jedoch nur subjektiv möglich. Deshalb wurde für die Untersuchungen ein Messmittel entwickelt, um die Störfestigkeit der beiden Übertragungsverfahren mit unterschiedlichen Übertragungsmedien quantitativ miteinander zu vergleichen - der Impulsdetektor. Dieser erkennt einen Impuls, der die Spannung des Nutzsignals um einen einstellbaren Spannungswert übersteigt. Bewertbare und reproduzierbare Messungen am Umrichter selbst sind nicht durchführbar, da durch den Umrichter zu viele unbekannte, nicht beeinflussbare Störgrößen gleichzeitig auftreten.

Die elektromagnetischen Störfelder sind deshalb in Form von definierten Impulspaketen von einem Burstgenerator erzeugt und entweder über eine kapazitive Koppelstrecke oder über eine Magnetfeldsonde in das System eingekoppelt worden. Über die Impulsspannung des Burstgenerators kann so die Intensität der Störung eingestellt werden. Dabei erfolgte eine Bewertung der Störfestigkeit mit Hilfe des Impulsdetektors. Abschließend sind die am Burstgenerator durchgeführten Messungen exemplarisch an ausgewählten Beispielen an einem Umrichter verifiziert worden.

Die Messungen haben gezeigt, dass bei der analogen Stromschleife generell keine Nachteile gegenüber der Spannungsübertragung in Bezug auf die Störanfälligkeit zu erwarten sind. Beste Ergebnisse lieferte die Spannungsübertragung mit einem geschirmten Kabel. Allerdings kann der Aufwand einer Kabelschirmung durch den Einsatz eines einfachen RC - Filters weitgehend kompensiert werden.

Erfolgt eine Addition mehrerer Signale, hat die analoge Stromschleife den Vorteil, dass dafür keine weitere Schaltung mehr erforderlich ist.

5.2.4. Entwicklung eines bidirektionalen isolierenden DC/DC-Wandlers

(Diplomarbeit von Andreas Schletz)

In dieser Diplomarbeit wurde ein bidirektionaler, isolierender DC/DC-Wandler in Cuk-Topologie entwickelt. Zunächst konnte eine Dimensionierung des Leistungsteils mit Hilfe von "Maple" bzw. "MathCad" berechnet und diese in einer Simulation mit "PSpice" verifiziert werden. Mit dieser Dimensionierung war es möglich, die eigentlichen Bauteile wie Induktivitäten, Kapazitäten, den Transformator und die Halbleiter-Bauelemente auszuwählen, bzw. anzufertigen. Gleichzeitig wurde ein Schaltplan mit "Eagle" gezeichnet und ein Layout daraus erstellt. Nach den geometrischen Daten des Layouts wurde die Wasserkühlung gefertigt. Nach der Inbetriebnahme des Konverters konnte dieser einer elektrischen Charakterisierung unterzogen werden.

5.2.5. Untersuchung von Masseninterferenzen in der Ionenimplantation

(Diplomarbeit von Christian Reidl)

Diese Arbeit beschäftigt sich mit Untersuchungen von Masseninterferenzen in der Ionenimplantation. Die Interferenzen entstehen durch Massen- und Ladungsänderungen der Ionen nach der Extraktion und vor der Massenseparation in der Ionenimplantationsanlage und führen zu einer Vielzahl an Möglichkeiten für energetische Kontaminationen des zu implantierenden Halbleiters.

Zum besseren Verständnis über die Auswirkungen der Massen- und Ladungsänderungen wird in der Arbeit zuerst auf den grundsätzlichen Aufbau und die Funktionsweise von Ionenimplantationsanlagen eingegangen. Danach werden die möglichen Ursachen und auch die verschiedenen Auswirkungen auftretender Masseninterferenzen behandelt. Anhand von Massenspektren, die mit verschiedenen Quellgasen wie Arsen, Argon, Phosphor, Bor, Stickstoff und verdampftem Aluminium angefertigt wurden, werden mögliche Masseninterferenzen gesucht. Dabei werden unterschiedliche Extraktionsspannungen und Gasdrücke in der Quelle sowie Ionenquellen aus unterschiedlichen Materialien berücksichtigt. Von den verschiedenen möglichen Masse- und Ladungsänderungen, welche in den Massenspektren gefunden wurden, wurden einige Interferenzen durch Implantationsexperimente verifiziert. Hierbei wurden die Ionen in Siliciumscheiben implantiert und letztere mit verschiedenen Messmethoden, wie Messung des Ausbreitungswiderstandes, ELYMAT oder Kapazitätstransientenanalyse, untersucht. Die jeweiligen Messmethoden werden jeweils angesprochen.

In der Arbeit wurde gezeigt, dass Masseninterferenzen durch Masse- und Ladungsänderungen durch verschiedenste Ladungs- und Masseänderungen auftreten und somit ein Kontaminationsrisiko in der Ionenimplantation darstellen.

5.2.6. Entwicklung eines bidirektionalen 15 kW DC/DC-Wandlers

(Diplomarbeit von Daniel Kübrich)

Ziel dieser Diplomarbeit war die Entwicklung eines bidirektional arbeitenden Gleichspannungskonverters mit einer Leistung von 15 kW. Dieser Wandler wird in einem Elektrofahrzeug als Bindeglied zwischen der Brennstoffzelle als Primärenergiequelle und einem Pufferspeicher zur Deckung von Lastspitzen benötigt. Aufgrund der nicht notwendigen galvanischen Trennung ist der Wandler als dreiphasiger Drossel-Aufwärts-Abwärts-wandler entworfen worden.

Die Auswahl der Komponenten der Kommutierungszelle des Leistungsteils (Leistungshalbleiter, Leistungsdrossel und Kapazitäten) erfolgte anhand von Berechnungen und Simulationen mit Mathcad beziehungsweise PSpice. Im Detail betrachtet wurde der Energiespeicher,

die Leistungsdrossel. Hierbei wurden verschiedene Kerne ausgewählt und die Drosseln dimensioniert. Muster wurden hergestellt und diese unter betriebsnahen Bedingungen vermessen. Zur Eigenversorgung des Konverters wurde ein spezieller Sperrwandler mit weitem Eingangsspannungsbereich aufgrund der stark lastabhängigen Ausgangsspannung der Brennstoffzelle entwickelt. Die zum Aufbau benötigten und teilweise übereinander angeordneten Leiterplatten sowie die dazugehörigen Schaltpläne wurden mit dem CAD-Programm EAGLE erstellt.

Die Spezifikationen konnten durch Messungen (z. B. charakteristischer Zeitverläufe, Wirkungsgrad, Erwärmung) an einem Musteraufbau im Labor nachgewiesen werden. Die Messergebnisse stimmen gut mit den Berechnungen überein, die gesetzten Anforderungen werden voll erfüllt.

5.2.7. Monte-Carlo Simulation von Rückstreuung und Sputtering

(Diplomarbeit von Michael Ullrich)

Im Rahmen dieser Arbeit sollten die zurückgestreuten und abgesputterten Atome bei Ionenbeschuss auf ihre Richtungsverteilung und ihre Energie untersucht werden. Von besonderem Interesse ist dabei der Ionenbeschuss von Eisen unter streifendem Einfall, da dieser Fall an Wänden und Blenden von Implantationsanlagen auftreten kann. Untersucht werden sollen insbesondere die abgesputterten Eisen-Atome, die in Ionenstrahlrichtung fliegen, da diese auf die Siliciumscheibe gelangen können. In der Halbleitertechnik ist Eisen eines der kritischsten Kontaminationselemente in Silicium, da es ein sehr effektives Rekombinationszentrum darstellt.

Die Abbremsung eines energiereichen Teilchens in einem Festkörper ist zum einen bestimmt durch die auftretende elektronische Abbremsung des Teilchens, zum anderen durch die Richtungs- und Energieänderung infolge von Kollisionen mit Festkörperatomen. Die elektronische Abbremsung sowie der atomare Kollisionsvorgang werden mit dem Modell von Biersack, Ziegler und Littmark beschrieben.

Basierend auf diesem Modell wurde ein Computerprogramm entwickelt, das durch ein iteratives Verfahren die Teilchenbewegung im Festkörper simuliert, wobei die Kollisionskaskaden berücksichtigt werden. Das Programm erlaubt die Betrachtung von Ionenquellen mit mehreren Ionensorten und -energien, und mehrschichtigen Festkörpern als Targets. Die räumliche Simulation der Teilchenbewegung erlaubt die Auswertung der Richtung und Energie der abgesputterten Teilchen.

Der Vergleich eines simulierten Tiefenprofils mit den Ergebnissen anderer Programme und mit Messwerten lieferte eine gute Übereinstimmung. Durch Kalibrierung der Bindungsenergien der Festkörperatome konnten die in der Literatur gefundenen Sputtereffekte, wie die Abhängigkeit der Sputterraten von der Anfangsenergie oder dem Einschusswinkel des Ionenstrahls, mit dem Programm reproduziert werden.

Der Ionenbeschuss von Eisen unter streifendem Einfall wurde mit Hilfe des Programms näher betrachtet. Besonderes Augenmerk wurde auf die abgesputterten Eisen-Atome gelegt, die in Richtung des Ionenstrahls fliegen. Es konnte ermittelt werden, wie viele Teilchen des Ionenstrahls auf das Eisen treffen müssen, um ein Eisen-Atom in einen spezifizierten Raumbereich in Ionenstrahlrichtung zu erhalten. Des Weiteren wurde herausgefunden, dass die Eisen-Atome in Ionenstrahlrichtung die höchste Energie aller abgesputterten Eisen-Atome besitzen.

Bei der Simulation der Richtungsverteilungen hat sich eine Häufung der abgesputterten Atome in einer Ebene senkrecht zum Ionenstrahl ergeben. Es konnte gezeigt werden, dass diese Häufung durch primär gestoßene Teilchen verursacht wird. In der Häufungsebene ist die Teil-

chendichte im Vergleich zu den übrigen Raumpunkten mehr als doppelt so hoch. Die durchschnittliche Energie der Teilchen in der Häufungsebene betrug ungefähr die Hälfte der Energie aller übrigen abgesputterten Teilchen.

Zusammenfassend kann eine quantitative und qualitative Abschätzung über die Verunreinigung aufgrund von abgesputterten Teilchen aus Wänden und Blenden gegeben werden. Der beobachtete Effekt der Häufung der abgesputterten Teilchen könnte zur Verbesserung der SIMS-Analyse ausgenutzt werden.

5.2.8. Implementierung eines effizienten Level-Set-Algorithmus zur Simulation von Photolackprofilen für die (optische) Lithographie

(Masterarbeit von Roger Wambou)

Diese Masterarbeit beschreibt die Implementierung und den Test von Level-Set-Algorithmen zur Simulation der Entwicklung von belichteten Photolacken. In den letzten Jahren haben sich Level-Set-Methoden als eine effiziente Alternative zur Simulation von beweglichen Oberflächen durchgesetzt. In der optischen Lithographie bewegt sich die Grenzfläche zwischen dem Entwickler und dem Photolack nur in einer Richtung. Dies erlaubt die Anwendung sehr effizienter Fast-Marching-Methoden. Die zu betrachtende Fläche wird in eine Hyperfläche eingebettet, wobei das Nullniveau der Hyperfläche die initiale Grenzfläche ist. Diese Grenzfläche wird dann explizit als Level-Set einer kontinuierlichen Funktion definiert. Diese Funktion wird entsprechend einer gegebenen Geschwindigkeitfunktion aktualisiert, um die Bewegung der Grenzfläche zu beschreiben. Die Geschwindigkeitfunktion wird von einem Lithographiesimulator berechnet. Die Position der Grenzfläche wird errechnet, indem man den entsprechenden Level-Set der kontinuierlichen Funktion extrahiert. Fast-Marching-Methoden verwenden den Heap-Sort-Algorithmus, um eine optimale Anordnung der Unbekannten in der diskreten Form der beschreibenden Gleichung zu finden, so dass unnötige Wiederholungen vermieden werden können. Ein Fast-Marching-Algorithmus wurde implementiert und die Resultate werden dargestellt. Vergleiche mit anderen Algorithmen wurden durchgeführt.

5.2.9. Entwicklung eines Messsystems zur Erfassung von Widerstand, Dicke und Leitungstyp von Siliciumscheiben und Integration in eine Fertigungsumgebung

(Diplomarbeit von Reiner Zitzmann)

Im Verlauf dieser Arbeit wurden alle Projektschritte durchlaufen, die zur Planung und Implementierung eines Gerätes in der industriellen Fertigung gehören. Zu Beginn der Arbeit wurden die theoretischen Grundlagen beleuchtet, die in dem zu automatisierenden Messgerät MRES 2000 PN eingesetzt werden. Dabei wurden die kontaktlosen Messverfahren zur Aufnahme von Widerstand, Leitungstyp und Dicke von Halbleiterscheiben erarbeitet.

Anschließend wurde ein voll automatisch arbeitendes Gesamtsystem zur Aufnahme der Parameter Dicke, Leitungstyp, spezifischer Widerstand von Halbleiterscheiben erstellt. Das erstellte Gesamtsystem besitzt darüber hinaus die Fähigkeit, die Scheibenkennung der zu vermessenden Scheiben aufzunehmen und diese mit den ermittelten Messwerten und weiteren vom Benutzer einzugebenden Parametern zu verknüpfen. Nach Abschluss der Messungen kann das vom Gesamtsystem zusammengestellte Messwertprotokoll dem Fertigungssteuerungssystem der Firma isiltec GmbH übergeben werden.

Zur Realisierung dieses Gesamtsystems wurde dabei, wie im Folgenden beschrieben, vorgegangen. Zuerst erfolgte die Konzeption des Gesamtsystems. Es wurde eruiert, welche Komponenten für die Automatisierung des Messgerätes MRES 2000 PN Manuell bereits vorhan-

den waren und welche erst noch zu entwickeln gewesen sind. Zu Arbeitsbeginn standen die Komponenten Scheibentransferroboter, Messgerät MRES 2000 PN Manuell, Linearschiene, "Gerät zur Orientierung der Scheiben" und "Lesegerät zur Aufnahme der Scheibenkennung" zur Verfügung. Der zentrale Steuerrechner wurde mit einer digitalen Schnittstellenkarte und zwei zusätzlichen seriellen Schnittstellen ausgerüstet, um mit allen Geräten kommunizieren zu können.

Um Steuersignale mit der richtigen Spannung generieren und auslesen zu können, sind im Verlauf der Arbeit Steuerplatinen entstanden. Ebenfalls wurde eine Platine entwickelt, welche die Aufgabe übernimmt, die Versorgung der Einzelkomponenten mit der richtigen Versorgungsspannung zu gewährleisten.

Im Anschluss erarbeitete ich die Grundlagen einer modernen Fertigungsumgebung in der Halbleiterindustrie. Anschließend wurde die Fertigungsumgebung bei der Firma isiltec GmbH beschrieben und die Integration des Gesamtsystems durchgeführt.

Im nächsten Schritt galt es, die Steuerungssoftware zu entwickeln. Dazu wurden Funktionsmodi des Gesamtsystems erarbeitet, diese auf maximalen Durchsatz überprüft und in der Entwicklungsumgebung LabVIEW implementiert.

Nach Fertigstellung des gesamten Messsystems musste sichergestellt werden, dass ein störungsfreier, allen Sicherheitsaspekten Rechnung tragender Dauerbetrieb des entwickelten Gesamtsystems gewährleistet ist. Zu diesem Zweck wurde das Gesamtsystem in die industrielle Fertigung der Firma isiltec GmbH integriert. Nach dem Beheben aller aufgetretenen Mängel, konnte das entwickelte Gesamtsystem zur industriellen Fertigung freigegeben werden.

5.3. *Promotionen*

5.3.1. **Contamination Aspects in Integrating High Dielectric Constant and Ferroelectric Materials into CMOS Processes**

(Hocine Boubekeur, Originalarbeit in englischer Sprache)

The development of a new memory generation implies always further downscaling of the device dimensions, while maintaining the storage charge at an adequate level to retain data against leakage current. With the ever continuing downscaling, this minimum charge was ensured through the compensation of the capacitance by increasing the area or using thinner dielectric having relatively high dielectric constant. The use of thinned Oxynitride (ON) as storage dielectric, alone was not sufficient for the achievement of the required capacitance for the good device operation. To increase the capacitor area, the architecture of the cell was modified from a simple planar capacitor to complicated 3D trench capacitor structures. Consequently, further development using this concept, is approaching its limits, in terms of physical thickness and production cost. Therefore, new materials are being introduced in microelectronics to overcome integration limits and to be able to manufacture new products.

The most prominent examples in memory technology are the high dielectric constant barium strontium titanate (BaSrTiO_3 or BST) and ferroelectric strontium bismuth tantalate ($\text{SrBi}_2\text{Ta}_2\text{O}_9$ or SBT) or lead zirconate titanate ($\text{PbZr}_x\text{Ti}_{1-x}\text{O}_3$ or PZT) materials. BST exhibits one of the highest dielectric constants ever measured and, therefore, is seen as a promising material for storage capacitors in future gigabit range DRAM. BST is also widely investigated for thin film gate dielectric as alternative to the silicon oxide based gate dielectrics. Ferroelectric memories (FeRAMs), based on layered perovskite materials as capacitor dielectric, have recently found increasing interest due to the non-volatility of data storage, the potential

of high integration scale because of small DRAM-like cell size, fast read and write as well as low voltage/low power properties.

While it is likely that FeRAM has the potential to replace the conventional Flash memory as the next nonvolatile memory generation and that it is of great advantage to replace capacitor dielectric by BST material in DRAM, one of the important remaining questions is the compatibility of these materials with the standard CMOS processes. The acceptance of new elements in a semiconductor fabrication is difficult because many elements cause serious degradation of device properties.

This thesis is aimed at contamination issues in integrating ferroelectric strontium bismuth tantalate and high-k barium strontium titanate materials with noble metals iridium/platinum as electrodes. To achieve this purpose, a comprehensive study of the properties of barium, strontium, bismuth, iridium, and platinum in silicon was necessary in addition to the assessment of the impact of these elements on the device performance, reliability, and production yield.

Results

A) Résumé of the Properties of the Contaminants

After annealing at high temperatures, most Ba and Sr atoms are dissolved in the native oxide or included in the thermally grown oxide. This tendency prevents their cross-contamination during annealing in N₂ or O₂ atmosphere. Whereas Bi evaporates mainly if annealed in N₂ and consequently leads to a critical cross-contamination, during oxidation Bi is included in the thermally grown oxide and is not found in significant amounts on the facing surface of a neighboring, initially clean wafer. In terms of cleaning, most Ba, Sr or Bi impurities are removed after a slight etch of the oxide (native or thermal).

Another, beneficial property of Ba and Sr is that both are found to diffuse only over distances of tens of nanometers after an anneal at high temperatures. They exhibit low diffusivities in silicon and are found to belong to very slow diffusing elements. Bi does not diffuse into silicon at temperatures of 800°C or below, and, therefore, is of no concern in BEOL processing.

Ir diffusion into silicon is affected by the annealing atmosphere. Annealing in oxygen atmosphere delays the diffusion of Ir, whereas if annealed in N₂, Ir diffuses over some ten microns at 800°C, which points out that Ir belongs to the moderately fast diffusing elements at this temperature. Ir presents a critical cross-contamination aspect during anneal in O₂ or N₂ atmosphere.

The annealing atmosphere affects the Pt properties only in the region near the surface but not the Pt deep diffusion into the silicon. The concern with Pt is its very fast diffusion property. After annealing at 800°C, Pt is found to have diffused through the whole wafer, from one side to the opposite side of the wafer. This matter of concern renders the integration of Pt even more complicated since a contamination on the back-side, which can easily occur through the chuck in plasma processing for example, can affect critically the performance of the devices at the front side.

The study of Pt properties showed the difficulty in detecting Pt using methods like TXRF or VPD-TXRF. These methods, which are very successfully used to monitor contamination, are, however, poorly suited for Pt. Pt in sub-monolayer range, if annealed in oxygen atmosphere cannot be easily detected on the wafer surface with oxides thicker than 7 nm, or can be barely detected after oxide etching, although the minority carrier lifetime is seriously affected.

Investigations on structural defects using TEM and local elemental analysis EDX methods do not show any clear Ir or Pt precipitation in the form of silicide. It appears that under the tested conditions, Ir and Pt remain rather dissolved in the silicon matrix than precipitated. Therefore, the gate oxide thinning as cause of gate oxide integrity degradation in real memory devices is

rather unlikely because Ir and Pt precipitation, in contrast to the Cu, Ni, and Fe, is difficult in crystal free from defects such as dislocations, stacking faults, and oxygen precipitates.

While Pt is effectively gettered in the poly-silicon, Ba and Sr show a very slow diffusion within the poly-silicon material and, therefore, cannot reach the already grown gate oxide. Ir, however, cannot be effectively gettered in the poly-Si, and can reach the active regions, which is a cause of concern.

B) Résumé of the Impact of the Contaminants

It was clearly demonstrated that Ba, Sr, and Bi do not degrade minority carrier lifetime, so that BST or SBT dielectrics can be integrated in CMOS technologies without major minority carrier lifetime concerns. Ir or Pt, on the other hand, have to be carefully handled to avoid serious degradation of minority carrier lifetime even in concentration range below 10^{11} at/cm².

The effects of the contamination on the device properties were clearly demonstrated by giving representative results of leakage current and gate oxide integrity in a 0.5 μm process technology. Ba, Sr, Bi, or Pt have no pronounced effect because of the fabrication sequences. The phosphorus doped poly-silicon plug prevents Ba and Sr from diffusing to the electrically active regions, or can totally getter the “poisoning” Pt atoms. However, if Pt escapes from the gettering layers, it can critically affect the reliability and product yield, even at low annealing temperatures of 430°C.

The most obvious risk of Ir contamination occurs when no diffusion barrier is used to stop the diffusion of Ir to the active region, which results in increase of leakage current. However, gate oxide breakdown characteristics of 7.5 nm oxides are not affected by Ir contamination as high as 10^{12} at/cm². Meanwhile, it cannot be concluded that this is a general property of Ir, because the effect of higher concentrations has not been examined (no available contamination source with concentration higher than 1000 ppm). Several metals, which can degrade gate oxide, have a pronounced effect only if their concentration is relatively high.

During this work, our expectation that the contamination issues will not be a blocking point to the development of the ferroelectric memories, is confirmed. Evidence to support this expectation is demonstrated from concrete results on an integrated FeRAM module with SBT as ferroelectric layer.

Auger electron spectroscopy measurement of the device, in its final configuration (including a diffusion barrier of TaN/Ti), indicates the absence of the above elements in the active region of the transistor as shown in Fig. 5.1.

Reliability measurements investigated by constant voltage stress at wafer level showed no deterioration of the gate oxide integrity after the processing of the capacitor module. Time dependent dielectric breakdown measurements on wafers with integrated capacitor module reveal no difference to the reference wafers from the front-end of line, containing no capacitor module.

It appears relatively certain from this work, that the risk of device processing with ferroelectric and high-k capacitor dielectrics in future memories is manageable. The dielectric films are even of no concern and the most feared contaminants Ir and Pt can be mastered under the following precautions:

- Use of an effective diffusion barrier to block the diffusion of Ir to the active regions. This was the key solution for the successful implementation of Cu in advanced interconnects, despite the fact that Cu has a higher contamination risk than Ir because of its extremely high diffusivity, even at low temperatures.

