



Interdisziplinäres Zentrum für Materialwissenschaften

Evaluationsreport 2010–2015

Jahresbericht 2015



Martin-Luther-Universität
Halle–Wittenberg



.: Nanotechnikum Weinberg :.

**Interdisziplinäres Zentrum
für Materialwissenschaften**

Evaluationsreport 2010–2015

Jahresbericht 2015



**Martin-Luther-Universität
Halle–Wittenberg**

Interdisziplinäres Zentrum für Materialwissenschaften
– Nanotechnikum Weinberg –
☛ Heinrich-Damerow-Straße 4
Martin-Luther-Universität Halle–Wittenberg
06120 Halle

 www.cmat.uni-halle.de

 info@cmat.uni-halle.de

☎ 0345-55 25 471

Redaktion: H. S. Leipner
© All rights reserved CMAT Halle 2016

Einleitung

Das Interdisziplinäre Zentrum für Materialwissenschaften der Martin-Luther-Universität Halle–Wittenberg (IZM) besteht mit seiner neuen Satzung seit dem Jahr 2010. Diese Satzung beinhaltet auch eine regelmäßige Evaluation des Zentrums, die durch externe Gutachter stattfindet. Seit dem Jahr 2010 hat das IZM in jedem Jahr einen Jahresbericht herausgegeben, der einen Überblick über die verschiedenen Zusammenarbeiten des IZM sowie die Nutzung des Reinraums gibt, der durch das IZM für die Universität betrieben wird. Die im Jahr 2016 durchzuführende Evaluation betrifft die Arbeit des IZM seit Inkrafttreten der neuen Satzung. Aus diesem Grunde wird der in diesem Jahr anzufertigende Jahresbericht für das Jahr 2015 durch einen Evaluations- und Jahresbericht ersetzt. Er beinhaltet neben einem Überblick über die Kooperationen des letzten Jahres eine Liste von Highlights aus den letzten Jahren. Außerdem erstrecken sich die tabellarischen Bereiche (Drittmittel, Kooperationspartner) in diesem Fall nicht nur über das letzte Jahr sondern über die gesamte Evaluationsperiode. Für die Evaluation wird der Bericht durch die Jahresberichte der vergangenen Jahre ergänzt und ist im Zusammenhang zu sehen. So sind die wesentlichen Informationen im folgenden Evaluationsbericht für die Jahre 2010–2015 zusammengefasst, für Details der Zusammenarbeiten kann auf die jeweiligen Jahresberichte zurückgegriffen werden.

Georg Schmidt

Inhaltsverzeichnis

Das Interdisziplinäre Zentrum für Materialwissenschaften der Martin-Luther-Universität Halle–Wittenberg	7
Personal	10
Kooperationen	11
Drittmittel	13
Ausstattungsliste des Nanotechnikums Weinberg	19
Forschungsschwerpunkte und -Highlights der Kooperationen	25
Forschungsergebnisse 2015	37
Assessment of physiological stability of a new thiolated polysaccharide multilayer model	37
Reduced inflammatory responses to biomaterials	39
Nanostructures modified with polyelectrolyte multilayers	41
Development of anti-inflammatory surfaces using nanotopographies and glycosaminoglycans	43
Size, shape and surface morphology of starch granules	45
Keimbildung an der Phasengrenze zwischen übersättigter Lösung und externem Saatmaterial	47
Herstellung und Charakterisierung von Superkondensatorfolien mittels Linearbeschichtung	49
Vergleich verschiedener Kontaktierungsverfahren für Superkondensatoren	51
Entwicklung eines BaTiO ₃ /Polymer-Komposites als neuartiges Kondensatormaterial	53
Bottom-up-Synthese hierarchisch strukturierter Elektroden mit hoher elektrokatalytischer Aktivität	55
Strukturierte Rückkontakte für anorganische Dünnschichtsolarzellen	57
Resistives Schalten und spannungsgesteuerte Modulation von Tunnelbarrieren	61
Unidirektionaler Wärmetransfer durch Spinwellen in Yttriumeisengranat	63
Morphologie und magnetische Eigenschaften dünner Ferritpinell	65
Oberflächenverstärkter Raman-Effekt (SERS) in plasmonischen Nanoantennenketten	67
Charakterisierung nanostrukturierter amorpher Materialien	69
Kolloid-definierte optische Strukturen mit maßgeschneiderten Streueigenschaften	71
Interferenzlithographie – Entwicklungen und Anwendungen	73
Dotierung und Porosität von Siliciumnanodrähten	75
Charakterisierung von Tunnelinjektionsnanostrukturen	77
Digitales Positronen-Lebensdauer-Spektrometer für die Untersuchung von Phasenübergängen	79
Verbesserte Tiefenauflösung der Positronenstrahltechnik mittels In-situ-Sputterabtrag der Probe	81
Optimierung der Elektronenstrahlolithographie: Herstellung photonischer Kristalle	83
Untersuchung gebundenen Wasserstoffs in a-SiN-Passivierungsschichten	85
GLAD auf mittels Laserinterferenzlithographie und RIE-Ätzen vorstrukturierten Si-Substraten	87
Publikationen des IZM 2010–2015	89
Qualifizierungsarbeiten am IZM 2010–2015	98
Eingeladene Vorträge 2010–2015	99
Mitveranstalter von Tagungen 2010–2015	100

Das Interdisziplinäre Zentrum für Materialwissenschaften der Martin-Luther-Universität Halle–Wittenberg (Nanotechnikum Weinberg)