- Need of a cap layer on the back-side of the wafer to prevent Pt diffusion to the front-side.
- Good cleaning strategy to avoid cross-contamination.

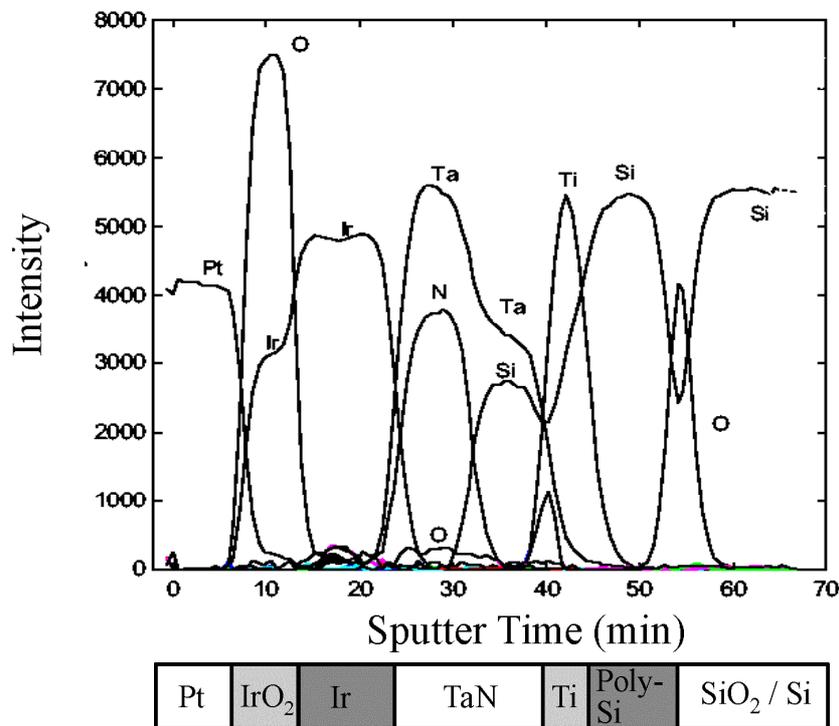


Fig. 5.1: Auger profile of a stacked cell ferroelectric memory showing the effectiveness of a diffusion barrier.

5.3.2. Entwicklung eines Modelles zur Diffusion von Aluminium in Silicium (Oliver Krause)

Leistungshalbleiterbauelemente aus Silicium sind heute für die Umwandlung und Bereitstellung von elektrischer Energie von großer Bedeutung. In zunehmenden Maße werden Entwürfe und Optimierungen von Leistungshalbleiterbauelementen sowie der dazugehörigen Herstellungsprozesse mit Hilfe der Verwendung von Simulationsprogrammen durchgeführt. Des Weiteren kommen neue Technologiekonzepte mit erhöhten Anforderungen an die Genauigkeit der verwendeten Herstellungsprozesse zur Anwendung.

Aluminium wird aufgrund seines großen Diffusionskoeffizienten als Dotierelement zur Herstellung tiefer pn-Übergänge benutzt. Die Verwendung von Aluminium als Dotierelement in Silicium, der Prozess der Vorbelegung sowie die Diffusion, waren Themen einer Reihe von Veröffentlichungen in den Jahren 1956 bis etwa 1971. Die Vorbelegung erfolgte durch die sogenannte Ampullendiffusion, die Charakterisierung hauptsächlich durch Schrägschliff und Anätzen. Die aus dieser Zeit ermittelten Diffusionsparameter bergen einige Ungenauigkeiten, da auf Einflüsse der Vorbelegung meist nicht eingegangen wurde und die Charakterisierungsmethoden weniger genau als die heute zur Verfügung stehenden waren. Mit dem Aufkommen der Ionenimplantation zum Einbringen von Dotieratomen in Silicium wurde in einer weiteren Reihe von Veröffentlichungen speziell auf die Problematiken der Defekt- und Präzipitatbildung eingegangen. Vergleicht man jedoch die Kenntnisse von Aluminium mit den in der Mikroelektronik gebräuchlichen Dotierelementen wie Bor, Phosphor oder Arsen, bestehen erhebliche Lücken über das Diffusionsverhalten von Aluminium in Silicium: Es existierten keine Diffusionsparameter von Aluminium in Silicium neueren Datums in einem weiten

Temperaturbereich, die in zeitgemäßem Halbleitermaterial durch defektfreie Vorbelegungen hergestellt und mit modernen Methoden der Halbleiteranalytik charakterisiert wurden. Die Art des Diffusionsmechanismus von Aluminium in Silicium wurde nur abgeschätzt, umfassende Experimente fehlten jedoch hierzu. Die Diffusion in extrinsischem Silicium und die Wechselwirkungen mit anderen Dotierelementen wurde nur unzureichend beschrieben. Zudem wurde in vielen früheren Veröffentlichungen der Einfluss der Vorbelegung auf die Diffusion vernachlässigt.

Die Verwendung neuer Herstellungsmethoden und komplexerer Prozessabfolgen machen akuraterer Untersuchungen zur Diffusion von Aluminium in Silicium nötig. Das Ziel dieser Arbeit war die vollständige Beschreibung der Diffusion von Aluminium in Silicium während halbleitertechnologisch relevanter Prozesse und die Bereitstellung eines kompletten Parametersatzes, um die Fertigung von modernen Leistungshalbleiterbauelementen durch die Prozesssimulation zu unterstützen.

Aluminium wurde in niedrigen Dosen in Silicium implantiert. Mit den hier gewählten Implantations- und Ausheilbedingungen konnten die nachfolgenden Diffusionsschritte unbeeinflusst von Einflüssen durch Aluminiumpräzipitation betrachtet werden. Der intrinsische Diffusionskoeffizient von Aluminium in Silicium wurde in einem Temperaturbereich von 850 bis 1290°C bestimmt. Der hier ermittelte Wert zeigt eine sehr gute Übereinstimmung mit den Literaturwerten im Temperaturbereich über 1000°C. Für den Temperaturbereich unter 1000°C lagen bis vor kurzem nur die Werte von Kao vor. Diese müssen nach dieser Untersuchung als deutlich zu hoch betrachtet werden. Im gesamten Temperaturbereich stehen die hier ermittelten Diffusionskoeffizienten in guter Übereinstimmung zu neueren Arbeiten, in denen prozessspezifische Besonderheiten der Vorbelegung und Diffusionen berücksichtigt wurden. Der Diffusionskoeffizient von Aluminium in Silicium kann durch ein Arrhenius-Gesetz mit dem Vorfaktor D_0 gleich $4,73 \text{ cm}^2/\text{s}$ und der Aktivierungsenergie E_A gleich $3,35 \text{ eV}$ beschrieben werden. Die Siliciumoberfläche wurde als Senke für Aluminiumatome modelliert. Abb. 5.2 zeigt die ermittelten Werte im Vergleich zu den Werten aus der Literatur.

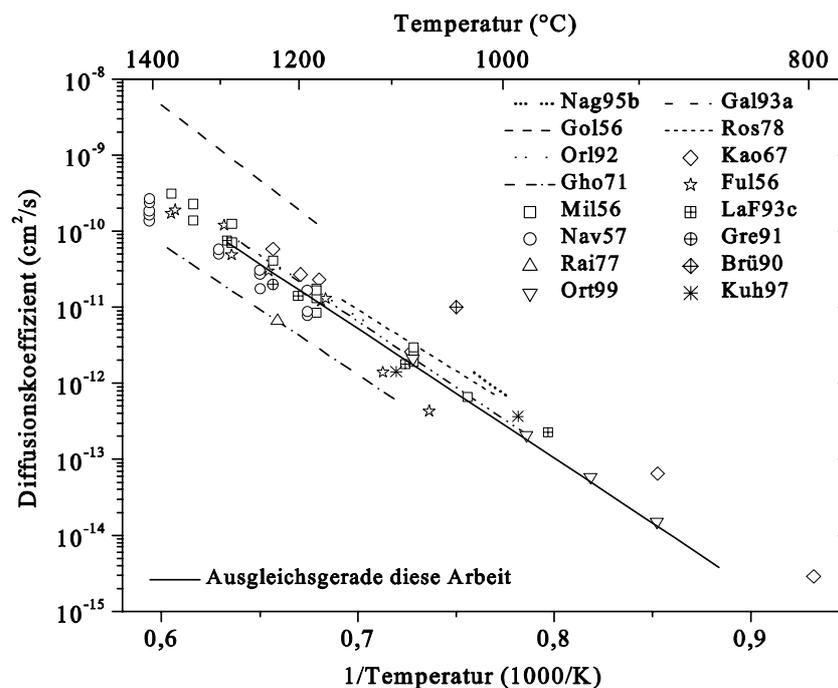


Abb. 5.2: Diffusionskoeffizient von Aluminium in Silicium. Vergleich der ermittelten Werte mit Literaturwerten.

Erstmals wurde der Diffusionsmechanismus von Aluminium umfassend untersucht. Durch Diffusionsexperimente in inerter, oxidierender und nitridierender Atmosphäre und Vergleich der Diffusionsbeschleunigungen von Aluminium mit Antimon und Phosphor wurde der Diffusionsmechanismus von Aluminium ermittelt. Es wurde festgestellt, dass Aluminium nahezu vollständig als Aluminium-Silicium-Eigenzwischengitteratom-Paar diffundiert. Für Temperaturen unter 1100°C ist die Diffusionsbeschleunigung von Aluminium während der Oxidation sogar stärker als die von Phosphor, welches im allgemeinen als das Dotierelement mit der stärksten Oxidationsbeschleunigung betrachtet wird. Abb. 5.3 zeigt Aluminium-, Antimon- bzw. Phosphor-SIMS-Profile, die durch einen Diffusionsschritt in Ammoniak, Sauerstoff oder Stickstoff hergestellt wurden und die Simulationen der Diffusionen in den verschiedenen Prozessatmosphären.

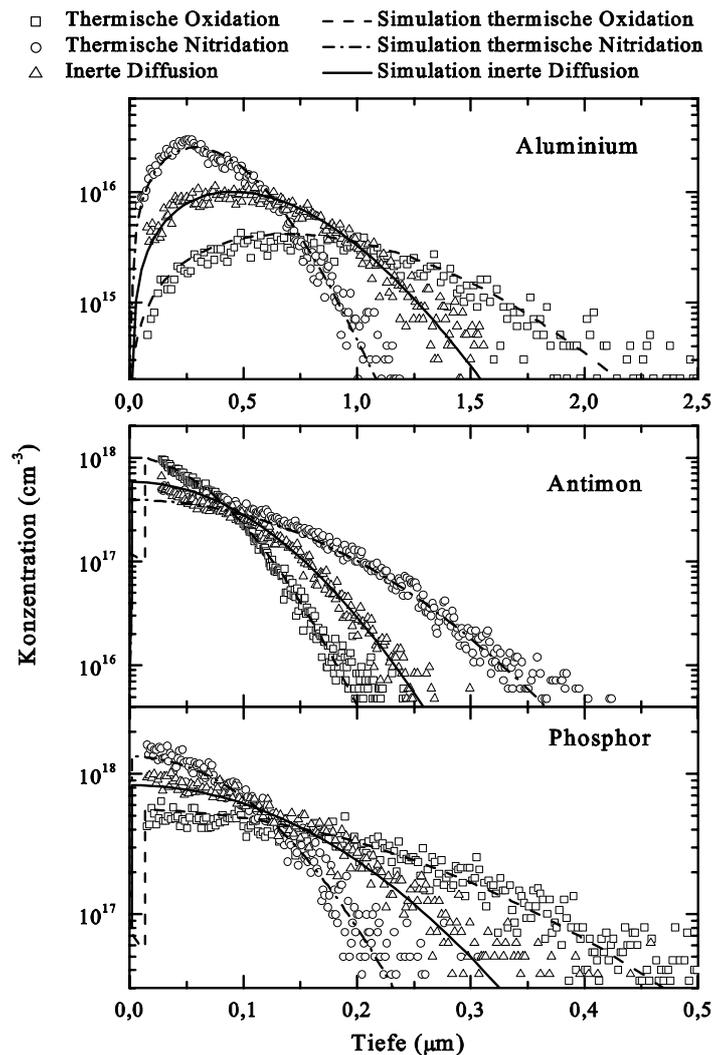


Abb. 5.3: Dotieratomprofile und Simulationen der Experimente zur Bestimmung des Diffusionsmechanismus von Aluminium bei 1160°C.

Erstmals wurde das Diffusionsverhalten von Aluminium unter extrinsischen Diffusionsbedingungen untersucht. Da die Löslichkeit von Aluminium in Silicium bei den zu untersuchenden Diffusionstemperaturen geringer als die intrinsische Ladungsträgeranzahl ist, wurde extrinsisch bor- bzw. phosphordotiertes Siliciumsubstrat hergestellt. 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 Abb. 5.4 sind SIMS-Profile von Aluminium nach einem

Diffusionsschritt bei 900°C unter intrinsischen bzw. extrinsischen Diffusionsbedingungen dargestellt.

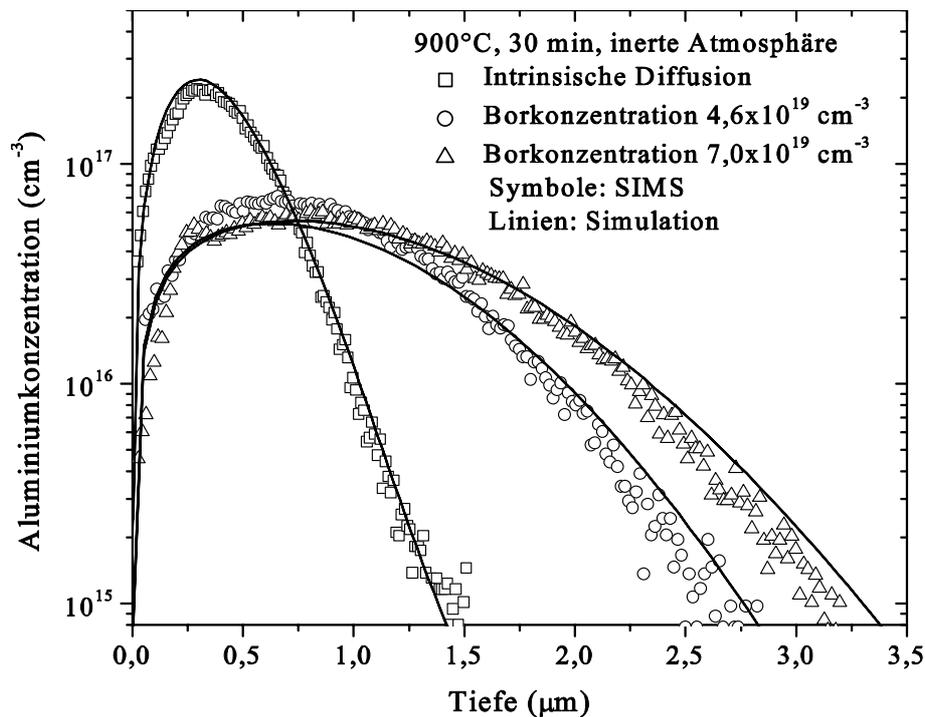


Abb. 5.4: Diffusion von Aluminium in intrinsischem bzw. extrinsisch bordotiertem Silicium unter identischen Prozesbedingungen. SIMS-Profile und Simulationsergebnisse.

Die lineare Abhängigkeit der Diffusionsbeschleunigung von der Ladungsträgererhöhung deutet auf einen Diffusionsmechanismus zum überwiegenden Teil als einfach geladenes Aluminium-Silicium-Eigenzwischengitteratom-Paar hin. Aufgrund nicht zu beseitigender experimenteller Probleme konnte diese Fragestellung jedoch nicht hinreichend geklärt werden. Es konnte einzig sichergestellt werden, dass ein Anteil der Diffusion über zweifach geladene Dotieratom-Silicium-Eigenzwischengitteratom-Paare stattfindet. 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. Im Vergleich zum intrinsischen Fall ist Diffusion von Aluminium um bis zu zwei Größenordnungen verlangsamt. In Abb. 5.5 sind experimentelle bzw. simulierte Diffusionsprofile von Aluminium in intrinsischem bzw. extrinsisch phosphordotiertem Silicium dargestellt.

Mit den ermittelten Diffusionsparametern wurden verschiedene Diffusionsprozesse mit in der Literatur veröffentlichten Aluminiumprofilen nachsimuliert. Hierbei zeigt es sich, dass zwar die Parameter dieser Arbeit mit den jeweilig veröffentlichten Diffusionsparametern gut übereinstimmen, die Aluminiumprofile aber nur unbefriedigend angepasst werden konnten. Es sind umfangreichere Kenntnisse der experimentellen Bedingungen nötig, als sie üblicherweise in Veröffentlichungen dargelegt werden.

In dieser Arbeit wurden Fragestellungen neueren Datums zur Diffusion von Aluminium in Silicium geklärt. Fragestellungen zu den Themen Interaktion Aluminium-Sauerstoff und Segregation / Diffusion in Siliciumdioxid wurden aus Gründen des Umfangs dieser Arbeit nicht

betrachtet. Hier sind zum Erreichen des ursprünglich gesetzten Zieles, der Prozesssimulation einen kompletten Parametersatz zur Diffusion von Aluminium in Silicium während halbleitertechnisch relevanter Prozessschritte zur Verfügung zu stellen, weitere Untersuchungen nötig.

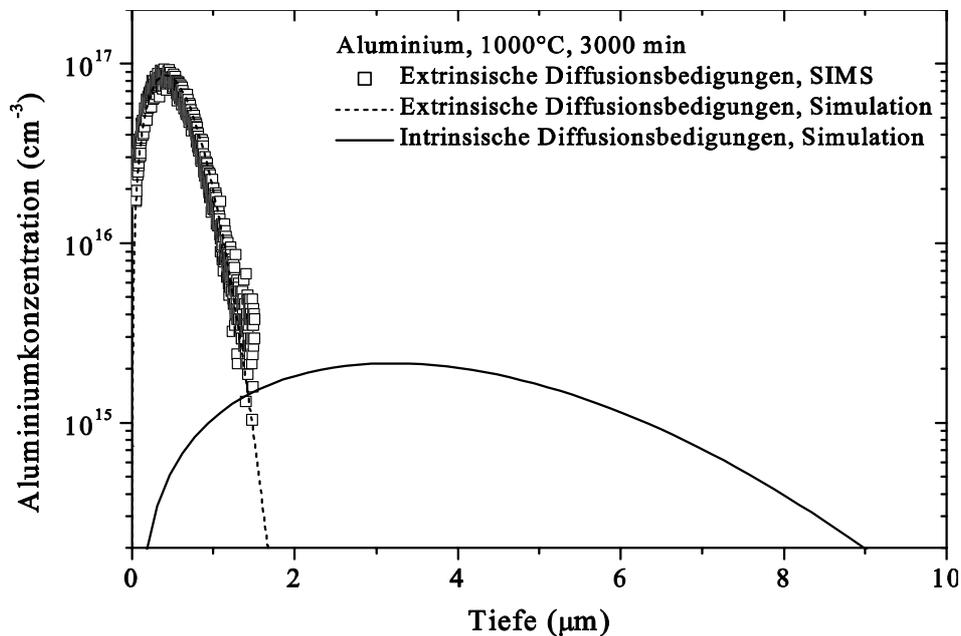


Abb. 5.5: Diffusion von Aluminium in intrinsischem und extrinsisch phosphordotiertem Silicium unter identischen Prozessbedingungen bei 1000°C. Dargestellt sind SIMS-Profil und Simulationsresultate.

5.3.3. Entwurf und Herstellung von integrierten ionensensitiven Feldeffekttransistoren in CMOS-Technologie

(Ralf Kühnhold)

Die Entwicklung der Mikroelektronik hat in den letzten Jahrzehnten zu einer stetigen Steigerung der Leistung von elektronischen Systemen geführt. Die Weiterentwicklung umfasst auch das Erschließen neuer Anwendungsbereiche für mikroelektronische Systeme. Hierbei ist der Wunsch der Verbindung von elektronischen Systemen mit der Umwelt, die Datenerfassung durch Sensoren und die Einwirkung durch Aktoren bereits seit langem vorhanden.

Die Entwicklung von chemischen Sensorsystemen ist weitaus geringer fortgeschritten als die Integration von physikalischen Sensoren. Dies ist zum einen darauf zurückzuführen, dass chemische Mikrosensoren bisher nicht die Langzeitstabilität erreichen, die konventionelle Sensoren besitzen. Des weiteren ist das Erstellen der notwendigen Hilfsmittel zum Entwurf und zur Optimierung solcher chemischen Sensorsysteme aufgrund der Vielzahl von möglichen chemischen Reaktionen nur bedingt möglich. Ein weiterer wichtiger Aspekt ist, dass insbesondere bei chemischen Sensoren für die Flüssigkeitsanalyse die Verkapselung äußerst schwierig ist, da der Sensor zwar mit der Flüssigkeit in Kontakt, die Elektronik jedoch sicher vor Feuchtigkeit geschützt sein muss. Es sind daher sowohl neue Gehäuseformen notwendig, als auch die Entwicklung neuer Passivierungsschichten für die Schaltung. Trotz dieser Schwierigkeiten ist die Entwicklung chemischer (Mikro-) Sensorsysteme von Bedeutung, da sie gegenüber konventionellen Sensoren einige Vorteile bieten: Die gegenüber konventionellen Sensoren weitaus geringere Ansprechzeit erlaubt eine bessere Beobachtung und Kontrolle chemischer Prozesse, die benötigten Probenmengen sind aufgrund der geringen Dimensionen minimal und die kostengünstige Herstellung mit Verfahren der Halbleitertechnologie ermög-

licht die Fertigung von billigen Systemen. Diese Vorteile eröffnen chemischen Mikrosensorsystemen insbesondere in der Biomedizin und Biochemie interessante Anwendungsbereiche.

In der chemischen Analyse von Flüssigkeiten mit Mikrosensoren ist der ionensensitive Feldeffekttransistor (ISFET) das zentrale Bauelement, auf dem basierend eine Vielzahl verschiedener Sensoren hergestellt werden können. Das Funktionsprinzip ist dem des MOSFETs ("metal oxide semiconductor field effect transistor") sehr ähnlich, wobei die Metallelektrode durch eine sensitive Schicht ersetzt wird (Abb. 5.6). Heute sind ISFET-Sensoren zur Messung des pH-Werts in Flüssigkeiten kommerziell erhältlich, wobei ein großer Anwendungsbereich in der glaslosen pH-Wert-Bestimmung von Lebensmitteln liegt. Integrierte Sensorsysteme sind bisher nicht kommerziell verfügbar.

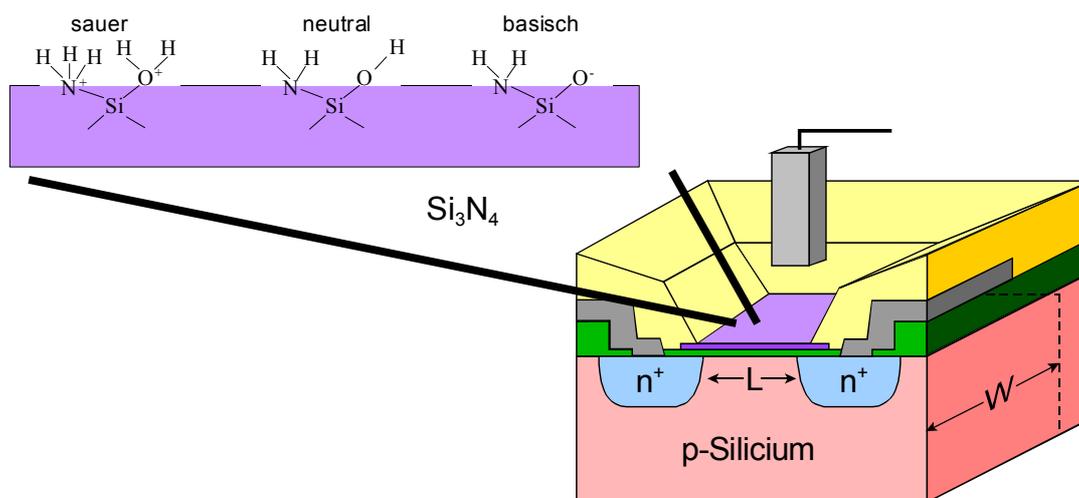


Abb. 5.6: Aufbau eines ionensensitiven Feldeffekttransistors (ISFET).

Ziel dieser Arbeit war die Integration von ionensensitiven Feldeffekttransistoren (ISFETs) in einen am Lehrstuhl für Elektronische Bauelemente vorhandenen industriekompatiblen CMOS-Prozess. Hierzu wurde zunächst ein Konzept entwickelt, das allgemein gültig die Integration chemischer Sensoren in einzelne Arbeitsschritte gliedert. Demnach ließ sich die Aufgabenstellung in folgende Abschnitte einteilen: die Untersuchung der Eigenschaften von Elektrolyt-Isolator-Silicium- (EIS-) Strukturen durch Simulation, die Entwicklung eines für den Schaltungsentwurf geeigneten Modells des ISFETs, die Integration des ISFETs in eine Messverstärkerschaltung, sowie die Entwicklung der für die Herstellung notwendigen zusätzlichen Prozessschritte im CMOS-Prozess.

Die Simulation der ionensensitiven Eigenschaften wurde mit dem Berechnungsprogramm MATHEMATICA durchgeführt. Hierbei wurde besonderer Wert auf die Berücksichtigung des Oberflächenpotenzials des Halbleiters bzw. die Ladung an der Halbleiteroberfläche gelegt, die in der Literatur im allgemeinen vernachlässigt wird. Die Berücksichtigung dieser Ladung zeigte, dass der Ladungszustand der Oberflächenbindungen an der Elektrolyt/Isolator-Grenzfläche deutlich von der Ladung an der Halbleiteroberfläche abhängt. Lediglich für niedrige Gatespannungen ist die Auswirkung auf das Oberflächenpotenzial Ω und die pH-Empfindlichkeit vernachlässigbar (Abb. 5.7). Ein Betrieb des ISFETs im Sättigungsbereich führt durch die Abschnürung des Kanals zu einer ungleichmäßigen Verteilung der Oberflächenladung Q_0 und einer reduzierten Empfindlichkeit, während der Betrieb im linearen Bereich eine homogene Ladungsverteilung an der Oberfläche und der diffusen Schicht gewährleistet. Neben einer niedrigen Gatespannung muss der ISFET daher bei einer niedrigen Drain-

Source-Spannung betrieben werden. Bei der Simulation der nichtidealen Eigenschaften des Sensors wurde erstmals ein Modell für die Oberflächenoxidation der sensitiven Schicht vorgestellt, die neben dem Einfluss von vergrabenen Bindungen für eine nichtlineare Empfindlichkeit des ISFETs verantwortlich ist. Beide Effekte sind in erster Linie von der Schichtqualität abhängig, werden jedoch auch durch den Wert der Isolatorkapazität beeinflusst. Während der Einfluss von vergrabenen Bindungen ansonsten nur durch ein geeignetes Messverfahren reduziert werden kann, wird die Oberflächenoxidation von den Spannungen am ISFET beeinflusst. Daraus ergab sich die Forderung nach geringen Spannungsänderungen sowohl der Gate-, als auch der Drain-Source-Spannung über den gesamten Betriebsbereich des ISFETs. Die durchgeführten Simulationen wurden durch Messungen an EIS-Strukturen verifiziert. Die Messungen bestätigten auch die Verbesserung der ionensensitiven Eigenschaften durch Reduzierung der Isolatorkapazität, wodurch sich ein wichtiger Aspekt für die Prozessentwicklung ergab.

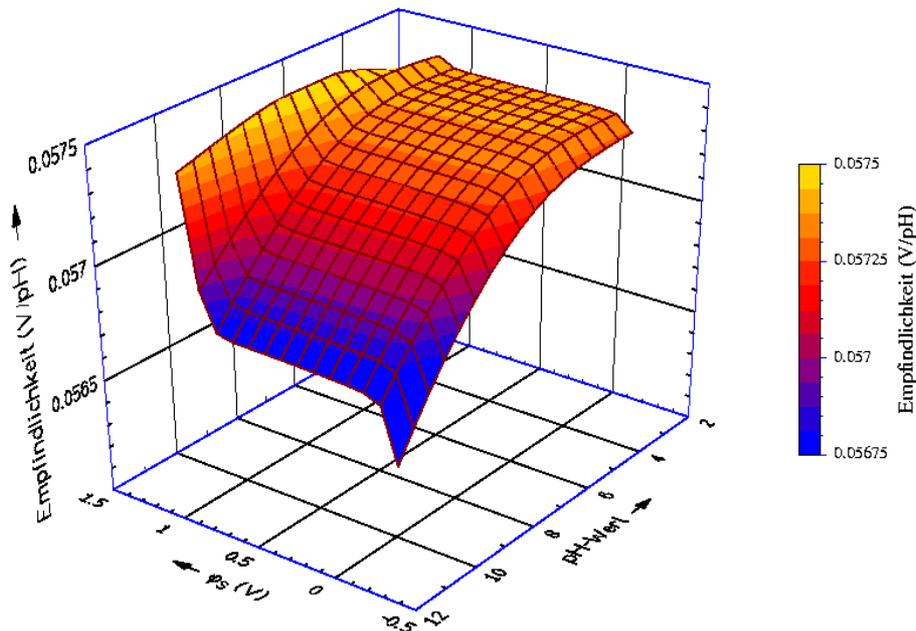


Abb. 5.7: pH-Empfindlichkeit der sensitiven Schicht in Abhängigkeit des Oberflächenpotenzials an der Halbleiteroberfläche und des pH-Wertes.

Auf Basis der aus der Simulation erhaltenen Ergebnisse wurde ein Modell des ISFETs für den Schaltkreissimulator SPICE entwickelt. Mit Hilfe dieses Modells wurde der ISFET in eine Messverstärkerschaltung integriert, die einen Betrieb des Sensors bei den geforderten Spannungen ermöglicht.

Zur Entwicklung des Herstellungsprozesses wurden zunächst Untersuchungen an verschiedenen Gatestrukturen durchgeführt. Durch elektrische Messungen konnte festgestellt werden, dass lediglich eine Struktur ohne Gate-Polysilicium für die Herstellung integrierter ISFETs geeignet ist. Die Hauptkriterien bei der Untersuchung waren zum einen die Reproduzierbarkeit der elektrischen Eigenschaften, zum anderen eine niedrige Einsatzspannung. Weitere Testprozesse wurden zur Optimierung der Schichtdicken von Siliciumnitrid und Siliciumoxid durchgeführt, die die sensitive Schicht des ISFETs bilden. Proben mit verschiedenen Schichtdickenkombinationen wurden durch Kapazitäts-Spannungs-Messungen, Strom-Spannungs-Messungen und Durchbruchmessungen charakterisiert. Unter Berücksichtigung der geforderten niedrigen Einsatzspannung, niedriger Leckströme und hoher elektrischer Zuverlässigkeit wurde eine Kombination von 12 nm Oxid und 40 nm Nitrid als Optimum für die Her-

stellung der integrierten ISFETs gefunden. Gemäß dem entwickelten Konzept einer modularen Prozessführung wurden die notwendigen Prozessschritte in den CMOS-Ablauf integriert. Weiterhin wurden Untersuchungen zu dem Einfluss der Formiergastemperatur durchgeführt, sowie eine Polyimid-Passivierung entwickelt, die einen dauerhaften Schutz der Schaltungskomponenten des integrierten Sensors vor dem Elektrolyten gewährleistet.

Der komplette Herstellungsprozess wurde am Lehrstuhl für Elektronische Bauelemente durchgeführt. Abb. 5.8 zeigt die Photographie zweier ISFETs. Gegenüber dem CMOS-Basisprozess sind für Integration der ISFETs zwei zusätzliche Masken notwendig, sowie eine weitere Maske für die Passivierung mit Polyimid. Der Herstellungsprozess wurde charakterisiert und mit den vorgegebenen Spezifikationen bzw. mit Ergebnissen des Standard-CMOS-Prozesses verglichen. Bei keiner der gemessenen Größen konnte ein Einfluss der zusätzlichen Prozessschritte auf die elektrischen Eigenschaften gefunden werden. Weiterhin wurden die Eigenschaften der MOS-Transistoren untersucht. Durch Messungen an Teststrukturen und Simulation der Kennlinien mit SPICE wurden die Parameter der Transistoren extrahiert. Ein Vergleich der ermittelten Parameter mit den Eigenschaften der Transistoren aus dem Standard-CMOS-Prozess zeigte eine hervorragende Übereinstimmung. Somit konnte gezeigt werden, dass die für die ISFET-Herstellung notwendigen Prozessschritte keinen Einfluss auf die CMOS-Komponenten besitzen und die Integration gelungen ist.

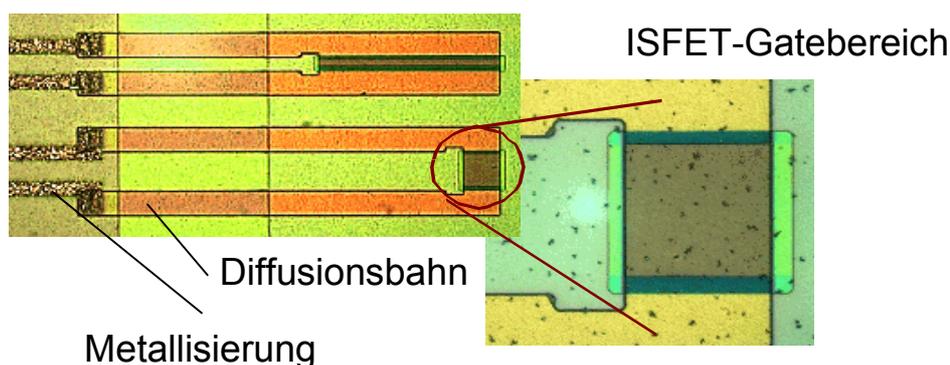


Abb. 5.8: Photographie zweier ISFETs ($W/L = 200 / 8$ bzw. $W/L = 40 / 40$).

Die ISFETs wurden durch elektrische und elektrochemische Messverfahren charakterisiert. Für die elektrische Charakterisierung wurden verschiedene ISFET-Strukturen mit Metall-Gateelektrode verwendet (Abb. 5.9). Die Einsatzspannung der ISFETs wurde daraus zu $0,6 \pm 0,12$ V bestimmt, was gegenüber der Einsatzspannung der MOS-Transistoren eine Reduzierung um ca. 0,3 V und damit einen für die Integration hervorragenden Wert bedeutet.

Die elektrochemische Charakterisierung der ISFETs wurde mit 0,5 M Elektrolytlösung und einer Ag/AgCl-Referenzelektrode durchgeführt. Für die pH-Empfindlichkeit ergab sich bei pH 7 ein Wert von 57 mV/pH, bei niedrigen pH-Werten wurde entsprechend der Simulationsergebnisse ein höherer Wert von bis zu 59 mV/pH ermittelt, bei hohen pH-Werten ein Wert von 53 mV/pH. Der daraus resultierende Messfehler wurde zu 0,05 pH ermittelt. Die Grundliniendrift des Sensors betrug 0,1 mV/h nach der Stabilisierungsphase. Somit zeigte der integrierte Sensor gute ionensensitive Eigenschaften, eine Beeinträchtigung durch die CMOS-Prozessschritte wurde nicht festgestellt.

Aufgrund der modularen Prozessentwicklung ist die Herstellung integrierter ISFETs nach dem vorgelegten Konzept ohne großen Entwicklungsaufwand auf andere CMOS-Prozesse

übertragbar. Basierend auf den Ergebnissen dieser Arbeit kann die Technologie zur Entwicklung eines vollständig integrierten Sensorsystems verwendet werden. Hierzu sind im wesentlichen Problemstellungen des Schaltungsentwurfes zu lösen, wie die Wandlung in digitale Signale, die Subtraktion der Signale verschiedener Messverstärker und Möglichkeiten zur Messwertspeicherung für eine Kalibrierung des Systems.

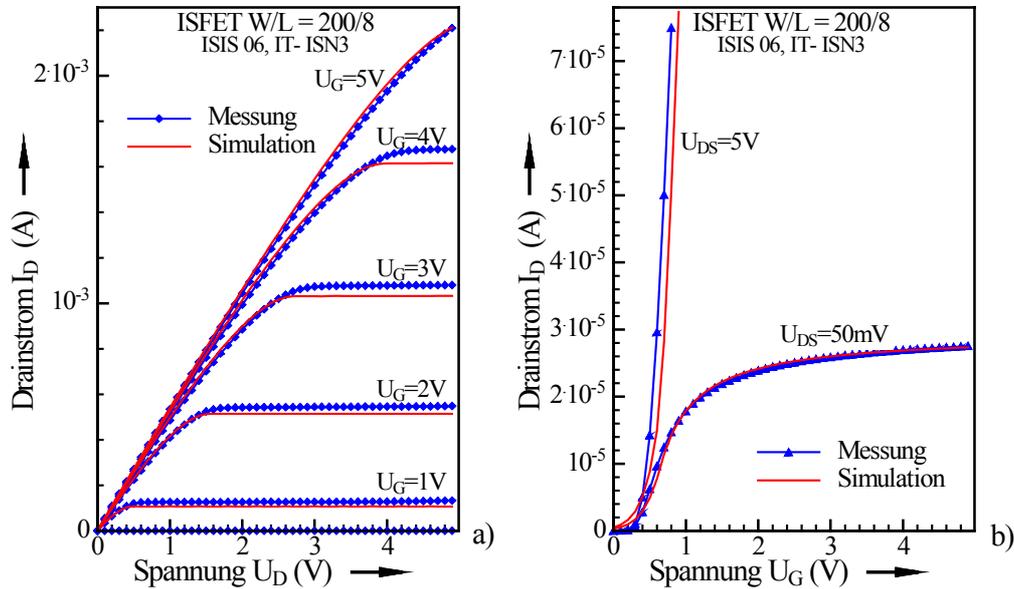


Abb. 5.9: Ausgangs- und Übertragungskennlinie eines ISFETs mit Metallkontakt im Vergleich mit der Simulation.

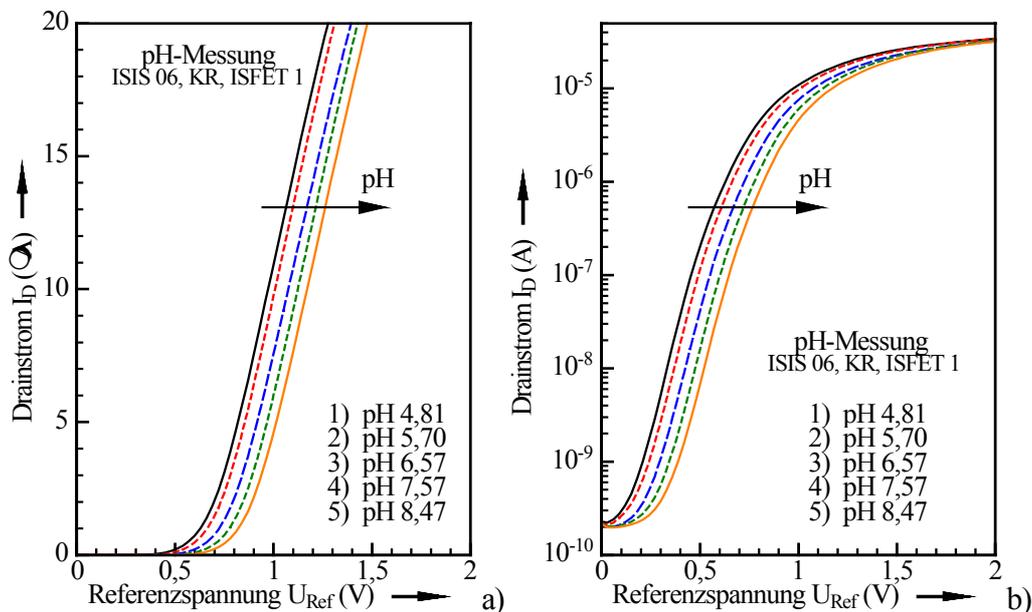


Abb. 5.10: Übertragungskennlinien eines ISFETs für verschiedene pH-Werte in linearer (a) bzw. logarithmischer (b) Darstellung.

5.3.4. Algorithmen für die dreiecksbasierte dreidimensionale Simulation bewegter Oberflächen in der Halbleitertechnologie

(Oliver Lenhart)

Für die dreiecksbasierte dreidimensionale Prozesssimulation in der Mikroelektronik werden für jeden Prozessschritt geeignete Algorithmen zur Beschreibung der auftretenden Phänomene benötigt. Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Simulation bewegter Oberflächen, wie sie z. B. bei der Simulation des Ätzens auftreten. Es wurden dazu zwei Algorithmen zur Simulation von dreidimensionalen Topographieprozessen entwickelt. Beide Algorithmen basieren auf triangulierten Oberflächengittern.

Der erste Algorithmus erkennt und entfernt sogenannte globale Schleifen. Dabei handelt es sich um inkonsistente Strukturen, die dadurch entstehen, dass sich zwei oder mehrere nicht direkt benachbarte Dreiecke schneiden. Solche globale Schleifen können überall dort auftreten, wo sich Fronten von triangulierten Oberflächen aufeinander zubewegen wie z. B. bei der dreiecksbasierten Simulation der Schichtabscheidung. Es wurde ein Verfahren entwickelt, welches das Entfernen globaler Schleifen auch bei Mehrschichtstrukturen gestattet und dabei – falls nötig – getrennte Materialregionen miteinander verbindet. Der Algorithmus konnte bei Ein- und Mehrschichtstrukturen erfolgreich auch im Rahmen eines industriellen Benchmarks eingesetzt werden.

Die Vorgehensweise des Algorithmus ist wie folgt: Zuerst wird die Struktur mit globaler Schleife eingelesen und anschließend die Schnittlinie(n) zwischen den sich schneidenden Fronten berechnet. Um auch nach dem Entfernen der in der Schleife befindlichen Dreiecke eine topologisch korrekte Struktur zu erzielen, wird sie entlang der Schnittlinie(n) retrianguliert, wobei die Schnittpunkte der Schnittlinie mit den Dreieckskanten als neue Punkte in die Triangulierung eingefügt werden müssen. Durch ein Kriterium, welches die Normalen benachbarter Dreiecke vergleicht, werden dann die Dreiecke, die in der globalen Schleife liegen, aussortiert und anschließend entfernt.

Abb. 5.11 zeigt eine Einschichtstruktur sowohl mit als auch ohne globale Schleife, bestehend aus 3936 Dreiecken. Praktische Anwendung findet das Verfahren zum Entfernen globaler Schleifen z. B. bei der Simulation der Poly-Buffered-Locos (PBL) Oxidation. Dort wachsen zwei vormals getrennte Oxidregionen zu einer gemeinsamen zusammen. Eine schematische Darstellung dieses Sachverhaltes ist in Abb. 5.12 zu sehen.

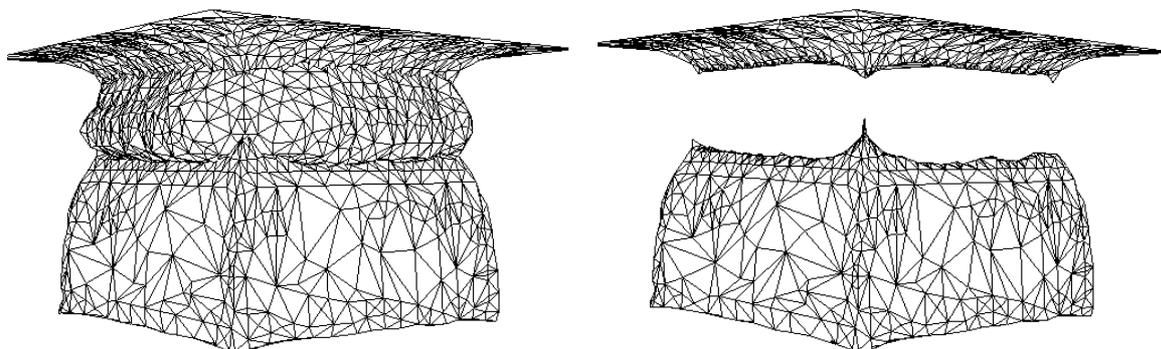


Abb. 5.11: Einschichtstruktur mit (links) und ohne (rechts) globale Schleife.

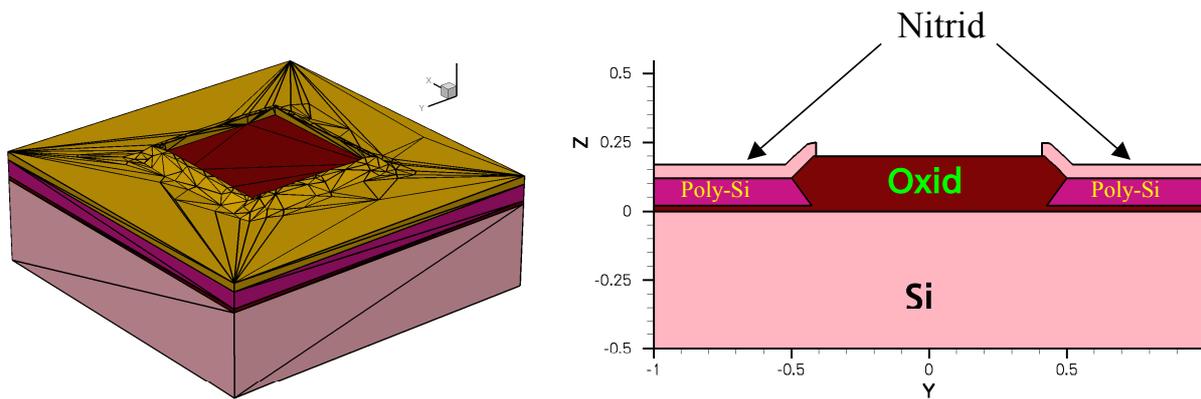


Abb. 5.12: PBL-Oxidation (schematisch). 5 Regionen vor dem Entfernen der Schleife (2 unterschiedliche Oxidregionen), 4 Regionen danach.