Struktur und Aufgaben

Das Interdisziplinäre Zentrum für Materialwissenschaften (IZM) ist eine zentral geführte Institution der Martin-Luther-Universität Halle–Wittenberg. Es dient der Förderung der interdisziplinären Zusammenarbeit der verschiedenen naturwissenschaftlich-technischen Institute untereinander, aber auch mit der Medizinischen Fakultät und darüber hinaus mit außeruniversitären Einrichtungen. Die wissenschaftliche Zielsetzung umfasst dabei die Materialwissenschaften auf dem Gebiet der Physik, der Chemie bzw. der Biowissenschaften. Getragen wird das Zentrum von der Naturwissenschaftlichen Fakultät I (Biochemie/Biotechnologie, Biologie, Pharmazie), der Naturwissenschaftlichen Fakultät II (Chemie, Physik und Mathematik) sowie der Naturwissenschaftlichen Fakultät III (Agrar- und Ernährungswissenschaften, Geowissenschaften und Informatik). Damit gehört das IZM offiziell zu den interdisziplinären wissenschaftlichen Einrichtungen (IWE) der Martin-Luther-Universität Halle–Wittenberg und unterliegt einer entsprechenden Ordnung.

Eine zentrale Rolle spielt das IZM als gemeinsame Experimentierplattform und Serviceeinrichtung auf dem naturwissenschaftlichen Weinberg-Campus für die Aktivitäten innerhalb des ausgewiesenen Schwerpunktes Materialwissenschaften der Martin-Luther-Universität. Diese Plattform wird durch den Betrieb der Infrastruktur des IZM und insbesondere den Reinraum der Universität geschaffen. Satzungsgemäße zentrale Aufgabe der im Zentrum angestellten Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter ist es, den Betrieb dieser Infrastruktur sowie des Reinraums zur Unterstützung interdisziplinärer Forschung aller Fakultäten zu gewährleisten und durch Mitarbeit bei der Durchführung von Drittmittelprojekten beteiligter Hochschullehrerinnen und Hochschullehrer sowie über die Einwerbung eigener Drittmittel zur Finanzierung beizutragen.

Innerhalb des IZM sind fest angestellt: 1 habilitierter Mitarbeiter (Privatdoz Dr. H. S. Leipner) als wissenschaftlicher Geschäftsführer, 2 promovierte Mitarbeiter (Dr. F. Heyroth, Dr. B. Fuhrmann) als Leiter von Laborbereichen, 2 Diplomphysiker (F. Syrowatka, S. Schlenker) für die Projektbearbeitung bzw. technisch-wissenschaftliche Unterstützung, 1 Sekretärin (P. Schmöller) für die Projektverwaltung und Geschäftsbearbeitung.

Sitz des IZM ist seit 2007 das Nanotechnikum Weinberg als Mietobjekt der Universität innerhalb des Gebäudes des Bio–Nano-Zentrums der Technologie- und Gründerzentrum (TGZ) Halle GmbH. Hier befinden sich die zentralen Laborbereiche des IZM: Nanostrukturierung/-analytik, Elektronenmikroskopie/Spektroskopie, Positronenannihilation/Kristalldefektphysik und Lithographie/Reinraumtechnologien.

Im Zentrum der Forschungsaktivitäten des Interdisziplinären Zentrums für Materialwissenschaften stehen nanostrukturierte Materialien, die Mikro- und Nanoanalytik sowie die Realstruktur von Festkörpern, wo einerseits eigenständige Forschungsprojekte bearbeitet und andererseits Kooperationsleistungen angeboten werden. Langjährige Erfahrungen bestehen unter anderem auf dem Gebiet der Untersuchung von Defekten und Nanostrukturen in Halbleitern, Keramiken und anderen Materialien. Dazu werden verschiedene Verfahren der hochauflösenden Materialdiagnostik, insbesondere der analytischen Elektronenmikroskopie und der Positronenannihilation eingesetzt. Das IZM hat sich zum zentralen Ansprechpartner für elektronenmikroskopische Untersuchungen in materialwissenschaftlichen Fragestellungen innerhalb der Universitäten entwickelt. So werden in Kooperation mit anderen Einrichtungen technologisch hochinteressante Werkstoffe wie Biomaterialien, Polymere, Gläser, nichtkonventionelle Metalle als Volumenmaterial, Komposite oder Schichtstrukturen analysiert. Das Zentrum beschäftigt sich mit aktuellen parallelen und seriellen

lithographischen Strukturierungsmethoden wie UV-Kontaktbelichtung, Laserinterferenz-, Elektronenstrahl- und Nanoimprintlithographie. Schwerpunkte der Kooperation liegen auf folgenden Gebieten:

- hochauflösende Materialcharakterisierung mittels Elektronenmikroskopie (insb. Rasterelektronenmikroskopie unter Umweltbedingungen – ESEM),
- Entwicklung von lithographischen Strukturierungsverfahren und Dünnschichtdeposition,
- Abbildung und Diagnostik mittels analytischer Transmissionselektronenmikroskopie (energiedispersive Röntgenmikroanalytik – EDX und Elektronenenergieverlustspektroskopie – EELS),
- optische Charakterisierung von dünnen Funktionsschichten (Ellipsometrie, Ramanspektroskopie, Photolumineszenz, Kathodolumineszenzmikroskopie),
- Defektspektroskopie und -mikroskopie von Festkörpern (Positronenannihilation, Barrierenstromabbildung – EBIC, Transmissionselektronenmikroskopie).

Im Laborbereich Nanostrukturierung/-analytik (Ansprechpartner Privatdoz. Dr. H. S. Leipner) stehen im IZM selber Materialien für erneuerbare Energien im Mittelpunkt. Ziel der eigenständigen Projekte auf dem Gebieten der Thermoelektrik, der Photovoltaik und der Energiespeicherung ist ein Beitrag zur Entwicklung neuartiger, hocheffizienter Bauelemente zur umweltfreundlichen Energiegewinnung, -wandlung und -speicherung. Der Laborbereich Elektronenmikroskopie/Spektroskopie (Ansprechpartner Dr. F. Heyroth) zielt auf die Erforschung der mikroskopischen/nanoskopischen Materialeigenschaften und ihrem chemisch-strukturellen Aufbau als Voraussetzung zum Verständnis moderner Werkstoffe. Für die interdisziplinäre Projektbearbeitung verfügt dieser Laborbereich über verschiedene mikroskopische und analytische Untersuchungstechniken. Neben der hochauflösenden Abbildung der Oberflächentopographie eröffnet der verfügbare Gerätepool die Möglichkeit zur Charakterisierung der Chemie im Nanometerbereich mittels EELS mit höchster spektraler Auflösung oder die Durchführung von *in-situ*-Experimenten wie zum Beispiel die Messung elektronenstrahlinduzierter Ströme (EBIC) mit Nanomanipulatoren. Hinzu kommt eine grundlegende Ausstattung zur optischen Spektroskopie (Ramanmikroskopie, Ellipsometrie, Absorptionsspektroskopie) und zur Rasterkraftmikroskopie und optischer Nahfeldmikroskopie, die zur Materialcharakterisierung in Korrelation mit der Mikroskopie eingesetzt wird. Der Laborbereich Positronenannihilation/Kristalldefektphysik ist eine langjährige Spezialrichtung in Halle und wird gemeinsam mit dem Institut für Physik (Ansprechpartner Prof. Dr. R. Krause-Rehberg) betrieben. Im IZM steht ein Labor für die Materialforschung mit Hilfe der Positronenannihilation mit allen relevanten Methoden zur Verfügung (insb. Lebensdauer messung, Dopplerverbreiterung, Positronenstrahlssystem). Dabei können in kristallinen Festkörpern Kristalldefekte wie beispielsweise Leerstellen, Leerstellenkomplexe, Voids, Versetzungen und Nanoausscheidungen untersucht werden. In Polymeren kann das offene Volumen zwischen den Molekülketten charakterisiert und in mesoporösen Materialien die Größe und Größenverteilung von Nanoporen bestimmt werden. Als externer Messplatz wurde die intensive, gepulste Positronenquelle EPOS am Linearbeschleuniger ELBE des Helmholtzzentrums Dresden-Rossendorf realisiert. Dieser Messplatz mit weltweit einmaligen Parametern wie extrem große Zeitauflösung bei hoher Intensität steht externen Nutzern zur Verfügung.

Zentrales Element der Aktivitäten innerhalb des Nanotechnikums Weinberg ist der Reinraumtrakt, der gemeinsam mit dem Max-Planck-Institut für Mikrostrukturphysik Halle, dem Fraunhofer-Forschungszentrum für Silizium-Photovoltaik (CSP) und dem Fraunhoferinstitut für Mikrostruktur von Werkstoffen und Systemen (IMWS) genutzt wird. Der Reinraumtrakt umfasst Bereiche der Reinraumklassen 10000 (ISO 7, „Grauraum“), 100 (ISO 5, „Reinraum“ und lokal der Klasse 10. Die Temperatur beträgt konstant $20,5 \pm 1$ °C (bzw. $20,5 \pm 0,1$ °C im Bereich der Reinraumklasse 10 für die Elektronenstrahlolithographie) bei einer relativen Luftfeuchte von $42,5 \pm 5$ %. Zur Gewährleistung der Bedingungen erfolgt pro Stunde ein 150facher Luftwechsel (290fach im Elektronenstrahlolithographiebereich der Klasse 10). Die zur Verfügung stehende Experimentierfläche des Reinraums (Klasse 100/10) beträgt ca. 210 m². Hinzu kommen ca. 410 m² Grauraumfläche, die sowohl für Experimente als auch für Serviceeinrichtungen genutzt werden. Für die Durchführung der Reinraumarbeiten ist der Laborbereich Lithographie/Reinraumtechnologien (Ansprechpartner

Dr. B. Fuhrmann) des IZM zuständig. Neben der Projektbearbeitung und Betreuung von Kooperationsleistungen wird die Aufrechterhaltung des Betriebes, der Integrität und der Sicherheit des Reinraumtraktes durch diesen Laborbereich gewährleistet. Die technische Betreuung und Wartung erfolgt in Abstimmung mit dem Vermieter (TGZ) und dem von ihm beauftragten Gebäudemanagement.

Die Leitung und Koordination der Vorhaben im Reinraumtrakt obliegt seit 2009 nach der universitätsinternen Festlegung dem Fachgruppenleiter der Fachgruppe Nanostrukturierte Materialien des Instituts für Physik (Prof. Dr. G. Schmidt), derzeit zugleich geschäftsführender Direktor des IZM. Die Mietkosten des Reinraumtraktes (zusammen mit den Betriebskosten für Energie, Wasser, Klimatisierung, Wartung/Instandhaltung der Reinraumtechnik) werden zentral von der Universität getragen; ein geringer Beitrag wird vom Max-Planck-Institut für Mikrostrukturphysik als Untermieter geleistet. Die Kosten für Verbrauchsmittel und Geräte müssen von den Nutzern erbracht werden.