Um Ätzen dreidimensional dreiecksbasiert zu simulieren, wurde der zweite Algorithmus dieser Arbeit entwickelt. Der Algorithmus ermöglicht sowohl isotrope als auch anisotrope Ätzvorgänge. Dazu wurde ein Modul entwickelt, welches Dreifachpunkte und -linien erkennt. Das sind Punkte bzw. Linien, an denen drei oder mehrere Schichten zusammentreffen, wie z. B. an Maskenkanten. Eine zuverlässige Erkennung dieser Dreifachelemente ist unabdingbare Voraussetzung für die Simulation von Unterätzen. Die zu bewegendenden Dreiecke werden dann punktweise gemäß zuvor berechneter Ätzraten und Ätzvektoren verschoben. Mehrere Strukturen konnten mit dem Modul erfolgreich geätzt werden, darunter unter anderem der Graben einer STI-Struktur sowie eine Phasenschiebemaske für isolierte und dichte Linien.

Der Algorithmus arbeitet nach folgendem Schema: Isotrope und anisotrope Ätzraten pro Material sowie die Ätzzeit werden vom Benutzer vorgegeben. Der Algorithmus berechnet abhängig von Verschiebestrecke, welche sich als Produkt aus Ätzrate und Ätzzeit ergibt, und Gitterparametern die benötigte Anzahl an Verschiebeschritten, die zur Simulation der gewünschten Ätzzeit notwendig ist. Dies führt zu verbesserter Fehlererkennung und -behandlung, da man auf diese Art und Weise durch Gitterverfeinerung oder -vergrößerung mittels externer Programme die Entstehung lokaler Schleifen in vielen Fällen verhindern kann. Außerdem können realistische Verrundungen im Ätzprofil, wie sie beim Unterätzen unter Maskenkanten auftreten, nur durch die Wahl hinreichend kleiner Ätzschritte erzielt werden.

Maskenkanten werden automatisch erkannt und es wird parallel zu den Maskenkanten ein schmaler Streifen retrianguliert. Dies ist nötig, um Unterätzen zu simulieren. Im nächsten Schritt berechnet der Algorithmus aus den isotropen und anisotropen Ätzraten die resultierenden Ätzraten pro Dreieck. Im letzten Schritt werden die zu ätzenden Dreiecke verschoben.

Abb. 5.13 zeigt das rein isotrope Ätzen einer Oxidnitridstruktur. In Abb. 5.14 ist eine schwach isotrope Ätzung eines Shallow Trench Isolated (STI) Grabens zusammen mit seinem Querschnitt zu sehen.

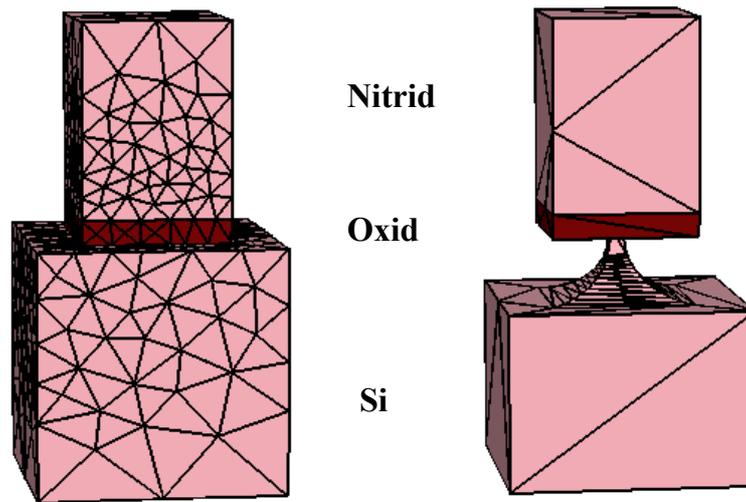


Abb. 5.13: Isotropes Ätzen eines Si-Substrates, welches von einer Oxidnitridmaske überdeckt ist. Nach einigen Ätzschritten wurde das Gitter mit einem externen Programm modifiziert.

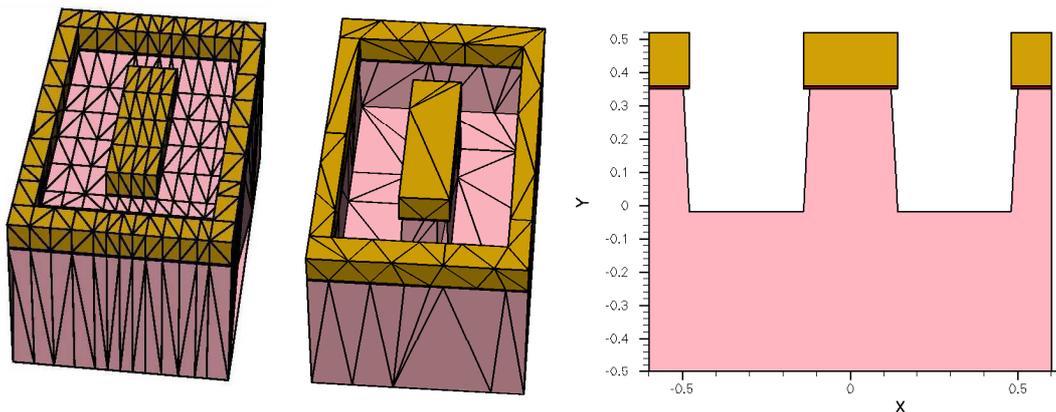


Abb. 5.14: Schwach isotropes Ätzen eines STI-Grabens. Ausgangsstruktur (links), geätzte Struktur (Mitte), 2D-Querschnitt (rechts). Im Querschnitt erkennt man die Seitenwandneigung sowie das schwache Unterätzen.

5.3.5. Rückseitenkontaktierte Kohlenstoff-Interdigitalelektroden für bioelektronische Anwendungen

(Ralf Schnupp)

Den Ausgangspunkt für die Durchführung dieser Arbeit bildete die Problematik bioelektronischer Bauelemente wie beispielsweise Bio- und Chemosensoren, stets eine Kontaktfläche zwischen Flüssigkeiten und Festkörpermaterialien zu besitzen. Dies führt zu einer allmählichen Korrosion der Oberflächen und schließlich zum Funktionsausfall der Systeme. Ein Ziel dieser Untersuchung bildete das Auffinden eines geeigneten Verfahrens zur Rückseitenkontaktierung siliciumtechnologisch hergestellter Bauelemente, um den elektronischen Teil von der chemischen Umgebung zu separieren. Dadurch sind auf der Vorderseite der Sensoren idealerweise nur noch chemisch resistente und von einer Passivierungsschicht umgebene Elektroden vorhanden, die für den benötigten elektrischen Kontakt zu der Flüssigkeit oder dem

Gas sorgen. Die elektronischen Komponenten befinden sich auf der Scheibenrückseite oder einem separaten Bauelement und werden über Durchkontakte mit dem Sensorelement elektrisch verbunden. Der zweite Hauptteil der Arbeit bestand in der Entwicklung eines chemisch langzeitstabilen Dünnschichtwerkstoffs, der als Kontaktelektrode zu den flüssigen und gasförmigen Phasen einzusetzen ist. Mittels diesen beiden optimierten Technologien wurde anschließend ein Herstellungsprozess für rückseitenkontaktierte Interdigitalelektroden (IDAs, von *interdigitated arrays*) entworfen, durchgeführt und die Charakterisierung der Bauelemente vorgenommen.

Die Auswahl dieses Sensortyps resultierte aus einem Vergleich der Eigenschaften bekannter Bio- und Chemosensoren. Interdigitalelektroden bestehen im Wesentlichen aus zwei fingerförmig ineinandergreifenden Elektroden, die auf einem isolierenden Substrat angeordnet sind. Die Empfindlichkeit gegenüber bestimmten Substanzen wird durch Aufbringen einer sensitiven Schicht erzielt. Interdigitalelektroden weisen geringe Nachweisgrenzen und hohe Empfindlichkeiten auf und sind universell für eine Vielzahl von Anwendungen verwendbar. Um die Geometrie der Bauelemente zu optimieren, wurde die Verteilung des elektrischen Feldes über den IDAs für verschiedene Fingerabstände und Dicken der sensitiven Schicht simuliert und verglichen (siehe Abb. 5.15). Der Geometriefaktor G wurde eingeführt, der das Verhältnis zwischen Elektrodenabstand und der Dicke der sensitiven Schicht angibt. Die Simulationen zeigten, dass optimale Sensoreigenschaften bei Fingerabständen unter $3\ \mu\text{m}$ und einem Geometriefaktor um $G = 0,8$ erzielt werden.

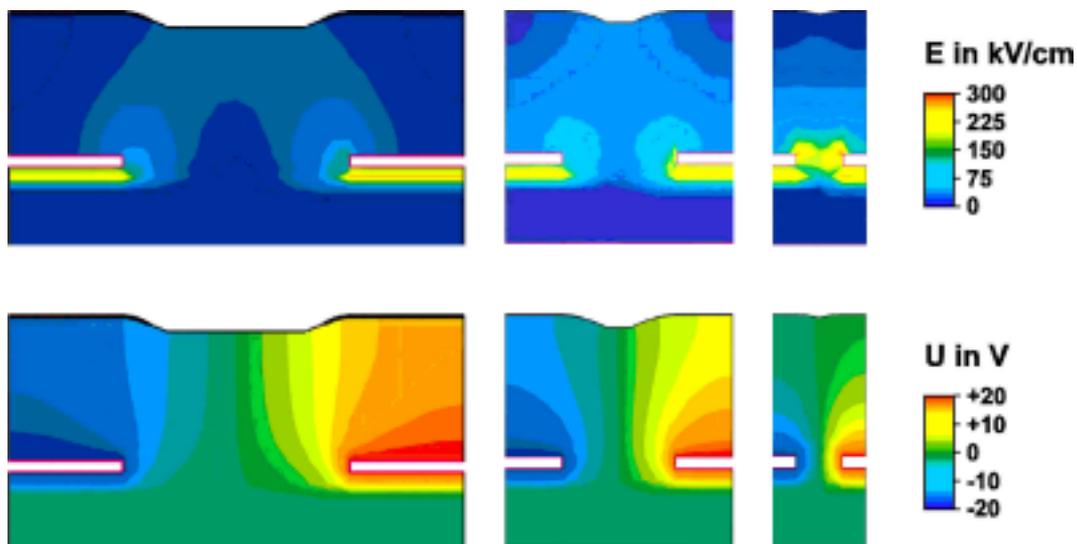


Abb. 5.15: Simulierte Feld- (oben) und Potenzialverteilung (unten) über einem Interdigitalelektroden-Fingerpaar mit $10\ \mu\text{m}$ (links, $G=2$), $5\ \mu\text{m}$ (Mitte, $G=1$) und $2\ \mu\text{m}$ (rechts, $G=0,4$) Elektrodenabstand.

Um ein generelles Verständnis der Vorgänge an Festkörperoberflächen zu erhalten und daraus optimale Eigenschaften für das zu entwickelnde Elektrodenmaterial abzuleiten, wurde die Theorie der Phasengrenze Festkörper – Flüssigkeit betrachtet und ein elektrisches Ersatzschaltbild beschrieben. Das Verhalten der sich bildenden elektrischen Doppelschicht und verschiedene Polarisierungseffekte beeinflussen die Mechanismen des Ladungstransfers und der Potentialbildung an der Phasengrenze. Die Wahl des Elektrodenmaterials wirkt sich auf die elektrochemischen Eigenschaften des Elektrodenwerkstoffs aus. Eine geringe Doppelschicht-

kapazität, eine hohe elektrochemische Bandbreite, ein reversibler Elektronentransfer, geringe Restströme für hohe Signal-Rausch-Verhältnisse und eine hohe elektrische Leitfähigkeit sind für den Einsatz der Elektroden in bioelektronischen Bauelementen optimal.

Aus der elektrochemischen Analyse ist Glas-Kohlenstoff aufgrund seiner Qualitäten als Standard-Elektrodenmaterial bekannt, der aber nicht mit dünnschichttechnologischen Verfahren bei niedrigen Temperaturen zu fertigen ist. Die Nebeneinanderstellung der physikalischen und chemischen Eigenschaften aller Kohlenstoffmodifikationen zeigte, dass diamantähnliche Kohlenstoffschichten (DLC, von *diamond-like-carbon*) vergleichbare elektrochemische Qualitäten besitzen und weitere Vorzüge wie beispielsweise eine hohe chemische und mechanische Beständigkeit aufweisen. Einen Hauptteil dieser Arbeit bildete folglich die Abscheidung diamantähnlicher Kohlenstofffilme mittels der HF-Magnetron-Kathodenzerstäubung und die Charakterisierung der physikalischen und chemischen Eigenschaften dieser Dünnschichten.

Vor allem die eingespeiste HF-Leistung und die Abscheidetemperatur wirkten sich auf die Eigenschaften der Kohlenstoffschichten aus. Filme mit den gewünschten physikalischen und chemischen Qualitäten wurden bei HF-Leistungen über 625 W und Prozesstemperaturen unter 170°C erzielt. Mit zunehmender HF-Leistung nahmen der Wasserstoffgehalt auf unter ein Prozent und der spezifische elektrische Widerstand auf 10 mΩcm ab (siehe Abb. 5.16). Die elektrochemische Bandbreite der diamantähnlichen Kohlenstoffschichten überstieg die von Glas-Kohlenstoff um je 100 mV im anodischen wie kathodischen Potenzialbereich, die auftretenden Restströme waren nur halb so groß, woraus ein hohes Signal-Rausch-Verhältnis resultierte. Die Peakseparation, die ein Maß für die Reversibilität elektrochemischer Vorgänge an Festkörperoberflächen ist, reichte bei den abgeschiedenen DLC-Filmen mit 82 mV nahe an den Wert von Glas-Kohlenstoff mit 65 mV heran. Die Doppelschichtkapazität der diamantähnlichen Kohlenstoffschichten lag mit 40 μF/cm² einen Faktor zwei bis drei unter den Werten von Glas-Kohlenstoff. Die Härte stieg mit zunehmender HF-Leistung auf etwa 15 GPa an, was einem Siebtel des Werts von Diamant entspricht. Erstmals wurden Kohlenstofffilme mit derart guten elektrochemischen Eigenschaften mittels dünnschichttechnologischen Verfahren bei niedrigen Prozesstemperaturen hergestellt, die gleichzeitig eine hohe Leitfähigkeit aufwiesen. Die diamantähnlichen Schichten besaßen ferner eine hohe mechanische und chemische Beständigkeit, wodurch sie sich als Elektrodenmaterial für bioelektronische Anwendungen eignen.

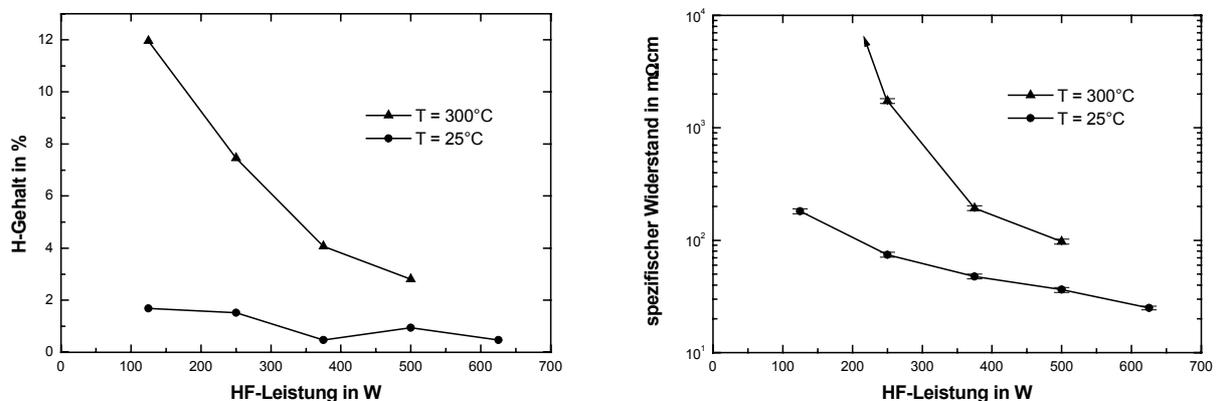


Abb. 5.16: Wasserstoffgehalt (links) und spezifischer Widerstand (rechts) der abgeschiedenen Kohlenstofffilme als Funktion der eingespeisten HF-Leistung bei der RF-Magnetron-Kathodenzerstäubung.

Elf Verfahren, die zur Rückseitenkontaktierung von Siliciumbauelementen in Frage kommen, wurden im Rahmen dieser Arbeit theoretisch verglichen und hinsichtlich deren Eignung für die vorliegende Aufgabenstellung bewertet. Einen Erfolg versprechenden Ansatz bildete die elektrische Verbindung der beiden Scheibenseiten über anisotrop geätzte Gruben, was die photolithographische Strukturierung in diesen Kavitäten erforderte. Die Technologie der anisotropen Siliciumstrukturierung, der konventionelle und der galvanische Lackauftrag wurden speziell auf die vorliegende Aufgabenstellung hin theoretisch behandelt und potentiell auftretende Probleme erörtert. Die experimentelle Durchführung der Belackung dieser hohen Topographien mittels konventioneller Schleuderverfahren zeigte, dass selbst mit mikrosystemtechnischen Speziallacken kein befriedigender Erfolg zu erzielen war, woraufhin diese Technologie verworfen wurde.

Anschließend wurde die elektrochemische Abscheidung eines Galvaniklacks untersucht und dessen Eignung für die vorliegende Aufgabenstellung gezeigt. Der Einfluss der Prozessparameter Klemmenspannung, Depositionszeit, chemische Zusammensetzung des Lackbads, Metalluntergrund und -dicke auf die Lackeigenschaften Dicke, Rauigkeit, Haftung und vollständige Benetzung anisotrop geätzter Gruben wurde charakterisiert. Die besten Ergebnisse wurden bei einer Spannung von 170 V erzielt, die optimale Belichtungs-dosis für bis zu 15 μm dicke Polymerschichten betrug 400 mJ/cm^2 . Die Entwicklung des Lacks wurde in 1 %-igem Na_2CO_3 bei 34°C durchgeführt, der Lackabzug fand in 3 %-igem TMAH bei 55°C statt. Der Galvaniklack erlaubte die Strukturierung von Titan und Siliciumoxid in flusssäurehaltigen Lösungen. Titan zeigte auch die geringste Reflexion im Vergleich zu anderen untersuchten Metallen, weswegen es zur Vermeidung von unerwünschten Fehlbelichtungen durch Reflexionen an den schrägen Grubenflanken als Oberflächenmetall für den Lackabscheidungsprozess eingesetzt wurde.

Auf Basis der beiden entwickelten Prozessschritte der elektrochemischen Lackabscheidung und der Deposition diamantähnlicher Kohlenstoffschichten wurde in Verbindung mit den theoretischen Vorüberlegungen zur optimierten Geometrie von Interdigitalelektroden ein neuartiger Ablauf zur Herstellung rückseitenkontaktierter Kohlenstoff-Interdigitalelektroden entworfen, durchgeführt und in mehreren Iterationen optimiert. Die elektrischen Eigenschaften der Durchkontaktierung wurden ermittelt, wobei spezifische Durchgangswiderstände zwischen 0,4 und 1 Ω/cm^2 erzielt wurden. Die Grundkapazität der Interdigitalelektroden lag bei Werten zwischen einem und 20 pF. Um das Funktionieren der entwickelten Prozessschritte zu bestätigen, wurden exemplarisch zwei Sensortypen zur Bestimmung der Feuchtigkeit in Gasen und zur Messung der Leitfähigkeit in Flüssigkeiten realisiert und charakterisiert.

Die Feuchteempfindlichkeit wurde durch Beschichten der Interdigitalelektroden mit Polyimid erreicht. Durch Einlagern von Wassermolekülen steigt die Dielektrizitätskonstante und folglich die Kapazität der Sensoren, was experimentell in einem Bereich zwischen 30 % und 90 % relativer Feuchte (r. F.) bestätigt wurde. Da die Fähigkeit zur Wasseradsorption der gewählten Polyimidschicht bei 50 % relativer Feuchte nur noch 1,26 % beträgt, reichte der Dynamikbereich des Sensors von etwa 40 % bis 100 %. Die Untersuchung der Ansprechzeiten zeigte, dass bei Feuchtigkeitssprüngen um 10 % r. F. die Anstiegszeit 75 Sekunden und die Abfallzeit 40 Sekunden beträgt. Eine Langzeitdrift wurde nicht beobachtet.

Zur Bestimmung von Leitfähigkeiten in Flüssigkeiten wurden die Kohlenstoffelektroden unbeschichtet in die zu vermessende Lösung getaucht und der Wechselstromwiderstand bestimmt, die Sensorkapazität und die Phasenverschiebung in Abhängigkeit von der Leitfähigkeit der Flüssigkeit zwischen 0,01 und 20 mS/cm und der angelegten Messfrequenz im Be-

reich von 1 kHz bis 1 MHz ermittelt. Aus den Ergebnissen wurden die Sensoreigenschaften und die optimalen Messbedingungen bestimmt. Der kapazitive Einfluss der Grenzschicht und der in der Flüssigkeit auftretenden Polarisierungseffekte, der sich negativ auf die Kennlinie des Wechselstromwiderstands auswirkt, fiel bei einer Frequenz von 100 kHz am geringsten aus. Daraus resultierte eine sehr lineare Kennlinie des Widerstands über den gesamten vermessenen Leitfähigkeitsbereich von 0,01 mS/cm bis 20 mS/cm (siehe Abb. 5.17).

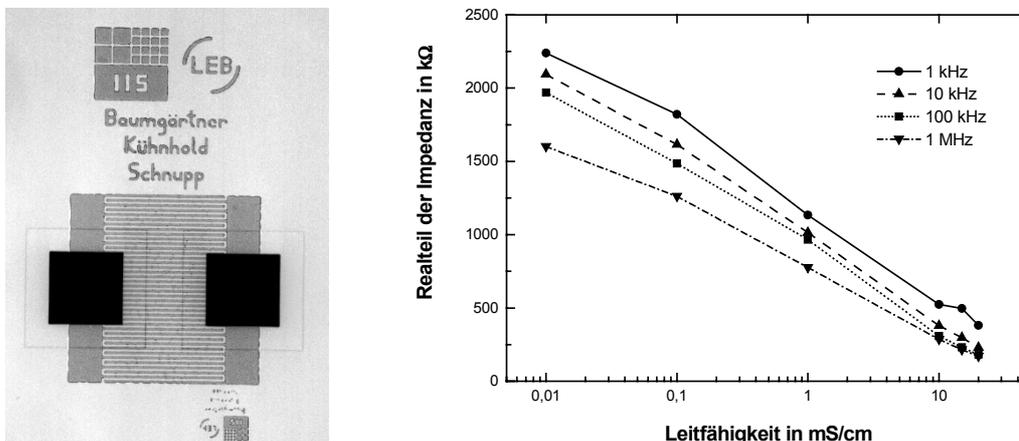


Abb. 5.17: Aufsicht auf hergestellte rückseitenkontaktierte Kohlenstoff-Interdigitalelektroden mit 10 µm Fingerbreite (links) und Realteil der Impedanz eines Feuchtigkeitssensors als Funktion der Leitfähigkeit bei unterschiedlichen Messfrequenzen (rechts).