Seit Inbetriebnahme wurde eine Vielzahl von Geräten im Reinraum installiert, wobei konsequent folgende Strategie verfolgt wurde. Die Geräte gehören jeweils Arbeitsgruppen der Universität, die für die Installation, den Erhalt und die Betriebskosten (außer Strom und Kühlung) zuständig sind. Jedes Gerät muss in sinnvollem Umfang auch für andere Arbeitsgruppen zugänglich sein. Zur Erleichterung der Nutzung durch Kooperationspartner ist an fast allen Geräten jeweils ein Mitarbeiter des IZM eingewiesen, so dass Nutzung durch andere Arbeitsgruppen zwar mit Zustimmung des Hauptnutzers aber ohne eine direkte Arbeitsbelastung für dessen Arbeitsgruppe erfolgen kann. Dies ermöglicht zum Beispiel die kurzfristige Prozessentwicklung durch Mitarbeiter des IZM unter Nutzung aller im Reinraum vorhandenen Anlagen. Bei umfangreicherer Fremdnutzung erfolgt zumeist eine Einweisung eines Mitarbeiters der interessierten Arbeitsgruppe sowie (falls relevant) eine Beteiligung an den direkten Betriebskosten (Materialeinsatz, Wartung). Grundsätzlich werden für die Nutzung des Reinraums aber keine Gebühren erhoben, was gerade bei kurzfristigen Experimenten kleinen Umfangs die Arbeit sehr erleichtert und die Auslastung des Reinraums erhöht.

Durch gezielte Beschaffung verschiedener Geräte ist es gerade in den letzten fünf Jahren gelungen im Reinraum eine vollständige Prozesskette zur Herstellung von Nanostrukturen und Bauelementen zu installieren. Diese reicht von der Dünnschichtdeposition und thermischer Behandlung über Lithographie (inkl. Lacktechnologie), Strukturierung und Ätzprozesse bis zum Bonden fertiger Elemente. Zusätzlich steht im Reinraumtrakt Charakterisierungstechnik in begrenztem Umfang zur Verfügung. Hierbei sind in vielen Bereichen alternative Verfahren verfügbar.

So sind zum Beispiel aufzuführen:

- Dünnschichtdeposition
 - gepulste Laserdeposition (komplexe Oxide)
 - organische Molekularstrahldeposition (organische Halbleiter)
 - Elektronenstrahl- und thermische Verdampfung in mehreren Anlagen (Metalle, Isolatoren)
 - Magnetronspütern (Metalle und Isolatoren)
 - Atomic layer deposition (zwei Anlagen, z. B. für ZnO, Al₂O₃)
 - Plasma enhanced CVD (Si₃N₄ und SiO₂)
- Lithographie
 - 2 Anlagen für Elektronenstrahlolithographie
 - UV-Mask-Aligner
 - Laserinterferenzlithographie
 - Nanoimprintlithographie
 - Zur Zeit befindet sich ein UV-Laserbelichter der Firma Heidelberg Instruments in der Beschaffung durch die AG Nanostrukturierte Materialien, um speziell die optische Lithographie auf kleinen Proben zu erleichtern.
- Trockenätzen
 - reaktives Ionenätzen (chlorbasiert)

- reaktives Ionenätzen (fluorbasiert)
- Ar-Ionenstrahlätzen mit Endpunktdetektion
- Charakterisierung
 - optische Mikroskopie
 - Profilometrie (Dektak)
 - magnetooptische Kerrspektroskopie

Diese große Auswahl an Alternativen ermöglicht maximale Flexibilität bei der Prozessentwicklung in verschiedensten Bereichen, so dass bei den meisten Anfragen eine Lösung innerhalb des Reinraums gefunden werden kann.

Personal des IZM

Direktorium

Prof. Dr. G. Schmidt	Institut für Physik	(Geschäftsführender Direktor)
Privatdoz. Dr. H. S. Leipner	IZM	(Wissenschaftlicher Geschäftsführer)
Prof. Dr. W. Binder	Institut für Chemie	
Prof. Dr. T. Groth	Institut für Pharmazie	
Prof. Dr. I. Mertig	Institut für Physik	
Prof. Dr. R. Scheer	Institut für Physik	

Wissenschaftlicher Beirat

Dr. M. Diestelhorst	Martin-Luther-Universität Halle–Wittenberg
Prof. Dr. D. Enke	Universität Leipzig
Prof. Dr. H. Gross	Max-Planck-Institut für Mikrostrukturphysik
Prof. Dr. R. Wehrspohn	Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik

Permanente Mitarbeiter

P. Schmöller	Sekretariat, Projektverwaltung
Dr. F. Heyroth	Elektronenmikroskopie/Spektroskopie, Elektronenlithographie
Dr. B. Fuhrmann	Lithographie/Reinraumtechnologien, Beschichtung
Privatdoz. Dr. H. S. Leipner	Nanostrukturierung/-analytik, Materialien für erneuerbare Energien
Diplomphys. F. Syrowatka	Mikroskopie, Vakuumtechnik, Reinstgase
Diplomphys. S. Schlenker	Reinraumtechnik, Prozessierung

Kooperationen

Neben den eigenen Forschungsprojekten ist Hauptziel des IZM die Zuarbeit und Kooperation für materialwissenschaftliche Fragestellungen. Hierbei war zu Anfang die Charakterisierung von Materialien der Hauptaufgabenbereich. Mit der fortschreitenden Ausstattung des Reinraums treten jedoch auch die Prozessentwicklung und Probenherstellung immer mehr in den Vordergrund. Im Folgenden sind die Kooperationspartner an der MLU sowie die externen Kooperationspartner aufgelistet, zusammen mit einer stichwortartigen Beschreibung der Kooperationen. Details können dem Abschnitt Highlights der Kooperationen sowie den Jahresberichten entnommen werden, in denen die einzelnen Arbeiten beschrieben sind.