Die dargestellten Eigenschaften der entwickelten Sensoren belegen die Eignung der DLC-Schichten als Elektrodenmaterial für bioelektronische Anwendungen. Die Funktionsfähigkeit der Rückseitenkontaktierung, die auf der elektrochemischen Belackung anisotrop geätzter Gruben basiert, eröffnet Perspektiven für eine Vielzahl neuartiger Bauelemente und Applikationen der Mikrosystemtechnik. Beispielsweise bietet die Strukturierung von Metallbahnen in den Siliciumgruben Möglichkeiten zur Realisierung von konisch geformten Mikrospulen mit hoher Induktivität und darauf beruhenden Mikrorelais, dem Aufbau miniaturisierter Quadrupole oder weiterer elektrooptischer Komponenten.

5.3.6. Modellierung von transienten Effekten bei der Diffusion von Bor in Silicium

(Dorothee Stiebel)

Die Herstellung von Bauelementen wird auch noch in der nächsten Generation auf die Ionenimplantation als Methode zum Einbringen von Dotieratomen in Silicium angewiesen sein. Während der Temperung, die nach der Ionenimplantation zur Aktivierung der Dotieratome und zur Ausheilung der Schäden benötigt wird, treten jedoch unerwünschte Effekte auf. Dotieratome wie Bor, Arsen und Indium, die überwiegend als Paare mit Eigenzwischengitteratomen diffundieren, zeigen eine stark erhöhte Diffusion. Der Begriff „transient erhöhte Diffusion“ hat sich durchgesetzt, da sich die Diffusionserhöhung mit der Ausheildauer verkleinert und schließlich vollständig verschwindet. Als ein weiterer unerwünschter Effekt bilden die Dotieratome selbst bei Konzentrationen deutlich unter der Löslichkeitsgrenze Komplexe, die eine reduzierte Aktivierung zur Folge haben. Das Auflösen dieser Komplexe erfordert ein relativ hohes thermisches Budget, welches häufig mit einer starken Profilverbretterung aufgrund transient erhöhter Diffusion verbunden ist. Da man an einem kritischen Punkt ange-

kommen ist, an dem eine weitere Verkleinerung der Bauelementgröße durch die transient erhöhte Diffusion begrenzt wird, benötigt die Industrie optimierte Prozessbedingungen für die Produktion zukünftiger Bauelementegenerationen. Gerade bei der Bestimmung von Prozessparametern, die zu einer maximalen Aktivierung mit minimaler Verbreiterung der implantierten Profile führen, erhält die Simulation eine immer größer werdende Bedeutung. Für die Optimierung benötigt man vorhersagefähige, physikalisch basierte Modelle, die Simulationen mit einem vernünftigen Rechenaufwand erlauben.

Die Entwicklung physikalisch basierter Modelle wurde erst durch die erheblichen Fortschritte der letzten Jahre im Verständnis der Einflüsse ausgedehnter Defekte auf das Dotieratomverhalten ermöglicht. In diesem Zusammenhang wurde gezeigt, dass für die Berechnung der Verbreiterung des Dotieratomprofils während einer Temperung die genaue Kenntnis der Übersättigung von Eigenzwischengitteratomen als Funktion der Zeit erforderlich ist. Für die Modellierung der Übersättigung ist gerade die Dynamik der Eigenzwischengitteratom-Agglomerate von großer Bedeutung. Weiterhin wird sowohl die Anzahl der beweglichen als auch der aktiven Dotieratome durch die Bildung von Komplexen begrenzt. Daher muss auch die Dynamik dieser Komplexe in die Simulationsmodelle eingehen.

Das Thema dieser Dissertation ist die Untersuchung der Diffusion und Aktivierung von Bor nach der Ionenimplantation. Betrachtet man lediglich nichtamorphisierende Implantationen, müssen Effekte verursacht durch Punktdefekte, kleine und mittlere Eigenzwischengitteratom-Agglomerate (Nano-Cluster, $\{113\}$ -Defekte) und Bor-Eigenzwischengitteratom-Komplexe berücksichtigt werden. In der Vergangenheit wurden experimentelle Untersuchungen und Simulationen verwendet, um mehr über die Dynamik dieser Defekte zu lernen. Für ausgedehnte Defekte, die mittels Transmissionselektronenmikroskop detektierbar sind, können Studien über ihre Bildung und ihr Auflösen in der Literatur gefunden werden. Für Punktdefekte, Nano-Cluster und Bor-Eigenzwischengitteratom-Komplexe, die nicht mit dieser Methode beobachtet werden können, wurden meist indirekte Untersuchungen wie die inverse Modellierung von Diffusionsprofilen angewendet. Darüber hinaus können atomistische Simulationen Parameter z.B. für die Stabilität verschiedener Defektarten zur Verfügung stellen.

In der vorliegenden Arbeit wurden alle oben genannten Methoden verwendet, um ein physikalisch basiertes Modell für die Diffusion und Aktivierung von Bor nach der Ionenimplantation zu entwickeln und zu testen. Da Ansätze für die Reaktionen zwischen freien Punktdefekten und für die Bildung und das Auflösen von Eigenzwischengitteratom-Agglomeraten bereits zur Verfügung standen, waren Untersuchungen in diesem Bereich nicht notwendig. Allerdings wurde eine systematische Untersuchung der Dynamik der Bor-Eigenzwischengitteratom-Komplexe durchgeführt. Mit Hilfe der Variation der Ausheilbedingungen konnte ein Temperatur- und Zeitfenster für die Bildung und das Auflösen dieser Komplexe bestimmt werden.

Die Modellentwicklung basiert auf Parametern aus atomistischen Berechnungen, wobei sich einige hundert partielle Differentialgleichungen und eine noch größere Anzahl von Parametern ergaben. Da der mögliche Fehler in atomistischen Berechnungen beachtlich sein kann, müssen die Parameter an experimentelle Ergebnisse angepasst werden. Die Anpassung einer solchen großen Parameteranzahl an eine einzige experimentelle Untersuchung ist jedoch nicht vernünftig. Daher wurde das Modell in Teile aufgespalten und jeder Teil wurde einzeln getestet und angepasst. Für dieses Vorgehen fanden sowohl die oben angesprochene experimentelle Untersuchung als auch eine große Anzahl von Daten aus anderen Forschungsgruppen und aus der Literatur Verwendung. Vor der Kopplung der einzelnen Modellteile erfolgte eine drastische Reduktion der Gleichungsanzahl. Es wurde gezeigt, dass die Bildung und das Auflösen der Bor-Eigenzwischengitteratom-Komplexe durch ein sehr viel einfacheres Modell beschrieben werden kann als die atomistischen Simulationen vermuten lassen. Der stark reduzierte Modellteil, der den Einfluss von Nano-Clustern und $\{113\}$ -Defekten auf die transient erhöhte Diffusion beschreibt, ist jedoch nicht auf die Beschreibung der Bordiffusion be-

schränkt. Statt dessen kann er auf alle Dotieratome, die überwiegend als Paare mit Eigenzwinggitteratome diffundieren, angewendet werden. Nach der Kopplung der Modellteile wurden die Parameter des Modells noch einmal leicht variiert, um die Beschreibung verschiedener maßgeblicher Experimente zu gewährleisten. Das endgültige Modell stellt nun einen breit getesteten Ansatz dar, der alle heute bekannten physikalischen Aspekte beinhaltet. Die durchgeführte Reduktion von einigen hundert auf lediglich vierzehn Gleichungen führt zu einer Verkürzung der Simulationszeit um fünf Größenordnungen und erlaubt daher die Anwendung dieses Modells in kommerziellen Programmen.

5.3.7. Entwicklung eines integrierbaren optischen Messsystems zur Kontrolle der Linienbreiten periodischer sub-Mikrometerstrukturen

(Norbert Benesch)

Ziel der Arbeit war die Entwicklung eines kostengünstigen und integrierbaren Messgeräts zur Kontrolle von Linienbreiten bei der Fertigung von Halbleiterbauelementen, insbesondere im ökonomisch wichtigen Bereich der DRAM-Bauelemente. Ausgangspunkt war die anhand von Cost-of-Ownership-Berechnungen bestätigte Erkenntnis, dass bereits sehr geringe Ausbeute- oder Durchsatzsteigerungen den Einsatz zusätzlicher Messtechnik rechtfertigen können. Ein entsprechendes Messsystem sollte Strukturgrößen während oder unmittelbar nach einem Fertigungsschritt kontrollieren, so dass Geräte- oder Prozessfehler sofort entdeckt werden und eine Produktion weiterer defekter Scheiben vermieden wird. Die bislang für die Linienbreitenkontrolle eingesetzte, hohe Kosten verursachende Elektronenmikroskopie sollte dadurch soweit wie möglich reduziert bzw. ergänzt werden.

Die beschriebenen Untersuchungen begleiteten einen Forschungsauftrag zur Entwicklung eines integrierbaren Linienbreiten-Messsystems im Rahmen des Aufbaus der weltweit ersten 300-mm-Pilotlinie. Dadurch flossen von Beginn an die industriellen Vorgaben in den Entwurf des Laborgeräts und in die Integrationslösung beim Halbleiterhersteller mit ein. Neben der notwendigen Messgenauigkeit, Geschwindigkeit und Zuverlässigkeit für die Kontrolle von Strukturabmessungen war für die Konzeption des neuen Messsystems vor allem die Zielvorgabe hinsichtlich geringer Anschaffungskosten für ein integrierbares Seriengerät maßgeblich. Aufwendige Bildverarbeitungssysteme und Strahlführungen zur Erkennung und Messung einzelner Teststrukturen mussten daher vermieden werden. Statt dessen sollte mit einer kostengünstigen optischen Messanordnung ein repräsentativer Mittelwert für die Linienbreiten von regulären Bauelementestrukturen ermittelt werden. Zudem wurden die während der Entwicklung zur Verfügung stehenden Testbedingungen berücksichtigt. Der Fertigungsablauf in der Pilotlinie für 300-mm-Scheiben sollte durch einen Test des neuen Messverfahrens so wenig wie möglich geändert bzw. gestört werden. Das Messgerät musste daher flexibel an aktuelle Produktionsbedingungen und Fertigungsgeräte anpassbar sein.

Grundlage des hier entwickelten Messprinzips ist die Nutzung der optischen Beugung an periodischen Gitterstrukturen. Die Intensitäten von Beugungsordnungen werden dabei als Funktion des Messstrahl-Azimutwinkels gemessen und sind charakteristisch für die Oberflächen- und Materialeigenschaften der Probe. Eine Berechnung der Beugungseffekte an sub-Mikrometerstrukturen erfordert für den Einzelfall die numerische Lösung des zugehörigen Maxwell'schen Randwertproblems. Aufgrund des damit verbundenen Rechenaufwands ist die Messung von Strukturbreiten mit Hilfe der optischen Beugung bisher auf linien-förmige Gitter beschränkt.

Um auch bei komplizierten Gitterstrukturen - wie DRAM-Zellenfeldern mit Periodizitäten in zwei Raumrichtungen - auf Probeneigenschaften schließen zu können, wird hier ein neuer Ansatz realisiert: Mit Hilfe von Referenzmessgeräten werden zunächst die Gittereigenschaften einer Menge von variierenden Proben ermittelt. Zusammen mit den ebenfalls gemessenen

Beugungssignaturen der Gitterstrukturen werden die Daten zum Training adaptiver neuronaler Netzwerke verwendet. Diese ermöglichen anschließend eine schnelle Erkennung fehlerhafter Bauelemente- und eine Schätzung von Gitter- oder Prozessparametern.

Der Praxistest des Messprinzips erfolgte in einer realen Produktionsumgebung. Hierzu wurde erstmals ein Messgerät für eine winkelabhängige, monochromatische Beugungsmessung vorgeschlagen und aufgebaut, das sich aufgrund seines geringen Platzbedarfs und seines kostengünstigen Aufbaus für eine Integration in Fertigungsgeräte eignet. Das Beugungsmessgerät (IPCOS, Abb. 5.18) wurde so konstruiert, dass es auf FOUP-Beladestationen von Halbleiterfertigungsgeräten für 300-mm-Scheiben aufgesetzt werden kann. Neben Simulationen und Messungen bei linienförmigen Lackstrukturen wurden zur Untersuchung des neuen Verfahrens sowohl systematisch variierte DRAM-Strukturen als auch zufällig auftretende Prozessvariationen bei verschiedenen Lithographiesequenzen herangezogen. Abb. 5.19 zeigt beispielhaft die Detektion schwerwiegender Strukturfehler bei einer Prozess-zu-Prozess-Kontrolle anhand von IPCOS-Beugungsmessungen in einer Produktionslinie (Abweichungen der Beugungssignaturen von ihrem Nominalverlauf bei einzelnen fehlerhaften Losen).



Abb. 5.18: Kontrolle von DRAM-Linienbreiten mit IPCOS (Gehäuse entfernt) auf dem Scheibenhandhabungssystem in einer Produktionslinie.

Die im Rahmen dieser Arbeit erzielten Ergebnisse zeigen, dass das vorgestellte Verfahren einen Beitrag leisten kann, um die Produktqualität in der Halbleiterfertigung zu sichern bzw. zu erhöhen und Gerätekosten sowie Ausschuss zu reduzieren. Neben DRAMs lassen sich damit z. B. auch in Logikbausteine eingebettete Speicherbereiche oder Datenträger wie Festplatten und optische Medien prüfen. Liegen bei Logikschaltungen keine periodischen Bereiche vor, so kann mit zusätzlich aufgebracht, periodischen Teststrukturen gearbeitet werden.

In Verbindung mit der Messbarkeit von 50-nm-Strukturen ist das Messprinzip damit auch für zukünftige Anwendungen in der Halbleiterfertigung geeignet.

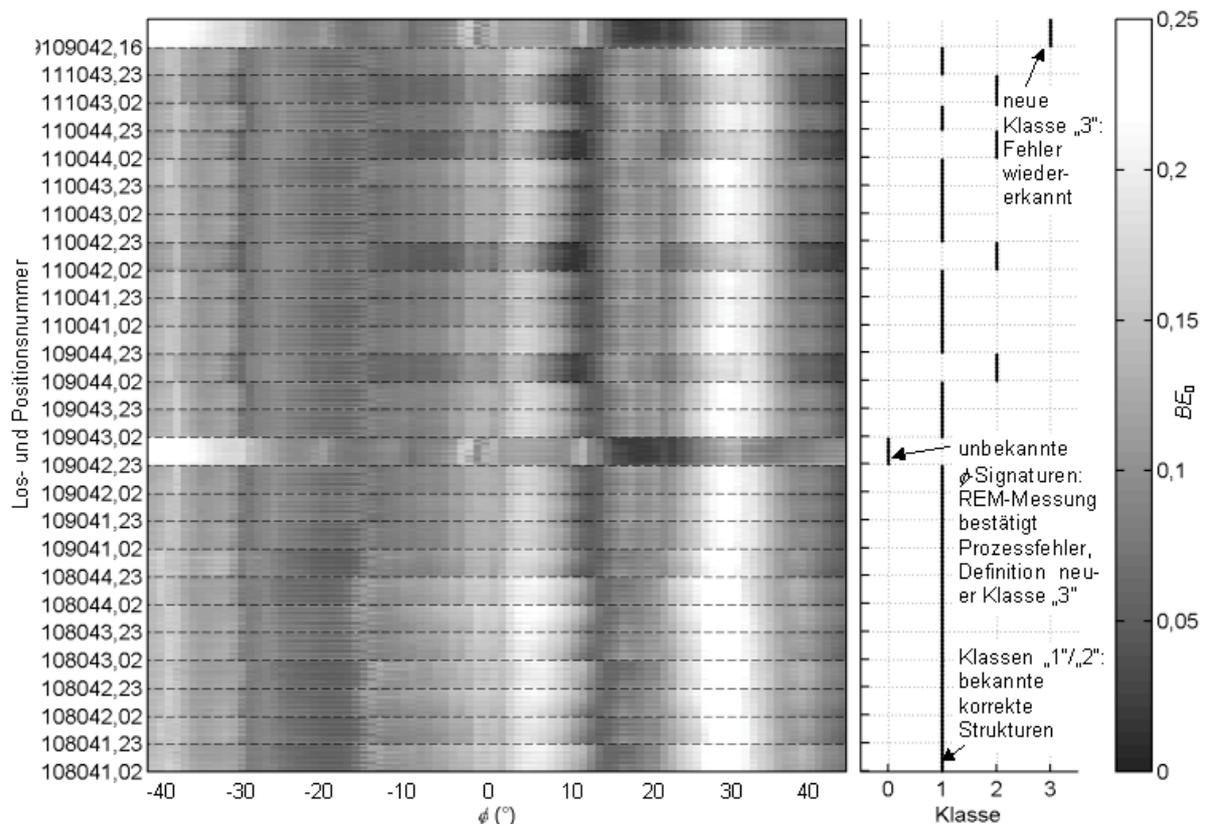


Abb. 5.19: Fehlererkennung und Klassifikation von DRAM-Strukturen mit IPCOS.

6. Forschung

6.1. Arbeitsgebiete

6.1.1. Prozesstechnik

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

Neue technologische Prozesse und Herstellungsmethoden für die VLSI-, ULSI- und Nanotechnologie und für moderne Leistungsbaulemente werden im Arbeitsgebiet Halbleiter- und Nanotechnologie 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 IISB)

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 Feldefekttransistoren sowie mikroelektromechanische Vibrationsmesssysteme genannt. Die verwendeten Sonderprozesse wie z.B. die anisotrope Ätztechnik oder der Einsatz von Ätzstopp-techniken 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 über 100V für Produkte zum Einsatz in der Automobilelektronik sowie mit einer Spannungsfestigkeit von ca. 600 V für Anwendungen an 230 V Netzwechselspannung 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 IISB)

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 IISB und anderen Forschungsinstituten zur schnellen und kostengünstigen Entwicklung von Technologieschritten und Bauelementen eingesetzt. Zunehmende Bedeutung kommt den Arbeiten zu nichtidealen Prozessen zu. Nachdem seit Ende 1999 die Aktivitäten im Arbeitsgebiet insbesondere hinsichtlich der Lithographiesimulation erfolgreich ausgebaut wurden, war im Jahr 2002 die wichtigste Entwicklung eine Erweiterung im Bereich der Simulation von Verbindungsstrukturen, der sogenannten Interconnects.

6.1.5. Halbleiterfertigungsgeräte und -methoden

Ansprechpartner: Prof. Dr.-Ing. Lothar Pfitzner (Fraunhofer IISB)

Im Arbeitsgebiet Halbleiterfertigungsgeräte und -methoden 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 Gerätevorqualifizierung 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 erfolgreich aufgebaute 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 IISB)

Das Arbeitsgebiet "Leistungselektronische Systeme" befasst sich mit der Schaltungs- und Systementwicklung für alle Felder der Leistungselektronik mit Schwerpunkten auf den Anwendungsgebieten Automobil und Haushaltsgeräte. Unterstützt werden Firmen in der anwendungsorientierten Vorlaufforschung sowie bei der Entwicklung von Prototypen und Kleinserien.

Die Arbeiten umfassen low-cost Systemkonzepte für Leistungselektronik in Massenanwendungen wie Haushalts- oder Klimageräten. Daneben auch Konzepte für Leistungswandler und Frequenzumrichter hoher und höchster Leistungsdichte von wenigen Watt bis zu mehreren zehn Kilowatt. Einen breiten Raum nehmen Fragen der mechatronischen Systemintegration ein, d.h. der Integration von Halbleiterbauelementen, passiven Komponenten, Sensorik und

Mechanik. Beispielhaft hierfür sind hochintegrierte Hybridantriebe für verbrauchsarme Kraftfahrzeuge.

Einzelthemen sind z.B. Ansteuerlösungen für Leistungs-MOSFET und IGBT, digitalisierbare Steuerverfahren sowie die elektrische und thermische Systemcharakterisierung und -modellierung. Für die Arbeiten stehen ein modernes Entwicklungslabor, modernste Mess- und Charakterisierungseinrichtungen sowie umfangreiche EDA-Tools zur Verfügung.

6.2. Beispiele aus der Forschung

6.2.1. CVD-Prozesse mit neuartigen metallorganischen Precursoren zur Herstellung hoch-dielektrischer Gatedielektrika und metallischer Gateelektroden zukünftiger CMOS-Generationen

(Martin Lemberger)

Die Arbeiten hierzu finden im Rahmen des von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderten Schwerpunktprogramms (SSP) 1119 „Anorganische Materialien durch Gasphasensynthese: Interdisziplinäre Ansätze zu Entwicklung, Verständnis und Kontrolle von CVD-Prozessen“ statt. Die erste Förderphase des Projektes bezog sich auf die Herstellung eines alternativen Gatedielektrikums im Anwendungsbereich der Silicium-basierten Mikroelektronik. Mit entscheidend für die heute marktführende Position eben dieser Silicium-basierten Mikroelektronik ist unter anderem die Möglichkeit, mittels thermischer Oxidation ein qualitativ sehr hochwertiges Dielektrikum herzustellen - Siliciumdioxid (SiO_2). In der gegenwärtigen Technologiegeneration ist die Dicke des Gateoxids im Metall-Oxid-Halbleiter Feldeffekttransistor (MOSFET, englisch: metal-oxide-semiconductor field effect transistor), dem fundamentalen Bauelement integrierter Schaltungen, etwa 1,5 nm oder dünner. In diesem Dickenbereich treten nun zunehmend Probleme auf, vor allem im Hinblick auf die Zuverlässigkeit der Gateoxide. Auch steigen die elektrischen Verluste aufgrund von Leckströmen rapide mit abnehmender Oxiddicke an, was vor allem bei mobilen Anwendungen nachteilig ist. Aus diesem Grunde wird es unumgänglich sein, in zukünftigen Technologiegenerationen mit kleineren Bauelementeabmessungen und daraus resultierend kleineren Gateoxiddicken, SiO_2 als Gatedielektrikum durch andere Materialien zu ersetzen.

Bei der Auswahl geeigneter Materialien wie auch im Hinblick auf deren technologische Herstellung sind unterschiedliche Aspekte zu beachten. So ist etwa die Forderung nach einer höheren Dielektrizitätskonstanten ϵ der neuen Materialien als bei SiO_2 offensichtlich. Auch sind amorphe Schichten wünschenswert, bei denen Leckstrompfade, wie sie bei polykristallinen Schichten entlang von Korngrenzen vorhanden sind, vermieden werden. Entscheidend jedoch ist, dass die neuen Materialien in direktem Kontakt mit Silicium chemisch stabil sind. Von vielen untersuchten Kandidaten (z.B. TiO_2) ist bekannt, dass sich zwischen dem Siliciumsubstrat und der aufgetragenen Schicht während nachfolgender Temperaturprozesse eine SiO_2 -Zwischenschicht bildet, die alle Vorteile des neuen Dielektrikums relativiert.