Kooperationspartner an der Martin-Luther-Universität Halle–Wittenberg

Im Folgenden sind die wichtigsten universitätsinternen Kooperationspartner nach Instituten sortiert gelistet.

- Institut für Physik
 - Fachgruppe Nanostrukturierte Materialien (Prof. Dr. Schmidt) – Lithographieentwicklungen, Charakterisierung von Nanostrukturen, Funktionalisierung von Oxidschichten, Reinraumtechnologien
 - Fachgruppe Photovoltaik (Prof. Dr. Scheer) – Kontaktierung, mikroskopische Charakterisierung, Positronenlebensdauermessungen, Defektstudien in Halbleiter
 - Fachgruppe Mikrostrukturbasiertes Materialdesign (Prof. Dr. Wehrspohn) – Herstellung und Charakterisierung von Siliciumnanopartikeln, Untersuchung von schwarzem Silicium, Funktionalisierung von Al₂O₃-Dünnschichten
 - Fachgruppe Ferroische Materialien/Oxidische Grenzflächen (Prof. Dr. Beige/Prof. Dr. Dörr) – elektrische und strukturelle Charakterisierung von Superkondensatoren, piezoelektrische Untersuchungen von Kompositen, Elektronenmikroskopie keramischer Materialien
 - Fachgruppe Anorganisch-Nichtmetallische Materialien (Prof. Dr. Roggendorf) – Elektronenmikroskopie und elektronenmikroskopische Präparation
- Institut für Chemie
 - Fachgruppe Festkörperchemie (Prof. Dr. Ebbinghaus) – Synthese und Charakterisierung von 0–3-Kompositmaterialien
 - Fachgruppe Technische Chemie erneuerbarer Energien (Prof. Dr. Bron) – mikroskopische Charakterisierung von Elektrodenmaterialien und Katalysatoren
 - Fachgruppe Makromolekulare Chemie (Prof. Dr. Binder) – analytische Elektronenmikroskopie von selbstheilenden Nanokompositen
- Institut für Pharmazie
 - Fachgruppe Biomedizinische Materialien (Prof. Dr. Groth) – spektroskopische Ellipsometrie, Zelladhäsion durch nanostrukturierte Oberflächen, Oberflächenmodifikation mit Biomolekülen
 - Fachgruppe Pharmazeutische Technologie und Biopharmazie (Prof. Dr. Mäder) – Charakterisierung von Lipidmikropartikeln, Bioschichten
 - Fachgruppe Biomedizinische Materialien (Prof. Dr. Neubert) – Rasterelektronenmikroskopie von Biomaterialien, Unterstützung von Gründeraktivitäten
- Zentrum für Innovationskompetenz SiLi-Nano
 - Arbeitsgruppe „Silicon to light“ (Dr. Schilling) – Nanostrukturierung für Si-Photonik, Plasmonik von porösen Schichten und Nanostrukturen, Fabrikation von Wellenleitern und Mikroresonatoren, Charakterisierung von Quantenpunkten, Fabrikation von Dioden

- Arbeitsgruppe „Light to silicon“ (Dr. Seifert) – Laserablation, Plasmonenresonanz an Nanopartikeln
- Institut für Biochemie und Biotechnologie
 - Arbeitsgruppe Enzymologie (Prof. Dr. Schutkowski) – Massenspektroskopie von Biomaterialien, Laserinterferenzlithographie
- Zentrum für Ingenieurwissenschaften
 - Fachgruppe Thermische Verfahrenstechnik (Prof. Dr. Ulrich) – Kristallisation von Nanostrükturen
- Institut für Geowissenschaften und Geographie
 - Fachgruppe Allgemeine Geologie (Prof. Dr. Heinisch) – Charakterisierung von Glimmern, Analyse von Fossilien
- Universitätsklinikum
 - Universitätsklinik und Poliklinik für Orthopädie und Physikalische Medizin (Prof. Dr. Bernstein) Mikroskopie von Knochenimplantaten
 - Universitätsklinik und Poliklinik für Dermatologie und Venerologie (Prof. Dr. Wohlrab) – Strukturuntersuchungen von humanem Elastin
- Institut für Informatik
 - Arbeitsgruppe Computer Engineering (Prof. Dr. Molitor) – lithographische Strukturierung von Hologrammen

Externe Kooperationspartner

- Max-Planck-Institut für Mikrostrukturphysik Halle – Partner in diversen Drittmittelprojekten, u. a. zur Thermoelektrik, Unterstützung bei der Transmissionselektronenmikroskopie, Kooperation im Reinraumtrakt mit gemeinsamer Gerätenutzung
- Fraunhofer-Institut für Mikrostruktur von Werkstoffen und Systemen – Partner in diversen Drittmittelprojekten, u. a. zur Thermoelektrik, Kooperation im Reinraumtrakt mit gemeinsamer Gerätenutzung
- Fraunhofer-Center für Silizium-Photovoltaik CSP – Partner in diversen Drittmittelprojekten, u. a. zur Photovoltaik, Kooperation im Reinraumtrakt mit gemeinsamer Gerätenutzung
- Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf – Aufbau der gepulsten Positronenquelle EPOS als Messplatz für interne und externe Nutzer
- Leibniz-Institut für Oberflächenmodifizierung e.V. Leipzig (IOM) – Projektpartner in der Thermoelektrik
- Brandenburgische Technische Universität Cottbus, Joint Lab IHP/BTU – Projektpartner in der Thermoelektrik und Photovoltaik
- Institut für Technische Chemie, Universität Leipzig – Untersuchung poröse Gläser
- Sonotec Ultraschallsensorik Halle GmbH – Projektpartner für die Entwicklung von piezoelektrischen Faserverkompositen
- Solar World Innovations – Projektpartner zur Defektcharakterisierung von Solarsilizium
- Freiburger Compound Materials GmbH (FCM) – Projektpartner zur Entwicklung von defektarmen GaN-Wafern
- Université de Poitiers – Projektpartner bei der Defektcharakterisierung in Halbleitern
- Department of Physics, Aristotle University of Thessaloniki, – Projektpartner zur Versetzungsscharakterisierung, zur Entwicklung von defektarmen GaN-Wafern
- Nachwuchsgruppe Innovative Sensor- und Funktionswerkstoffe der Universität Bremen – Projektpartner bei der Entwicklung von Batteriematerialien

- Micropelt GmbH Freiburg – Projektpartner in der Thermoelektrik
- Angaris GmbH – Projektpartner in der Thermoelektrik
- Universalbeschichtung GmbH Wolfen – Partner im Projekt Reactive Wetcoating
- Institut für Mineralogie der Universität Leipzig – Projektpartner für Komposituperkondensatoren und Thermoelektrika
- ENFAS GmbH – Projektpartner für Komposituperkondensatoren und Batteriematerialien
- Max-Born-Institut für nichtlineare Optik und Kurzzeitspektroskopie – Projektpartner für optische Spektroskopie und Degradation von Halbleitern
- Department of Electronic Materials, Australian National University Canberra – Projektpartner Photovoltaik, Charakterisierung von Si-Polymorphen und Si-Defekte
- FH Dessau – gemeinsame Vorhaben zur Archäometrie
- Kristallographie der Universität Freiburg – Projektpartner zur Defektcharakterisierung von Solarsilicium, Synchrotron-Röntgentopographie
- Helmholtz-Zentrum Berlin – Projektpartner in der Photovoltaik
- Institut für Halbleitertechnik der RWTH Aachen – Projektpartner in der Photovoltaik
- IHP Frankfurt/Oder – Projektpartner in der Photovoltaik und Thermoelektrik
- State Key Lab of Silicon Materials, Hangzhou, China Projektpartner Charakterisierung von Si-Polymorphen und Si-Defekte
- Institut für Festkörpertheorie und -optik der Universität Jena – Projektpartner in der Photovoltaik
- Institut für technische Chemie der Universität Leipzig – Phasenseparation in Gläsern, EELS und Positronenannihilation
- Allresist Strausberg – gemeinsame Entwicklung von Resistmaterialien für die Lithographie
- Landesmuseum für Vorgeschichte – Charakterisierung der Himmelscheibe von Nebra

Drittmittel

Neben der Forschung ist das IZM wie schon erwähnt auch für den Betrieb des Reinraums der Universität zuständig. Da der Reinraum durch die Universität angemietet wird, ist ein wichtiges Maß für den Erfolg des IZM auch die Anzahl und Förderung der Drittmittelprojekte, die durch den Reinraum und somit durch die Arbeit des IZM ermöglicht werden. Im Folgenden wird zuerst ein Überblick über Art und Umfang der durch das IZM beantragten und genehmigten Drittmittelprojekte gegeben. Im Anschluss befinden sich weitere tabellarische Aufstellungen von Drittmittelprojekten der Martin-Luther-Universität Halle–Wittenberg aus den vergangenen Jahren, die durch das IZM und den Reinraum erst ermöglicht wurden/werden.

Drittmittelprojekte des Interdisziplinären Zentrums für Materialwissenschaften

Mit eigenen Projekten setzt das IZM einen Schwerpunkt auf die Materialforschung für erneuerbare Energien, wobei eine wichtige Rolle dabei die Nanostrukturierung bzw. die Entwicklung und Charakterisierung von Kompositmaterialien und dünnen Schichten spielt. Drei Richtungen werden dabei verfolgt:

- **Energiekonversion:** Photovoltaik, Photonik,
- **Energiespeicherung:** Batterien, Superkondensatoren,
- **Energierecycling:** Thermoelektrik, Piezowandler.

Die größeren Förderprojekte auf diesen Gebieten werden im Folgenden kurz vorgestellt

Hochauflösende elektronenmikroskopische Analytik an siliciumbasierten Dünnschichtmaterialien für Solarzellen der nächsten Generation

(Teilprojekt im BMBF-Verbundprojekt SINOVA zur Solarenergietechnik der nächsten Generation – Verbundpartner: RWTH Aachen, Ernst Ruska-Centrum für Mikroskopie Jülich, BTU Cottbus, FSU Jena, Forschungszentrum Jülich, Helmholtz-Zentrum Berlin)

Die Effizienz von Quantentopf- und Quantenpunktstrukturen für neuartige siliciumbasierte Bauelemente in der Photovoltaik wird durch Strukturgrößen auf der atomaren Ebene bestimmt. Außerdem finden während der thermischen Behandlung bzw. Laserkristallisation chemische Umwandlungen statt, die sowohl die chemische Zusammensetzung als auch die atomaren Bindungen in den beteiligten Phasen und an den inneren Grenzflächen beeinflussen. Durch die Kombination verschiedener Methoden der ultrahochauflösenden, abbildenden und analytischen Elektronenmikroskopie wurde eine Korrelation der physikalischen und chemischen Eigenschaften mit der lokalen atomaren und elektronischen Struktur in den untersuchten Silicium-Nanostrukturen hergestellt, woraus eine gezielte Optimierung der photoelektrischen Eigenschaften abgeleitet werden konnte. Im Detail wurde eine chemische und strukturelle Charakterisierung von Silicium–Siliciumoxid-Mehrfachschichtstrukturen mit eingelagerten Silicium-Quantenpunkten mittels paralleler Elektronenenergieverlustspektroskopie durchgeführt, wobei die lokalen chemischen Bindungsverhältnisse mit hoher Orts- und Energieauflösung für eine Optimierung der Herstellungsprozesse der Nanostrukturen auf dem Weg zur Silicium-Nanodot-Emitter-Heterosolarzelle im Mittelpunkt standen. Aus den Verlustspektren wurden detaillierte Informationen zur Zusammensetzung in den einzelnen Schichten und Quantenpunkten gewonnen (*Chemical Profiling*) und Beiträge zur Untersuchung der Stöchiometrie und Interdiffusion geliefert. Das Studium der Kantenfeinstruktur an den Grenzflächen lieferte Aussagen zur Interfacechemie.