Ein vielversprechender Weg, der in diesem Projekt zur Lösung dieses Problems beschritten wird, sind Zirkonium- und Hafniumsilikatschichten, die mittels metallorganischer chemischer Gasphasenabscheidung (MOCVD, englisch: metal-organic chemical vapor deposition) hergestellt werden. Der Hauptvorteil von Zirkonium- und Hafniumsilikatschichten ist ihre chemische wie auch thermische Stabilität in direktem Kontakt mit Silicium, wenngleich sie im Gegensatz zu anderen Materialien nur eine mittlere Dielektrizitätskonstante, etwa vier bis sechs mal größer als die von SiO_2 , aufweisen. Aus technologischer Sicht wird meist eine Abscheidung mittels MOCVD bevorzugt, da die Prozesse gut kontrollierbar sind und eine konforme

Kantenbedeckung erreicht werden kann. Dies hängt jedoch entscheidend von den verwendeten Ausgangsstoffen ab, die nach Möglichkeit alle zur Schichtherstellung benötigten (Metall-) Atome in einem Molekül bereitstellen sollten, sogenannte „single-source“ Ausgangsstoffe. Da für die Herstellung von Zirkonium- bzw. Hafniumsilikatschichten mittels MOCVD keine derartigen Stoffe und damit auch keine industrietauglichen Prozesse zur Verfügung stehen, kommt der Entwicklung geeigneter Ausgangsstoffe eine entscheidende Bedeutung zu.

Meist muss dabei ein Kompromiss zwischen Flüchtigkeit der Ausgangsstoffe auf der einen Seite und deren Luft- bzw. Feuchteempfindlichkeit auf der anderen Seite gefunden werden. Ein Ansatz hierfür sind Komplexe der Form $M^{IV}(\text{acac})_2(\text{OSiRR}'\text{R}'')_2$, wobei M für Zirkonium oder Hafnium, acac für Acetylacetonato- und R, R', R'' für organische Gruppen stehen. In Abb. 6.1 ist schematisch der Syntheseweg zweier iso-struktureller Ausgangsstoffe A und B dargestellt, die für MOCVD-Prozesse am geeignetsten erscheinen und sich hinsichtlich der verwendeten organischen Gruppen unterscheiden. Die Synthese findet dabei ausgehend von kommerziell erhältlichen Produkten in jeweils zwei Schritten statt. Bei der Charakterisierung der Ausgangsstoffe zeigt sich, dass sowohl Syntheseausbeute als auch Reinheit für Labormaßstäbe hinreichend gut sind. Ebenso zeigt sich, dass die Ausgangsstoffe dem erwarteten Kompromiss zwischen Flüchtigkeit einerseits und thermischer Stabilität andererseits genügen. Die benötigten Abscheidetemperaturen liegen mit bis zu 600°C gut im Rahmen industrieller CVD-Systeme.

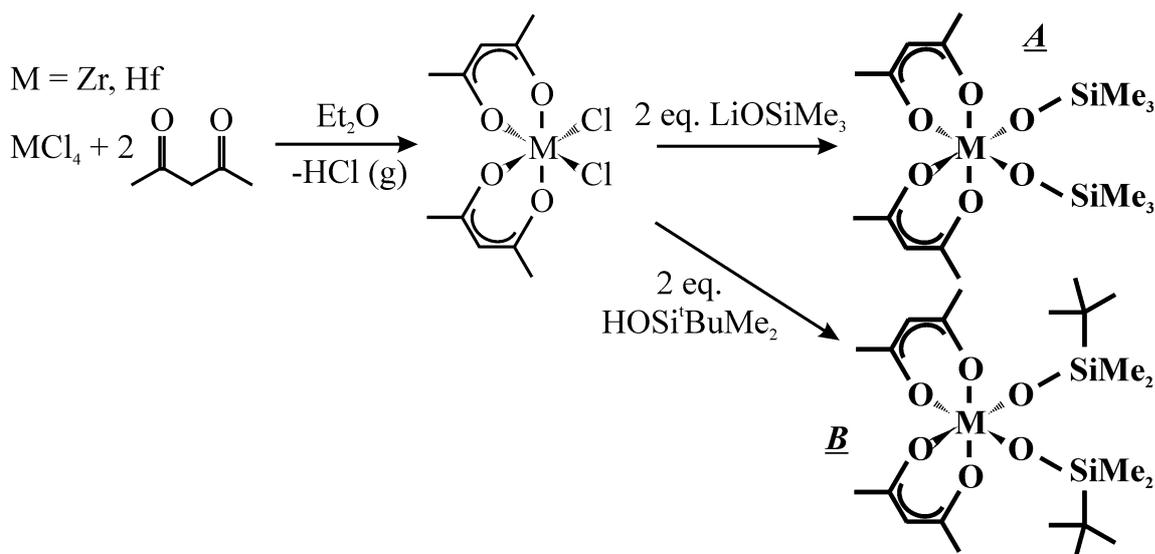


Abb. 6.1: Synthese zweier iso-struktureller 1:2 (Zr, Hf):Si- Ausgangsstoffe.

Für die Schichtherstellung selbst steht am LEB ein industrienaher MOCVD-Reaktor zur Verfügung, in dem Scheiben mit bis zu 200 mm Durchmesser beschichtet werden können (Abb. 6.2). Es handelt sich hierbei um einen sogenannten Kaltwandreaktor, d.h. es werden direkt die Scheiben und nicht die Atmosphäre beheizt. In unserem Fall liegen die Scheiben auf einem durch Halogenlampen beheizten Graphitteller. Zur Verbesserung der Schichthomogenität rotiert diese Scheibenaufnahme während des Abscheideprozesses. Abb. 6.3 zeigt die optisch gemessene Dicke einer Hafniumsilikatschicht, abgeschieden auf einer 150 mm Scheibe unter Verwendung des Ausgangsstoffs B, wobei gut der Einfluss dieser Scheibenrotation zu sehen ist.



Abb. 6.2: MOCVD-Reaktor am LEB.

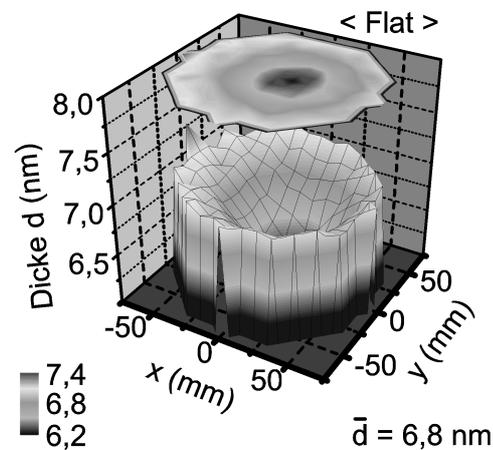


Abb. 6.3: Homogenität einer 6,8 nm dicken Hafniumsilikatschicht auf einer 150 mm Scheibe.

Da an alternative Gatedielektrika hohe Anforderungen gestellt werden, ist sowohl die physikalische wie auch die elektrische Schichtcharakterisierung von großem Interesse. So zeigen etwa Untersuchungen zur Zusammensetzung, dass der Siliciumgehalt in den Schichten im Vergleich zum Metall zu Silicium Verhältnis der Ausgangsstoffe unter der erwarteten Stöchiometrie liegt. Ein weiterer Aspekt, der bei MOCVD-Prozessen immer zu beachten ist, ist eine mögliche Kontamination der Schichten mit Kohlenstoff aufgrund der organischen Gruppen in der Ausgangschemie. Hierbei zeigt sich, dass, abhängig von der Chemie, kohlenstofffreie Schichten nur unter bestimmten Abscheidebedingungen erzielt werden können. Kohlenstoff ist in den Schichten unerwünscht, da er zum einen elektrisch leitfähig ist und somit das Leckstromverhalten negativ beeinflusst. Zum anderen erweist er sich als Haftstelle für elektrische Ladungen und bewirkt somit eine Veränderung elektrischer Parameter. Die elektrischen Eigenschaften der Schichten wurden anhand von MOS-Strukturen charakterisiert. Dazu wurden die Schichten zunächst in Sauerstoffatmosphäre getempert, auch um auftretende Kohlenstoffverunreinigungen zu entfernen. Anschließend wurden die MOS-Strukturen geformt, indem eine Metallisierung aus Titan bzw. Nickel und Aluminium durch eine Schattenwurfmaske auf die Scheibenvorderseite aufgedampft wurde. Die Messungen an den so gefertigten MOS-Kondensatoren waren vielversprechend. So ist etwa eine bedeutende Größe, die Dielektrizitätskonstante, bis zu vier mal größer als die von SiO_2 , wobei sich hierbei eine Abhängigkeit von der Isolatorstärke zeigt. Die auftretenden Leckströme sind bei entsprechender Prozessierung, d.h. kohlenstofffreie Schichten, ausreichend klein. Ein Problem bei ausnahmslos allen hoch- ϵ Dielektrika sind in der Schicht eingefangene bzw. an der Grenzfläche zu Silicium befindliche Ladungen. Diese sind bei unseren Proben gering, jedoch findet während eines elektrischen Stresses ein signifikanter Aufbau von Ladungen statt, was Einfluss auf elektrische Parameter und die Zuverlässigkeit von Bauelementen hat.

Viele dieser elektrischen Parameter werden auch von der aufgetragenen Metallelektrode mit beeinflusst. Bei den bisherigen Untersuchungen wurde eine Metallisierung aus aufgedampftem Titan bzw. Nickel und Aluminium verwendet, da sich eine Metallisierung aus dotiertem polykristallinem Silicium, wie sie in heutigen Technologien verwendet wird, bei den vorliegenden Schichten als nicht brauchbar erwies. Dies zeigt, dass neben der Untersuchung alter-

nativer Gatedielektrika auch die Einführung neuer, metallischer Gateelektroden bedeutsam ist, was Schwerpunkt der zweiten Förderphase des Projekts ist. Um den Anforderungen für integrierte Schaltungen zu entsprechen, die nahezu ausschließlich in komplementärer MOS-Technologie (CMOS, englisch: complementary MOS) ausgeführt sind, sind zwei unterschiedliche Metalle notwendig. Komplementär bedeutet hierbei, dass integrierte Schaltungen mit zwei Arten von Transistoren unterschiedlicher Leitungstypen (Löcher- und Elektronenleitung im Kanal des Transistors) aufgebaut sind. Die unterschiedlichen Transistortypen schalten jeweils bei einer charakteristischen Spannung ein, d.h. sie werden im Falle selbstsperrender Transistoren leitend. Für diese beiden sogenannten Einsatzspannungen wäre es nun optimal, wenn sie symmetrisch zu 0 V liegen würden, d.h. bei einem bestimmten positivem und negativem Spannungswert. Die Einsatzspannung hängt nun unter anderem von der Austrittsarbeit (Arbeit, die benötigt wird um Elektronen aus dem Material ins Vakuum zu lösen) der verwendeten Metallelektrode ab, die sich beispielsweise durch eingebrachten Stickstoff verändern lässt. Insofern sind Paarungen aus (reinem) Metall und zugehörigem Metallnitrid interessante Kandidaten für die Metallisierung in zukünftigen Technologiegenerationen. In unserm Projekt, das sich noch in der Anfangsphase befindet, wird weiter der Weg der metallorganischen chemischen Gasphasenabscheidung beschritten. Ausgangspunkt hierfür sind Tantalverbindungen, bei deren Abscheidung in unterschiedlichen Atmosphären (Chemiedampf mit Stickstoff und/oder Ammoniak) sich der Stickstoffgehalt und damit die Austrittsarbeit variieren und einstellen lässt. Erste Versuche in einem für die Metallisierungsversuche umgebauten, zweiten Abscheidereaktor stehen demnächst an.

6.2.2. Herstellung von polykristallinen Silicium-Germanium-Schichten durch die Niederdruckgasphasenabscheidung

(Oliver Krause, Trixi Leistner)

Ziele des Projektes

Die weitere Verkleinerung von MOS-Transistoren zu Kanallängen im Sub-100 nm-Bereich erfordert die Entwicklung qualitativ hochwertiger Gateoxide mit Dicken kleiner 3 nm. Diese Schichten werden bei der heutigen Prozessführung (thermische Aktivierung bei 800°C und höher) leicht von den Dotierstoffen der Polysiliciumelektrode durchdiffundiert. Dies führt zu Problemen bei der Reproduzierbarkeit der Transistoreigenschaften, insbesondere der Einsatzspannung, und somit zu einer Verringerung der Langzeitstabilität des Bauelementes. Dieser Effekt tritt besonders stark bei der Bor dotierten Gateelektrode auf.

Im vorliegenden Projekt soll untersucht werden, ob durch die Verwendung einer polykristallinen SiGe-Gate-Elektrode eine Aktivierung der Dotierstoffe bei geringeren Temperaturen als in reinem Silicium möglich ist und damit das Diffusionsverhalten unterbunden werden kann. Dazu sollen mit Methoden der chemischen Gasphasenabscheidung geeignete polykristalline SiGe-Schichten auf thermischen Oxiden abgeschieden werden. Die Dotierung erfolgt durch die Ionenimplantation. Das Aktivierungs- und Diffusionsverhalten bei verschiedenen Temperaturen soll vor allem für den Dotierstoff Bor untersucht werden.

Bisherige Ergebnisse

Zunächst wurde ein Prozess zur Herstellung polykristalliner Silicium-Germanium-Schichten (poly-SiGe) entwickelt und charakterisiert. Hierzu wurde an einer bestehende Niederdruckgasphasenabschideanlage (LPCVD, englisch: Low Pressure Chemical Vapour Deposition) ein Umbau getätigt welcher es ermöglicht, German (GeH₄) in den Prozess einzuleiten. Zur Abscheidung der Schichten wurden bestehende Polysilicium-Abschideprozesse modifiziert, die verschiedene Gasflüsse, Temperaturen und Abscheideraten ermöglichten.

Alle poly-SiGe-Abscheidungen wurden auf Siliciumscheiden mit 20 nm SiO₂ durchgeführt. Untersuchte Prozesstemperaturen waren 500°C, 550°C, 600°C und 650°C, der Prozessdruck betrug 0,2 Torr, die Summe der Gasflüsse 50 sccm. Die abgeschiedenen Schichten wurden mittels Spektralellipsometrie optisch charakterisiert, um Brechungsindizes und Schichtdicken bestimmen zu können. Die Abscheidungen zeigen folgendes Verhalten: bei konstant gehaltenen Gasflussverhältnissen wächst mit zunehmender Temperatur die Abscheiderate, mit steigendem Germananteil bei gleicher Temperatur während der Abscheidung wächst ebenfalls die Abscheiderate. Abb. 6.4 zeigt die die Abscheiderate von SiGe-Schichten als Funktion des Verhältnisses der Gasflüsse für verschiedene Abscheidetemperaturen. Dieses Verhalten stimmt sehr gut mit vergleichbaren Daten aus der Literatur überein (z.B. Cao et al., Electrochem. Soc. Proc., 93-6, 1993 pp. 350-356; King et al. J. Electrochem. Soc., 1978, vol. 125, no. 6, pp. 957-962).

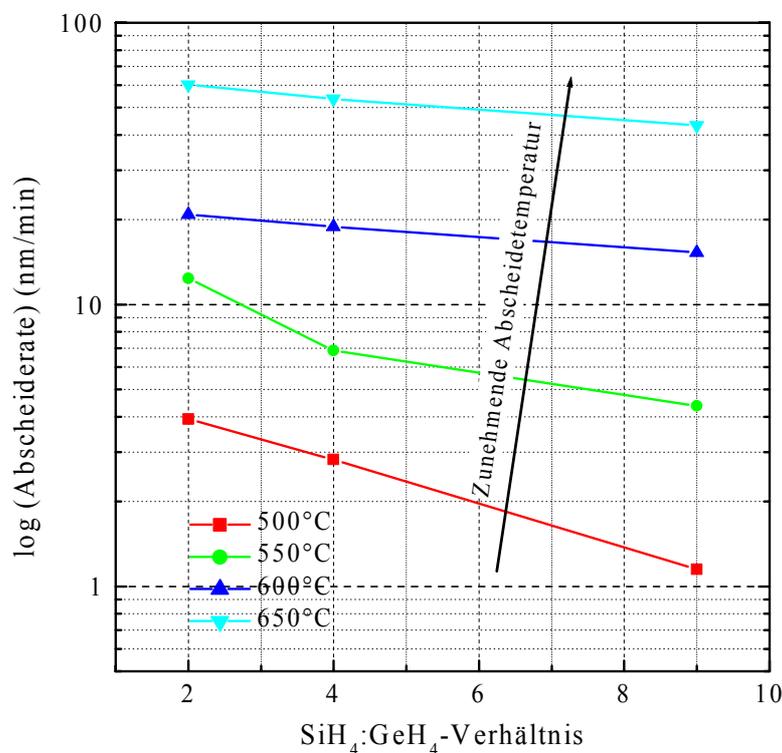


Abb. 6.4: Abscheideraten von poly-SiGe-Schichten als Funktion des Verhältnisses der Silan-German-Flüsse

Zur Bestimmung der Stöchiometrie der abgeschiedenen poly-SiGe-Schichten wurden Analysen durch Photoelektronenspektroskopie (XPS, englisch: X-Ray Photoelectron Spectroscopy) durchgeführt. Es wurden tiefenaufgelöste Messungen (Messung an der Oberfläche sowie jeweils nach einem Materialabtrag von ca. 15 nm) von Germanium und Silicium, für einige Proben zusätzlich von Sauerstoff durchgeführt.

Außerdem wurden Ätzversuche durchgeführt. Die Scheiben wurden mit Salpetersäureätzmischung, die üblicherweise zum Ätzen von Polysilicium verwendet wird, im Becherglas geätzt. Die Ermittlung der Ätzdauer erfolgte durch Sichtkontrolle der Scheiben. Die Scheibenmitte wurde immer schneller geätzt als der Rand. Je nach Stöchiometrie traten unterschiedlich große Ätzraten auf. Die folgende Tabelle zeigt eine Zusammenfassung der Abscheideraten, Ätzraten und Stöchiometrien der durchgeführten Versuche:

Tabelle 6.1: Zusammenfassung der Abscheideraten, Ätzraten und Stöchiometrien der durchgeführten Versuche

Abscheide- temperatur	SiH ₄ :GeH ₄ Verhältnis	Stöchiometrie Si : Ge	Abscheide- rate [nm/min] ¹	Ätzrate [nm/sec]
500°C	9:1	87:13*	1,15	5,4
	4:1	79:21*	2,82	7,4
	2:1	73:27*	3,92	-
	1:1	60:40**	-	-
	1:2	48:52**	-	-
	1:4	34:66**	-	-
550°C	9:1	90:10*	4,37	5,2
	4:1	85:15*	6,87	8,7
	2:1	78:22*	12,37	7,4
600°C	9:1	96:04*	15,3	4,3
	4:1	93:03*	18,9	5,2
	2:1	91:09*	20,9	5,3
650°C	9:1	Nicht ermittelt	43,2	-
	4:1		53,8	5,4
	2:1		60,2	6,7

* XPS, ** RBS, ¹ Schichtdicke durch Ellipsometer

Die Proben 550°C, SiH₄:GeH₄ 9:1 und 550°C, SiH₄:GeH₄ 4:1 mit den Stöchiometrien Si_{0,90}Ge_{0,01} und Si_{0,78}Ge_{0,22} wurden für weitere Versuche ausgewählt, außerdem sind noch weitere Abscheidungen geplant. Zur elektrischen Charakterisierung der hergestellten poly-SiGe-Schichten wurde ein Prozess zur Abscheidung von SiGe auf LOCOS isoliertem Silicium angestoßen. Hierbei werden poly-SiGe-Schichten mit den Stöchiometrien 90:10, 80:20, 70:30 und 60:40 untersucht. Innerhalb dieses Prozesses sollen eine Gate-Dotierung durch Ionenimplantation von Bor bei 30 keV mit einer Dosis von 10¹⁵ cm⁻² sowie verschiedene Ausheilschritte erfolgen. An den so entstandenen MOS-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 Sekundärionen-Massenspektroskopie lassen sich Aussagen über das Diffusionsverhalten von Bor in Poly-SiGe und die Verarmung der Gate-Elektrode bzw. die Diffusion durch dünne Gateoxide machen.

6.2.3. Untersuchung von p-dotierten Schichten in Siliciumcarbid

(Martin Rambach)

Einleitung

Heutzutage werden in praktisch allen Bereichen der Leistungselektronik Bauelemente aus Silicium (Si) eingesetzt. Aufgrund der vielversprechenden und in wichtigen Bereichen besseren Materialeigenschaften von Siliciumcarbid (SiC) zu Silicium wird das Augenmerk immer mehr auf SiC gerichtet. Die wesentlichen Vorteile liegen in der hohen Durchbruchfeldstärke (etwa $2,4 \cdot 10^6$ V/cm für 4H-SiC) und der hohen Wärmeleitfähigkeit von etwa 4,9 W/(cmK). Außerdem kann fast die gesamte Siliciumtechnologie übernommen werden. Änderungen sind aber z.B. bei den Dotierverfahren nötig. In SiC können strukturierte Dotierungen nur mittels Ionenimplantation erfolgen, da die Dotieratome in SiC nur äußerst gering diffundieren können. Der anschließend notwendige Ausheilschritt, um die implantierten Atome auf Gitterplätze im SiC einzubauen und somit zu aktivieren, muss für p-Dotierungen bei sehr hohen Temperaturen von etwa 1700°C erfolgen. Durch das bei herkömmlichen Ofenprozessen verwendete hohe thermische Budget degradiert die Oberfläche in starkem Maße. Dies stellt für nachfolgende Prozesse, z.B. eine Gateoxidation, große Probleme dar.

Zusätzlich zur Oberflächendegradation ist der erzielbare Schichtwiderstand in den dotierten Bereichen von Interesse. Besonders bei p-Dotierungen, im Gegensatz zu n-Dotierungen, ist der bisher erreichte Schichtwiderstand ionenimplantierter Gebiete noch sehr groß. Dies führt zu wenig attraktiven Bauelementen, die auf niederohmige p-dotierte Bereiche angewiesen sind.

Zielsetzung

Die zur Zeit mit dem größten Interesse verfolgten Lösungsansätze der Probleme der Oberflächendegradation und des Schichtwiderstandes von p-dotiertem SiC sollen genauer untersucht und neue Lösungsmöglichkeiten aufgezeigt werden.

Als Kernstücke dieser Experimente stehen zwei Apparaturen zum Ausheilen zur Verfügung: ein Lampensystem sowie ein Vertikalofen.

Der Vorteil des Lampensystems besteht in der Reduzierung des thermischen Budgets während dem Aufheizen durch die extrem steilen zeitlichen Temperaturgradienten (größer 60 K/s), verglichen mit einem Standardofen. Durch die hohen erreichbaren Temperaturen von mehr als 1700°C ist trotz des eigentlich kurzen Ausheilschrittes, typischerweise 2-5 min, mit einer ausreichenden Aktivierung der Dotieratome in SiC zu rechnen. Da SiC-Scheiben im hier verwendeten Spektralbereich der Lampen nur eine geringe Absorption zeigen, wurden diese entweder in einer Graphitbox oder in einer SiC beschichteten Graphitbox ausgeheilt.

Der Vertikalofen bietet hingegen die Möglichkeit, im Gegensatz zu dem Lampensystem, den Ausheilvorgang in einer mit Silan angereicherten Atmosphäre durchzuführen. Dadurch soll ein Abdampfen von Silicium von der Scheibenoberfläche unterdrückt werden, der eigentliche Prozess der Oberflächendegradation. Durch die ebenfalls erreichbaren Temperaturen von mehr als 1700°C kann im Kombination mit einer längeren Ausheildauer als im Lampensystem (typischerweise 30 min) ein geringer Schichtwiderstand erwartet werden.

Zur Untersuchung des Ausheilens p-dotierter Schichten an Bauelementen wurden Diodenstrukturen hergestellt.

Experimentelle Arbeiten

Um die hohen Erwartungen der Ausheilssysteme zu verifizieren, wurden n-typ 4H-SiC 8° off axis Scheiben mit 5 µm n-dotierter Epitaxieschicht mit Aluminium (Al) mit verschiedenen Dosen implantiert. Anschließend wurden die Scheiben für verschiedene Temperaturen und Zeiten ausgeheilt, entweder im Lampensystem oder im Vertikalofen.

Die Oberflächendegradation konnte mit einem Atom-Kraft-Mikroskop (AFM, englisch: atomic force microscop) vermessen werden. Als Parameter diente der rms-Wert (root mean square) der Oberflächenrauigkeit. Die Messergebnisse für die verschiedenen Proben sind in Abb. 6.5 dargestellt.

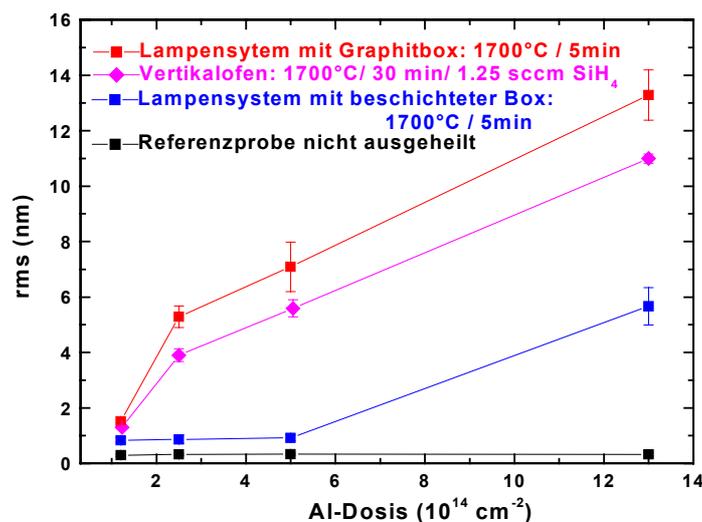


Abb. 6.5: Oberflächenrauigkeiten für Al implantierte und ausgeheilte Proben.

Als Referenz (schwarz) ist eine nicht ausgeheilte Probe vermessen. Die Oberflächenrauigkeit dieser Probe ist von der implantierten Dosis nahezu unabhängig. Der Unterschied zwischen ausgeheilten Proben und der Referenzprobe wird somit alleine von dem Ausheilvorgang verursacht. Auffallend ist ein Anstieg der Oberflächenrauigkeit mit zunehmender Al-Dosis für alle ausgeheilten Proben. Die Zunahme der Rauigkeit hängt hingegen stark vom verwendeten Ausheilprozess ab. Die größten rms-Werte, bis zu 13 nm für Aluminium-Implantationen von $1,3 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-2}$, zeigt das Lampensystem in Kombination mit der Graphitbox. In diesem System kann Silicium ungehindert von der Oberfläche abdampfen. Das Lampensystem mit der SiC-beschichteten Box zeigt hingegen die geringsten Oberflächenrauigkeiten. Bei dieser Kombination wird durch das Verdampfen des Siliciums von der Box eine Degradation der Scheibenoberfläche weitgehend vermieden. Die Ergebnisse des Vertikalofens sind besser als die des Lampensystems mit Graphitbox, allerdings noch schlechter als die der SiC-beschichteten Box. Die hier verwendete Silanmenge von 1,5 sccm während des Ausheilvorgangs ist somit noch zu gering. Eine Erhöhung der Silanmenge sollte eine verbesserte Oberfläche zeigen.

Um den erreichten Schichtwiderstand der bereits mit dem AFM vermessenen Proben zu bestimmen, wurden 4-Spitzen-Messungen durchgeführt. Die dazu notwendigen Metallkontakte wurden aus Al/Ti hergestellt. Abb. 6.6 zeigt die Ergebnisse für die verschiedenen Ausheilbedingungen.

Deutlich zu erkennen ist der Einfluss der hier getesteten Systeme. Der Schichtwiderstand ist im Lampensystem abhängig von der verwendeten Box (Graphitbox oder SiC-beschichtete Graphitbox). Er nimmt mit zunehmender Implantationsdosis ab und liegt bei Verwendung der

SiC-beschichteten Graphitbox zwischen $165 \text{ k}\Omega/\square$ für Al-Implantationen von $1,2 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ und $50 \text{ k}\Omega/\square$ für Al-Implantationen von $1,3 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-2}$. Bei der Verwendung des Lampensystems in Kombination mit der reinen Graphitbox sinkt der Schichtwiderstand um ca. 50 % für Al-Implantationen größer als $2,5 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}$. Dies liegt an der im Inneren der Graphitbox herrschenden höheren Temperatur verglichen mit der beschichteten Box, hervorgerufen durch eine größere Absorption der Lampenstrahlung. Die Proben, die im Vertikalofen ausgeheilt wurden, zeigen die geringsten gemessenen Schichtwiderstände. Diese liegen zwischen $110 \text{ k}\Omega/\square$ für Al-Implantationen von $1,2 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ und $40 \text{ k}\Omega/\square$ für Al-Implantationen von $1,2 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}$. Dies ist auf die längere Ausheildauer von 30 min im Gegensatz zum Lampensystem mit jeweils 5 min zurückzuführen.

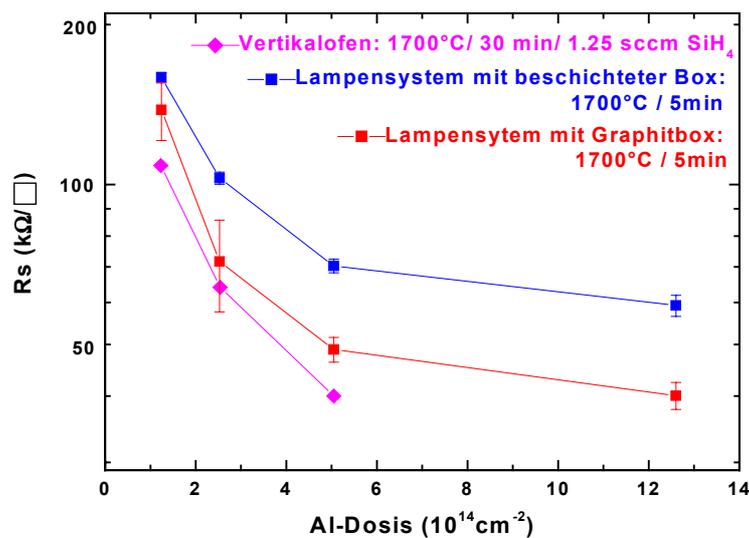


Abb. 6.6: Schichtwiderstand für Aluminium implantierte und ausgeheilte Proben.

Als Bauelemente zum Testen der p-Dotierung wurden sowohl pn-Dioden als auch Schottkydioden mit Al-implantierter Randfeldbegrenzung erfolgreich hergestellt.

6.2.4. Experimentelle Demonstration eines bipolaren Hochspannungsschalters mit beidseitig gesteuerten Emitterstrukturen

(Thomas Rotter)

Bipolare Leistungshalbleiterbauelemente mit hoher Spannungsfestigkeit (Thyristoren, GTOs, IGBTs) stellen in ihrer konstruktiven Auslegung immer ein Kompromiss zwischen niedrigem Spannungsabfall im eingeschalteten Zustand einerseits und niedrigen Schaltverlusten andererseits dar. „Kompromisslose“ Leistungshalbleiter, bei denen die Emittereigenschaften elektrisch steuerbar und die damit unterschiedlichen Betriebsbedingungen jeweils optimal anpassbar sind, wurden zwar vorgeschlagen, bisher jedoch nur durch numerische Simulation untersucht. Eine experimentelle Realisierung der vertikal stromführenden Strukturen scheiterte bisher daran, dass die nötige Herstellungstechnologie extrem aufwendig ist. Ziel des vorliegenden Forschungsprojektes ist die Herstellung von lateral stromführenden, hochsperrenden, bipolaren Leistungshalbleitern mit beidseitig steuerbaren Emitterstrukturen sowohl zur experimentellen Verifikation des vorgeschlagenen neuen Bauelementtyps, als auch zur experimentellen Untersuchung seiner Anwendungsmöglichkeiten. Die konkrete, neuartige Bauelementstruktur kann unter ausschließlicher Benutzung eines in Forschungsinstituten und bei industriellen IC-Herstellern vorhandenen Herstellungsprozesses realisiert werden. Der Auf-

wand zur Herstellung bleibt damit in einem vertretbaren Rahmen. Darüber hinaus ist die von uns vorgeschlagene Bauelementstruktur zur Integration in sogenannten Smart-Power ICs geeignet, die im Bereich kleiner und mittlerer Leistung bevorzugt zum Einsatz kommen.

Zur Realisierung der lateralen Hochvoltbauelemente mit einer Spannungsfestigkeit über ca. 600 V ist eine dielektrisch isolierte Hochvolt CMOS-Technologie (Spannungsfestigkeit bis ca. 150 V) vorgesehen. Um die wesentlich höhere Zielspannungsfestigkeit zu erreichen, wird nach Abschluss des gesamten Silicium-Scheibenprozesses das Siliciummaterial der Si/SiO₂/Si-Scheibe aus Silicium unterhalb des aktiven Bauelementbereichs entfernt und durch einen Isolator ersetzt. Dies kann dadurch geschehen, dass in einem Scheiben-Transfer-Verfahren die Substrat-Scheibe vollständig entfernt und z.B. durch eine Glasscheibe ersetzt wird. Hierzu geeignete Verfahren wurden im Fraunhofer Institut für Zuverlässigkeit und Mikrointegration (FhG-IZM München) entwickelt, mit dem wir in dieser Sache zusammenarbeiten. Eine Alternative hierzu besteht darin, dass das Siliciumsubstrat jeweils nur unter dem elektrisch aktiven Bereich von Hochvolt-Bauelementen mit einer KOH-Ätzung weggeätzt wird und der entstandene Hohlraum durch einen Isolator, z.B. Epoxidharz aufgefüllt wird. Entsprechende Versuche werden am LEB durchgeführt.

Die erste Phase des Projektes war bestimmt durch ausführliche, z.T. 3-dimensionale Prozess- und Devicesimulationen zur Dimensionierung des neuartigen Hochvolt-Bauelementtyps und den erwarteten elektrischen Eigenschaften. Parallel hierzu wurden in einem Grundlagenversuch auf „Direct-Wafer“-gebondeten Si/SiO₂/Si-Scheiben pn-Dioden als Grundstruktur der hochsperrenden Bauelemente hergestellt und danach die Silicium-Substratscheibe in einem Schicht-Transfer-Verfahren durch eine Glasscheibe ersetzt. Der Versuch sollte die grundsätzliche Funktionsfähigkeit des vorgeschlagenen neuartigen Bauelementtyps experimentell demonstrieren. Die Durchführung des Schichttransfer-Prozesses erfolgte dankenswerterweise im FhG-IZM München (Dipl.-Phys. C. Landesberger). Die Dimensionierung der bei dem Versuch verwendeten Si/SiO₂/Si-Scheiben war so, dass mit einer klassischen Bauelementstruktur eine Durchbruchspannung von maximal ca. 600 V möglich ist. Nach Durchführung des Schichttransfer-Prozesses konnte bei diesen Demonstratordioden in guter Übereinstimmung mit den Ergebnissen der Vorabsimulation Durchbruchspannungen bis zu maximal $V_{BR} = 1400$ V für eine Driftzonenlänge von 200 µm gemessen werden. Die Durchbruchspannung skalierte linear mit der Driftzonenlänge, was auf einen trapezförmigen Verlauf der elektrischen Feldstärke zurückzuführen ist.

Nach dem positiven Ergebnis der ersten Phase wurde ein Chip mit Teststrukturbauelementen zur Prozessierung in einem industriellen Hochvolt-CMOS SOI-Prozesses entworfen und entsprechende Scheiben im Rahmen einer Multi Project Charge hergestellt. Erste Messungen an den noch untransferierten Si/SiO₂/Si-Scheiben zeigten die grundsätzliche Funktionsfähigkeit der Teststrukturen. Mit Ausnahme der Sperrspannungen der Hochvolt-Bauelemente waren alle Messergebnisse quantitativ im erwarteten Bereich. Die Sperrspannung der Hochvolt-Bauelemente war durch das noch nicht transferierte Substrat auf ca. 190 V begrenzt. Erste Messungen des Schaltverhaltens an Thyristorstrukturen mit beidseitig steuerbaren Emittern zeigten schon bei 100 V Lastkreisspannung die erwartete Abhängigkeit von der Art der Ansteuerung der Emitter. Es wurden verschiedene Ansteuerkonzepte schaltungstechnisch realisiert und miteinander verglichen. Durch den gezielten Eingriff auf die Emittereffizienz auf beiden Seiten kann mit Hilfe von MOS-gesteuerten Kurzschlüssen der Abschaltvorgang zeitlich deutlich verkürzt werden, insbesondere die bei bipolaren Bauelementen entscheidende Tail-Phase. Damit geht einher, dass die im Bauelement dissipierte Abschaltenergie sich verringert. Zum Beispiel beträgt die gemessene Abschaltverlustenergie E_{off} bei konventioneller, kathodenseitiger Ansteuerung 7,5 µJ (ohmsche Last 470 Ω, Lastkreisspannung 100 V) und wird bei anodenseitiger Ansteuerung auf 2,5 µJ und bei gleichzeitiger, anoden- und kathodenseitiger Ansteuerung auf 1,3 µJ reduziert. Dadurch wird einerseits die thermische Belas-

tung des Bauelements gesenkt, andererseits sind aber auch höhere Betriebsfrequenzen möglich.

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

(Jovan Hadzi-Vukovic)

Im Rahmen eines BMBF Verbundvorhabens "Systemintegration für neue automobile Bordnetze , SINA42 V" wurden die Grundlagen für die Konzeption, Erstellung und Anwendung von komplexen integrierten Systemen und Modulen für das zukünftige 42 V-Kfz-Bordnetz von Personenkraftfahrzeugen erarbeitet. Ein Kraftfahrzeughersteller, ein Hersteller für elektrische Hilfsantriebe, ein Halbleiterhersteller sowie zwei Hochschulinstitute, darunter der LEB, arbeiteten in diesem Projekt gemeinsam an der Realisierung eines Demonstrators für einen typischen Hilfsantrieb zum Einsatz im 42 V-Kfz-Bordnetz. Aufgabe des Halbleiterherstellers war die Entwicklung und Bereitstellung einer Herstellungstechnologie für monolithisch integrierte Smart-Power Schaltkreise, die den neuen Anforderungen des 42 V-Kfz-Bordnetzes gerecht werden, sowie die Realisierung eines Demonstrator-ICs. Die Fragestellung, ob diese Anforderungen durch Weiterentwicklung der für den Einsatz im heutigen 12 V-Kfz-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, wurde im Auftrag und in Zusammenarbeit mit dem Halbleiterhersteller am LEB untersucht.

Schwerpunkt der Arbeiten des LEB war die Durchführung geeigneter Prozess- und Devicesimulationen des Hochvolt n-Kanal- (DMOS-) und p-Kanaltransistors sowie der Abgleich mit entsprechenden experimentellen Ergebnissen. Messungen des Ausbreitungswiderstandes (SR, englisch: spreading resistance) und Kapazitäts-Spannungs-Messungen (C(V)) zur experimentellen Bestimmung der kritischen Dotierungsprofile wurden am LEB durchgeführt.

Wesentliche Ergebnisse:

1. Gekoppelte Prozess- und Devicesimulation des 50 V-Standard-DMOS-Transistors ergaben gute Übereinstimmung mit den elektrischen Kenndaten dieses gut bekannten Bauelementes, ohne dass eine Anpassung der Technologie- und Layout-Daten oder Parameter der physikalischen Modelle erforderlich waren.
2. Zum Erreichen der erhöhten Spannungsfestigkeit des DMOS-Transistors für 42 V-Kfz-Bordnetz-Anwendungen sind keine Änderung des Herstellungsprozesses nötig, das Ziel ist durch Layoutänderungen erreichbar.
3. Die Simulationsergebnisse für einen, den erhöhten Spannungsanforderungen genügenden HV-PMOS-Transistor befinden sich in Übereinstimmung mit den experimentellen Ergebnissen. Letztere sind im Zielbereich, im Vergleich zum DMOS unterliegen seine wichtigsten Kenndaten jedoch grundsätzlich stärker Schwankungen des Prozesses und der Ausgangsmaterialdaten.
4. Es wurde eine neuartige Struktur einer hochsperrenden "Klemmdiode" zum Schutz der Leistungstransistoren vorgeschlagen, mit deutlichen Vorteilen gegenüber den bisher bekannten Strukturen. In detaillierten Device- und Prozesssimulationen wurde das Layout von ersten Bauelementvarianten zur Realisierung entwickelt. Entsprechende Bauelemente und Teststrukturen wurden prozessiert und ausgewertet. Die erwartete Grundfunktionsfähigkeit wurde experimentell bestätigt. Zur Erreichung der genauen Zielwerte der Diodeneigenschaften ist jedoch noch ein Redesign erforderlich.

6.2.6. Zerstörungsfreie Charakterisierung von ferroelektrischen und hoch-dielektrischen Dünnschichten

(Christian Schmidt)

Ziel des Projektes

Das Ziel des Projektes ist die Charakterisierung ferroelektrischer und hoch-dielektrischer Dünnschichten mittels verschiedener Messverfahren, um die Zusammenhänge der spezifischen Materialeigenschaften in Abhängigkeit der Herstellungs- und Prozessparameter zu untersuchen und die Messprozeduren zu optimieren.

Ergebnisse

Im Mittelpunkt der Versuche stand das Material Strontium-Bismut-Tantalat (SBT), das durch chemische Dampfphasenabscheidung unter Verwendung von metallorganischen Prekursor-Verbindungen hergestellt wurde (MOCVD). Die SBT-Schichten wurden auf Siliciumscheiben mit 200 mm Durchmesser abgeschieden, die vorher mit einer ca. 50-100 nm dicken Platinschicht versehen worden sind. Diese Schichten wurden nicht nur als Testschichten für die Untersuchung der Verwendbarkeit der eingesetzten Messmethoden benutzt, sondern auch für die Untersuchung der *in-situ*-Fähigkeiten der Ellipsometrie.

Optische Auswertung der Schichteigenschaften

Die optischen Eigenschaften der Schichten wurden mittels spektroskopischer Ellipsometrie gemessen. Die realen (n) und die imaginären (k) Teile des Brechungsindex von SBT wurden mit Hilfe der Cauchy Dispersionsgleichungen errechnet:

$$n = A + \frac{10^6 B}{\lambda^2} + \frac{10^{12} C}{\lambda^4},$$

$$k = D + \frac{10^6 E}{\lambda^2} + \frac{10^{12} F}{\lambda^4},$$

λ ist hierbei die Wellenlänge und A, B, C, D, E und F sind die Cauchy Parameter.

Zum Vergleich wurde die optische Modellierung der SBT-Proben durch den Gebrauch eines erweiterten parametrischen Oszillatormodells, mit dem die dielektrische Funktion von SBT beschrieben wird, durchgeführt. Das Modell wurde von Adachi (Phys. Rev. B 35 (1987) S. 7454-7463) veröffentlicht und erfolgreich von Bahng et al. (Appl. Phys. Lett. 79 (2001) S. 1664) bei per Impuls-Laser aufgetragenen SBT-Filmen mit verschiedenen Bi/Sr-Verhältnissen angewendet. Das Modell berücksichtigt nur den direkten Übergang beim Bandabstand:

$$\epsilon(E) = \frac{A_0}{E_0^{1.5}} \frac{2 - (1 + \chi_0)^{0.5} - (1 - \chi_0)^{0.5}}{\chi_0^2},$$

$\chi_0 = (E+i\Gamma)/E_0$. A_0 , E_0 , Γ sind hier die Amplitude, die Übergangsenergie beziehungsweise der Verbreiterungsparameter. Das Adachi-Modell liefert zusätzliche Informationen wie den Bandabstand oder den Verbreiterungsparameter (Tabelle 6.2). Es besitzt nicht nur Gültigkeit unterhalb des Bandabstands wie im Fall des Cauchy-Modells, sondern auch oberhalb dessen, so dass die Ergebnisse für den komplexen Brechungsindex in einem größeren Spektralbereich errechnet werden konnten.

Tabelle 6.2: Durch das Adachi-Modell berechnete Parameter.

Probe	E_0 (eV)	A_0 (eV)	Γ	σ	d_{SE} (nm)
411b	4,32 \pm 0,04	145,7 \pm 3,5	0,153 \pm 0,021	0,0019	75,4 \pm 0,7
418a	3,94 \pm 0,04	122,2 \pm 4,2	0,188 \pm 0,020	0,0014	59,8 \pm 0,9
418b	4,30 \pm 0,07	154,4 \pm 10,5	0,048 \pm 0,028	0,0081	135,1 \pm 5,4
418c	3,82 \pm 0,03	127,2 \pm 2,3	0,138 \pm 0,020	0,0022	79,0 \pm 0,8
422b	4,83 \pm 0,21	165,9 \pm 22,9	0,063 \pm 0,053	0,0100	158,3 \pm 10,6
621	4,84 \pm 0,13	155,4 \pm 14,8	0,197 \pm 0,046	0,0091	143,6 \pm 7,8
827a	4,48 \pm 0,07	107,5 \pm 5,2	0,178 \pm 0,028	0,0096	185,3 \pm 7,5
913c	4,02 \pm 0,02	126,4 \pm 2,5	0,197 \pm 0,008	0,0021	40,3 \pm 0,4
914b	4,00 \pm 0,01	120,3 \pm 1,0	0,180 \pm 0,007	0,0019	37,8 \pm 0,2
918b	4,12 \pm 0,01	129,7 \pm 1,6	0,148 \pm 0,010	0,0013	43,9 \pm 0,3

Der Verhältnis zwischen Sr, Bi, Ta, O, Pt, Si sowie eventuellen anderen Kontaminationselementen und deren Tiefenverteilung (bedingt durch die Schichtstruktur) wurde mit Rutherford Rückstreu-spektrometrie (RBS) ermittelt. Für die Bestimmung der verschiedenen Kristallphasen des SBT in den abgeschiedenen Schichten wurde Röntgenbeugung (XRD) benutzt. Die von der Ellipsometrie ermittelte Schichtdicke wurde bei der Auswertung der RBS-Messungen verwendet.