Ausgewählte wichtige Publikationen:

- M. Roczen *et al.* **Comparison of growth methods for Si/SiO₂ nanostructures as nanodot hetero-emitters for photovoltaic applications.** J. Non-Cryst. Solids **358** (2012) 2253. DOI 10.1016/j.jnoncrysol.2011.11.024.
- M. Roczen *et al.* **Structural investigations of silicon nanostructures grown by self-organized island formation for photovoltaic applications.** Appl. Phys. A **108** (2012) 719. DOI 0.1007/s00339-012-6956-9.
- T. Rublack *et al.* **Proof of damage-free selective removal of thin dielectric coatings on silicon wafers by irradiation with femto-second laser pulses.** J. Appl. Phys. **112** (2012) 023521. DOI 10.1063/1.4739305.

Si- und Si-Ge-Dünnschichten für thermoelektrische Anwendungen

(Verbundprojekt SiGeTE im Rahmen der BMBF-Initiative „Werkstofftechnologien von morgen – Wissenschaftliche Vorprojekte in den Werkstoff- und Nanotechnologien – WING“, Projektkoordinator IZM – Verbundpartner MPI Halle, IHP Frankfurt/Oder, BTU Cottbus, IOM Leipzig, Fraunhofer IWM Freiburg–Halle)

Im Projekt ging es um die Bearbeitung der technologischen Grundlagen zur Realisierung effizienter thermoelektrischer Dünnschichtbauelemente auf Silicium- und Germaniumbasis. Im Fokus standen Konzepte, die den thermoelektrischen Gütefaktor ZT deutlich erhöhen unter gezielter Ausnutzung der Nanostrukturierung zur Realisierung von Si- bzw. Si-Ge-basierten Dünnschichten. Die Herausforderung im Materialsystem Silicium–Germanium bestand darin, sowohl die elektrische als auch die Wärmeleitfähigkeit mehr oder weniger unabhängig voneinander einstellen zu können. Solche Möglichkeiten eröffnen sich mit dem physikalischen Materialdesign unter Verwendung von nanostrukturierten Materialkombinationen wie Supergitter bzw. nichtperiodische Schichten oder Nanosäulen aus Silicium und Germanium mit präziser Kontrolle der Bandstruktur. Verschiedene Herstellungstechnologien wie Epitaxie, physikalische Gasphasenabscheidung

und Waferbonden wurden für die Fabrikation thermoelektrischer Strukturen erprobt. Eine zentrale Rolle spielte die Simulation und die Vermessung der thermoelektrischen Parameter in Bezug auf die strukturelle Charakterisierung. Für die Entwicklung von Prototypen war neben der Qualifizierung physikalischer Messmethoden die Entwicklung von Systemlösungen in Bezug auf eine Verbindungs-, Kontaktierungs- und Verkapselungstechnik erforderlich. Das eigene Teilprojekt des IZM innerhalb des Verbundes konzentrierte sich auf die thermoelektrische Charakterisierung und lithographische Strukturierung von Si-Ge-Dünnschichten und die gezielte Fabrikation von Nanodrähten.

Ausgewählte wichtige Publikationen:

- N. Geyer *et al.* **Sub-20 nm Si/Ge superlattice nanowires by metal-assisted etching**. *Nano Lett.* **9** (2009) 3106. DOI 10.1021/nl900751g
- Z. Huang *et al.* **Metal-assisted chemical etching of silicon: A review**. *Adv. Mater.* **23** (2011) 285. DOI 10.1002/adma.201001784
- A. A. Tonkikh *et al.* **Aperiodic SiSn/Si multilayers for thermoelectric applications**. *J. Cryst. Growth* **392** (2014) 49. DOI 10.1016/j.jcrysgro.2014.01.047
- N. Geyer *et al.* **Influence of the doping level on the porosity of silicon nanowires prepared by metal-assisted chemical etching**. *Nanotechnol.* **26** (2015) 245301. DOI 10.1088/0957-4484/26/24/245301

Neue Super-Kondensatoren als Energiespeicher

(Verbundprojekt Super-Kon unter Federführung des IZM zur BMBF-Innovationsinitiative Unternehmen Region im Rahmen des Förderprogramms „ForMaT – Forschung für den Markt im Team“ – Verbundpartner Institut für Physik und Institut für Chemie der Martin-Luther-Universität Halle–Wittenberg, Hörmann IMG GmbH Nordhausen, Fraunhofer IWM Halle)

Im Projekt Super-Kon wurden Kondensatoren mit neuartigen 0–3-Kompositdielektrika zur Anwendung als Energiespeicher entwickelt. Diese Kompositmaterialien bestehen aus oberflächenmodifizierten Nanopartikeln keramischer Materialien, die in eine Glas- bzw. Polymermatrix eingebettet werden. Als Nanopartikel wurden etablierte Ferroelektrika wie BaTiO₃ mit verschiedenen Verfahren synthetisiert, aber auch vielversprechende neue Verbindungen wie CaCu₃Ti₄O₁₂ mit extrem hoher Permittivität erprobt. Durch diese Kombination wurden die positiven Eigenschaften der Einzelmaterialien (hohe Permittivitäten, hohe Durchbruchfeldstärken, geringe elektrische Leitfähigkeit und dadurch hohe Energiedichten und Speicherzeiten) vereint und gleichzeitig eine gute Prozessierbarkeit der Materialien erreicht. In der Projektbearbeitung wurde der Bereich der Materialsynthese, der Realisierung von großflächigen Dünnschichtkondensatoren, der Charakterisierung der strukturellen und physikalischen Eigenschaften und der Langzeitstabilität als einheitlicher Komplex gesehen. Damit konnte ein Labormuster neuartigen Typs eines Komposit-Superkondensators entwickelt werden, das die Basis einer neuen Generation von robusten und flexiblen Modulen zur kurz- und längerfristigen Speicherung von elektrischer Energie ohne merkliche Alterungserscheinungen ermöglicht. Neben der Forschungstätigkeit stellte die betriebswirtschaftliche Projektunterstützung eine wesentliche Komponente innerhalb des Förderprogramms dar, die die Integration der Marktanforderungen in den Entwicklungsprozess im Blick hatte.

Ausgewählte wichtige Publikationen:

- C. Ehrhardt *et al.* **Influence of surface modification and dispersion additives**. *Mater. Sci. Eng. B* **178** (2013) 881. DOI 10.1016/j.mseb.2013.04.013
- C. Ehrhardt *et al.* **A solution-based approach to composite dielectric films of surface functionalized CaCu₃Ti₄O₁₂ and P(VDF-HFP)**. *J. Mater. Chem. A* **2** (2014) 2266. DOI 10.1039/C3TA14379A
- J. Glenneberg *et al.* **Morphological and microstructural investigations of composite dielectrics for energy storage**. *RSC Adv.* **4** (2014) 61268. DOI 10.1039/C4RA07354A

Gründerwerkstatt Nanostrukturierte Werkstoffe

(Projekt NanoWerk im Rahmen der Förderung von Pilotvorhaben Inkubatoren an den Hochschulen des Landes Sachsen-Anhalt mit Mitteln des europäischen Fonds für regionale Entwicklung – Partner des IZM ist die Univations GmbH)

Mit der Etablierung einer Gründerwerkstatt war beabsichtigt, das vorhandene Potential der Grundlagenforschung auf dem Gebiet der nanostrukturierten Materialien und der Nanotechnologie in Verbindung mit der Kompetenz in der Förderung von Innovationen und Ausgründungen aus der Wissenschaft nutzbar zu machen für die Unterstützung von Spin-off-Unternehmen in Bereich der neuen Werkstoffe/Nanotechnologie. Mit dem Inkubator NanoWerk ging es darum, die Rolle der Martin-Luther-Universität Halle–Wittenberg als Gründerhochschule in Sachsen-Anhalt weiter auszubauen, um die regionale wirtschaftliche Innovationskraft zu erhalten bzw. auf dem Hochtechnologiesektor zu erweitern. Die Gründerwerkstatt Nanowerkstoffe besteht aus zwei miteinander eng verbundenen Bereichen: ein Nanotechnologielabor und ein *Business Development Center*. Zwei Themenfelder standen im Mittelpunkt: Die Verwertungsmöglichkeiten von Ergebnissen der Grundlagenforschung auf dem Gebieten der Thermoelektrik und der Energiespeicherung. Auf dem ersten Gebiet wurde eng mit den jungen Unternehmen Micropelt GmbH und Angaris GmbH zusammengearbeitet. Der Anwendungsbereich der Kompositmaterialien zur Energiespeicherung spielte eine herausgehobene Rolle in der Gründerwerkstatt. Als direktes Ergebnis kam es zur Gründung der Enfas GmbH durch einen Doktoranden der Martin-Luther-Universität Halle–Wittenberg. Gemeinsame Entwicklungsvorhaben zwischen IZM und Enfas GmbH – auch unter Einbeziehung weiterer Partner wie der Universität Bremen – zur Energiespeicherung mittels Superkondensatoren und Feststoffbatterien wurden auf den Weg gebracht.

Entwicklung von neuen Faserkompositmaterialien für den Einsatz bei Ultraschallsensoren

(Kooperationsprojekt mit der Sonotec Ultraschallsensorik Halle GmbH)

Durch die experimentelle Charakterisierung von Einzelfasern und Faserkompositen und eine begleitende Modellierung von Faserkompositen wurde das Verständnis von Kompositen für Ultraschallanwendungen entscheidend verbessert. Eine wesentliche Fragestellung war dabei, welchen Einfluss eine unregelmäßige Faseranordnung auf die Messung der Eigenschaften des Komposites hat. Mittels einer Rückrechnung lassen sich aus den effektiven Kompositeigenschaften die Eigenschaften der Fasern ermitteln. Aufbauend auf dem experimentellen Vergleich von Einzelfaser- und Kompositcharakterisierung konnte die für periodische Komposite bewährten Verfahren an den Kompositen mit unregelmäßiger Faseranordnung überprüft und Korrekturfaktoren ermittelt werden. Die Charakterisierungsmethoden zur Einzelfasermessung wurden weiterentwickelt, die Präparations- und Charakterisierungsmöglichkeiten von piezoelektrischen Einzelfasern und Kompositen deutlich erweitert. Außerdem wurde die Methodik zur Auswertung von Berechnungsergebnissen mittels der Finite-Elemente-Methode ausgebaut. Von direkter Anwendungsrelevanz war der sich ergebende