Mit Ellipsometrie können nicht nur die Schichtdicke und die optischen Eigenschaften ermittelt werden, sondern mit einem geeigneten optischen Modell auch zahlreiche Materialeigenschaften, wie Korngröße, Oberflächenrauigkeit, Grenzschichten oder der Bandabstand. Durch den Vergleich mit den Ergebnissen der RBS- und XRD-Messungen wurde der Zusammenhang zwischen den optischen Eigenschaften und der Mikrostruktur bestimmt. Unter anderem haben wir gezeigt, dass es einen linearen Zusammenhang zwischen dem Brechungsindex n und den Bi/Sr Verhältnis gibt.

Stellvertretend für die anderen Ergebnisse ist dieses Ergebnis in Abb. 6.7 gezeigt. Hier ist die Korrelation zwischen dem Brechungsindex n für eine Wellenlänge von 630 nm (HeNe-Laser) in Abhängigkeit von dem Bi-Anteil der SBT-Schicht aufgetragen. Der Brechungsindex wurde mittels spektroskopischer Ellipsometrie bestimmt, der Bi-Gehalt aus den RBS-Messungen ermittelt.

Eine Aussage der Untersuchungen ist, dass die Ellipsometrie mit ihren Eigenschaften Zerstörungsfreiheit, Sensitivität und Geschwindigkeit unter Verwendung eines geeigneten Modells zahlreiche Materialeigenschaften bestimmen kann. Ebenso ist die *in-situ* Anwendung der Ellipsometrie für ferroelektrische und hoch-dielektrische Dünnschichten möglich. Während der *in-situ* Messung können z.B. die Veränderung des Bi/Sr Verhältnisses oder der Korngröße gemessen werden, und die Prozessparameter dementsprechend geregelt werden.

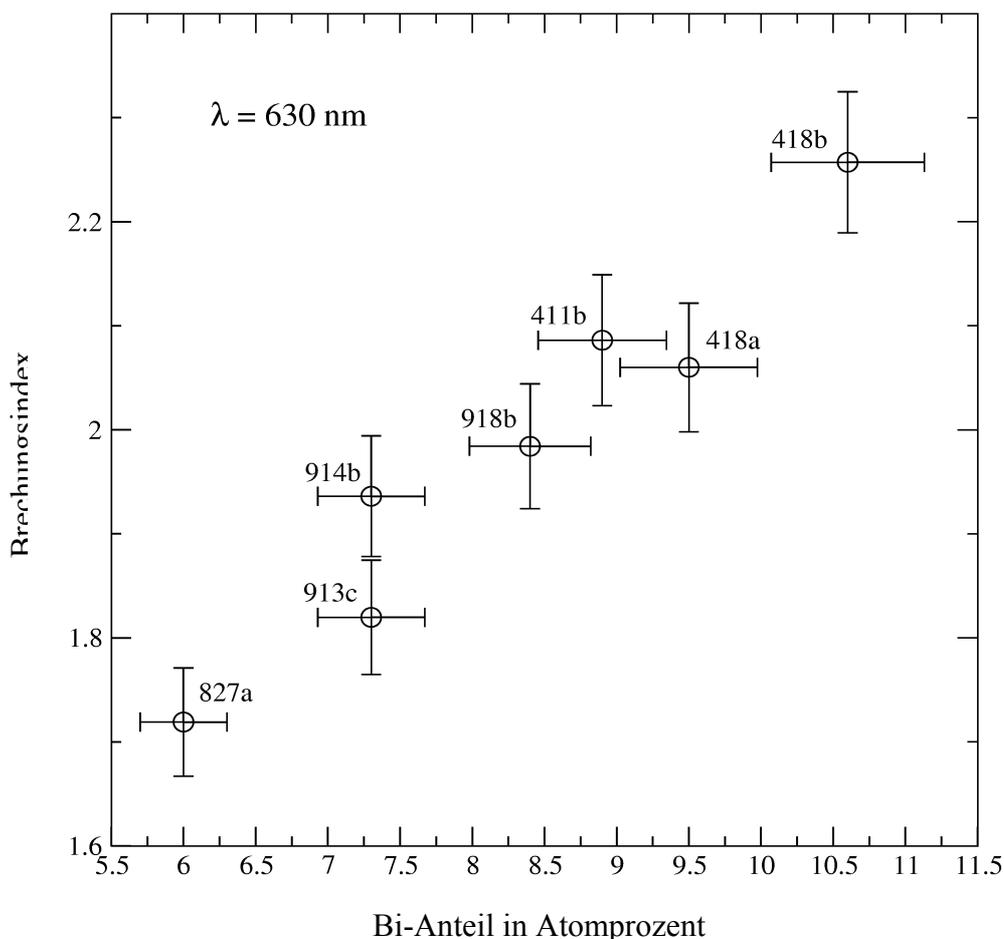


Abb. 6.7: Korrelation zwischen Bi-Anteil und Brechungsindex n bei einer Wellenlänge von 630 nm

6.2.7. Verwendung von dünnen Aluminiumnitrid-Filmen zur Herstellung eines mikromechanischen Ultraschall-Flüssigkeitszerstäubers

(Nedyu Yassenov)

Einführung

Die Zerstäubung pharmazeutischer Medien spielt eine besondere Rolle in der Behandlung verschiedener Krankheiten. Das Prinzip der Ultraschallzerstäubung wird genutzt, um mechanische Schwingungen zu erzeugen, die zur Vernebelung einer zu zerstäubenden Inhalationsflüssigkeit mit sehr kleinen Tröpfchen führt. Diese ihrerseits bilden ein Aerosol, das tief in die Atemwege eindringt. Je kleiner die Tröpfchen, desto besser werden diese von der Lunge aufgenommen, d.h. die Effektivität steigt.

Im Rahmen dieser Arbeit wird die Möglichkeit zur Herstellung von einer piezoelektrisch angetriebenen dünnen Silicium-Membran als Flüssigkeitszerstäuber genutzt. Die Untersuchungen konzentrieren sich auf piezoelektrisches Aluminiumnitrid (AlN), das in den letzten Jahren wegen seiner exzellenten Eigenschaften die Aufmerksamkeit vieler Wissenschaftler anzieht. Es besitzt eine hexagonale Wurtzit-Kristallstruktur der Raumgruppe $P6_3mc(186)$ mit einer Gitterkonstante auf der c -Achse von $4,982 \text{ \AA}$, einem direktem Bandabstand von $6,3 \text{ eV}$, einer elektrischen Leitfähigkeit von $1,10^{16} \text{ \Omega cm}$ und einer Wärmeleitfähigkeit von 2 W/Kcm . AlN hat auch befriedigende elektroakustische Eigenschaften, wie z.B. einen moderaten Kopp-

lungsfaktor, bekannte Steifigkeit und piezo- und dielektrische Tensoren. Zusätzlich dazu ist das AlN mit der planaren IC-Technologie CMOS kompatibel, chemisch stabil usw.

Reaktives Sputtern mit einem reinen Aluminiumtarget in stickstoffhaltiger Atmosphäre kann dünne polykristalline AlN-Filme auf unterschiedliche Substrate und bei moderaten Temperaturen produzieren. Diese besitzen eine perfekte *c*-Achsenorientierung und piezoelektrische Aktivität. Für die AlN-Abscheidungen wurde gepulste Gleichspannungskathodenzerstäubung angewendet.

Experimentelles

Die Filme wurden mittels reaktiven Magnetronsputterns eines reinen Aluminiumtargets im "puls dc mode" (Trikon Technologies Inc. Standard Prozess, Sigma fxP Modul, (R. Jakkaraju, G. Henn, C. Shearer, M. Harris, N. Rimmer and P. Rich, *Microelectronic Engineering*, vol. 70, 2-4, Nov. 2003, 566-570)) in gemischter Stickstoff- und Argon-Atmosphäre auf oxidierte Siliciumscheiben abgeschieden. Diese Variante des Sputterprozesses wurde bevorzugt, um die Bildung von isolierendem Material auf der Targetoberfläche zu vermeiden, was zur Funkenbildung führen könnte. Vor dem eigentlichen Sputterschritt wurde das Target durch einen Vorsputterschritt gereinigt und konditioniert. Die Funktionsschicht wurde auf 200 nm dicke polykristalline Mo- und W-Elektroden abgeschieden, um die gewünschte (002)-Orientierung der Mikrostruktur zu erhalten. Kombinierte trocken- und nasschemische Prozessschritte wurden verwendet, um die Teststrukturen zu bilden. Silberleitkleber wurde zum Definieren der Kontaktpads auf der Vorderseite aufgetragen.

Ergebnisse

Die Filmtextur wurde mittels eines Röntgendiffraktometers mit Cu-Quelle ($K\alpha$ -Linie) in Messschritten von $0,2^\circ$ und bei einer Scan-Rate von $0,5^\circ/\text{min}$ untersucht (Abb. 6.8). Diese wurde an einer $1,5\ \mu\text{m}$ dicken piezoelektrischen AlN-Schicht getestet, die bei 400°C auf eine mit TiMo- und TiW-Elektroden versehene Siliciumscheibe abgeschieden wurde. Die Halbwertsbreiten (FWHM, englisch: full width at half maximum) der Elektroden und der AlN-Schicht sind in Tabelle 6.3 vorgestellt.

Tabelle 6.3: FWHM-Werte, erzielt auf verschiedenen Elektroden entlang der Gitterfehlanpassung zwischen dem AlN-Film und der Elektrode.

	Ti/Mo	Ti/W
Elektrode	$1,8^\circ$	$2,5^\circ$
AlN(002)	$1,4^\circ$	$1,5^\circ$

Um die Filmstöchiometrie zu ermitteln, wurden Röntgenphotoelektronenspektroskopie-Messungen (XPS) durchgeführt. Für die Schichtzusammensetzung ergab sich ein Verhältnis von 54% Al zu 46% N (Abb. 6.9).

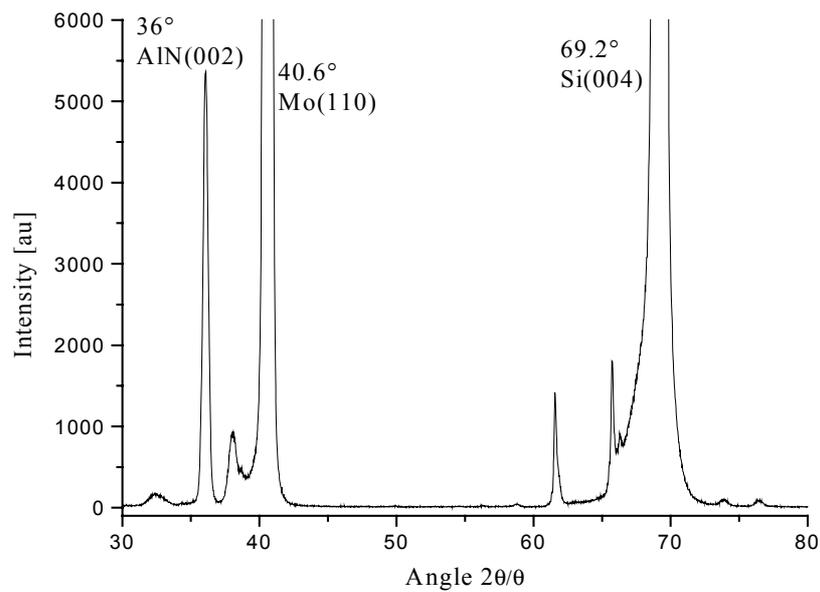


Abb. 6.8: θ - 2θ -Spektrum eines AlN-Films.

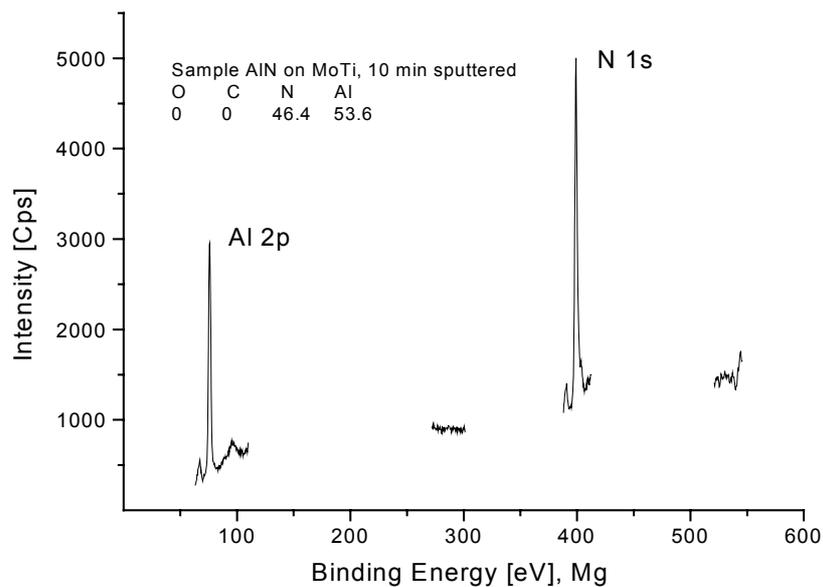


Abb. 6.9: XPS-Spektrum eines AlN-Films.

Um herauszufinden, inwieweit die Sputterbedingungen und das Material der unteren Elektrode das Wachstum der Mikrostruktur beeinflussen, kam Transmissionselektronenmikroskopie (TEM) zum Einsatz. (Abb. 6.10). Es wurde keine amorphe Phase oder Zwischenschicht festgestellt. Rasterkraftmikroskopmessungen (AFM) haben eine Rauigkeit von 8nm gezeigt (Abb. 6.11). Die hergestellten Teststrukturen wurden mittels Impedanzspektroskopie als Funktion der Frequenz charakterisiert. Die erwarteten hohen Werte der Resonanzfrequenz über 70MHz wurden bestätigt.

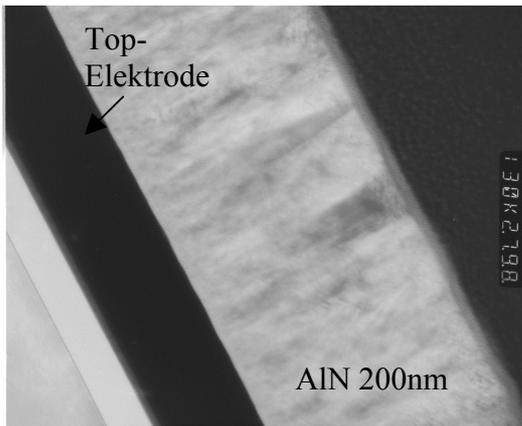


Abb. 6.10: TEM Querschnittsaufnahme eines 200nm dicken AlN-Films.

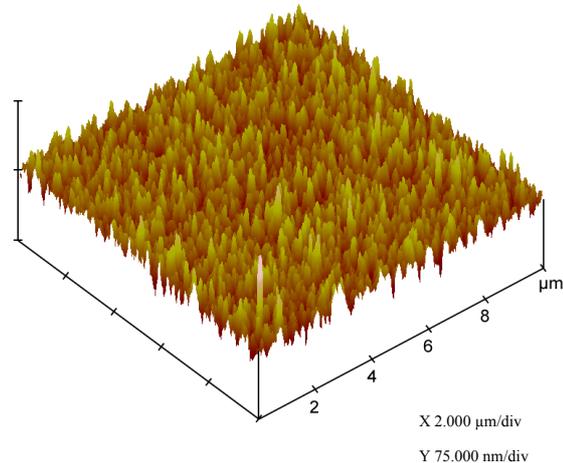


Abb. 6.11: AFM Bild der Oberfläche eines 1,5 µm dicken AlN-Films.

Für die ersten Experimente (als noch kein AlN zur Verfügung stand) wurde eine Si-Membran mit einem käuflichen PZT Plättchen kombiniert und die Zerstäubung mittels Phasen-Doppler-Anemometrie (PDA) untersucht. Messungen der Tropfenverteilung von "Mucosolvan" sind auf Abb. 6.12 präsentiert. Es wurden Messungen in Serien von 1000 Tropfen durchgeführt. Die detektierten Tröpfchen bewegten sich senkrecht von der Membranoberfläche weg. Es wurden ideal sphärische Geometrien gemessen. Wie auch in früheren Arbeiten berichtet, wurden relativ niedrige Tropfengeschwindigkeiten bestätigt (ca. 0,2 m/s) (R. Paneva, Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 1996). Die durchschnittliche Tropfengröße war, unabhängig von der Membrangeometrie, um die 5 µm für die meisten detektierten Tröpfchen.

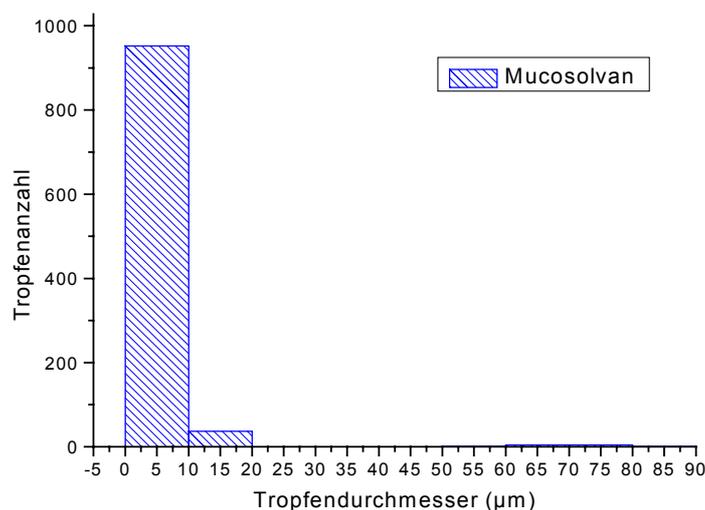


Abb. 6.12: Tropfenverteilungsspektrum des untersuchten Demonstrators.

Zusammenfassung

Es wurden die morphologischen und die elektrischen Eigenschaften einer AlN-Schicht auf Metallelektroden untersucht. Die Filme wurden mittels reaktiver Kathodenzerstäubung hergestellt. Die analytischen Untersuchungen haben gezeigt, dass die AlN-Textur sehr stark von der Struktur der darunter liegenden Metallelektrode beeinflusst wird. Basierend auf XPS-, XRD-

und TEM-Analysen kann man behaupten, dass die untersuchten Filme vielversprechende Eigenschaften bezüglich der Verwendung als Antriebsschicht bei der Herstellung des Flüssigkeitszerstäubers aufweisen. Weitere elektrische Messungen, die auf die Bestimmung der Piezokonstanten des Aluminiumnitrids zielen, sind in Arbeit.

Danksagung

Diese Arbeit wurde von der Universität Trento im Rahmen des PAT/CNR Projekts Research and Formation in Microsystems unterstützt.

6.2.8. Optimierung eines Systems zur atomaren Schichtabscheidung aus der Dampfphase

Mit der Einführung der 90 nm-Technologie und darüber hinaus werden in Grabenkondensatoren für Speicherzellen alternative Gatedielektrika wie Al_2O_3 benötigt. Die besonderen Anforderungen wie z.B. eine gute Kantenbedeckung bei einem Aspektverhältnis von 60:1 oder die hohe thermische Stabilität können dabei aus momentaner Sicht nur durch Abscheidung mittels ALCVD (englisch: Atomic Layer Chemical Vapor Deposition) erfüllt werden. Darüber hinaus ist das ALCVD-Verfahren für eine Reihe weiterer Aspekte der Höchstintegration interessant.

Im Projekt HALE & RAPID werden Geräte und Prozesse für die ALCVD-Abscheidung von Al_2O_3 und Ta_2O_5 evaluiert und optimiert. Der Einsatz von Ta_2O_5 ist vor allem für monolithisch integrierte Metall-Isolator-Metall-Kondensatoren in Hochfrequenzanwendungen vorteilhaft. Ziele der Arbeiten sind die Charakterisierung der Schichten und Optimierung der Parameter in Hinblick auf die Zielapplikationen, der Nachweis der Produktionsfähigkeit anhand von Demonstratoren, Überlegungen zu Durchsatz- und Kostenoptimierung, der Vergleich mit alternativen Abscheideverfahren sowie die Anpassung von Verfahren zur *in situ*-Kammerreinigung.

Der LEB ist am Projekt HALE & RAPID als Unterauftragnehmer des im Konsortium eingebundenen Fraunhofer IISB beteiligt. Weitere Partner sind ASM als Gerätehersteller, Infineon Technologies als Nutzer sowie Austriamicrosystems und Motorola.

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 in den Jahren 2002 und 2003 am LEB bearbeiteten Förderprojekte.

„Systemintegration für neue automobile Bordnetze, SINA 42 V“, Verbundprojekt, LEB: Unterauftragnehmer eines Halbleiterherstellers, Träger: Bundesministerium für Forschung und Bildung (BMBF), 1.1.2002 - 31.12.2003

„Experimentelle Demonstration eines bipolaren Hochspannungsschalters mit beidseitig gesteuerten Emittierstrukturen“, Träger: Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG), 1.2.2002 - 31.1.2004, AZ: STO 451/1

„Zerstörungsfreie Charakterisierung von ferroelektrischen und hoch-dielektrischen Dünnschichten“, Projektbezogener Personenaustausch mit Ungarn, Träger: Deutscher Akademischer Austauschdienst (DAAD)

„Herstellung von polykristallinen Silicium-Germanium-Schichten durch die Niederdruckgasphasenabscheidung“, Gemeinschaftsprojekt mit der Universität der Bundeswehr, München, Träger: Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG), 1.8.2001 - 30.6.2004, AZ: RY 1-19/1 (Lehrstuhl für Elektronische Bauelemente Erlangen-Nürnberg) bzw. EI 234/5-1 (Institut für Physik UniBW München)

„CVD-Prozesse mit neuartigen metallorganischen Precursoren zur Herstellung von hoch- ϵ Gatedielektrika und metallischen Gateelektroden zukünftiger CMOS-Generationen“, Schwerpunktprogramm: „Anorganische Materialien durch Gasphasensynthese: Interdisziplinäre Ansätze zu Entwicklung, Verständnis und Kontrolle von CVD-Verfahren“ (SPP 1119), Träger: Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG), 17.11.2003 - 1.4.2006, AZ: RY 1/21-1 und RY 1/21-2

„Modellierung und Simulation der Diffusion von Aluminium in Silicium“, Träger: Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG), 01.01.1997 - 31.07.2002, AZ: RY 1/18-3

„SiC als Halbleitermaterial: Alternative Wege in Züchtung und Dotierung“, DFG-Forschergruppe, Träger: Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG), 15.3.2002 - 14.3.2005, AZ: 476/1-1 und FR 713/3-1

„Ricerca e formatione in Microsistemi“, LEB:Unterauftragnehmer der Università degli Studi di Trento, Träger: Provincia Autonoma di Trento und Consiglio Nazionale delle Ricerche (PAT/CNR), 11.4.2001 - 30.6.2004, AZ.: 29360, reg. 135

„Technologie und Architektur mikroelektronischer Schaltungen“, Multimedia in der Lehre 2002/2003, Virtuelle Hochschule Bayern (vhb), Träger: Bayerisches Staatsministerium für Wissenschaft, Forschung und Kunst, 01.01.2002 - 30.06.2003, AZ: 02-03-14/Rys1

„High Throughput Atomic Layer CVD Batch Equipment using Remote Plasma Enhanced Processing and In-Situ Chamber Chain“, LEB: Unterauftragnehmer des Fraunhofer Instituts für Integrierte Systeme und Bauelementetechnologie, Erlangen, 1.9.2002 - 31.8.2004

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 Systeme und 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 Hugentottenplatz) 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.

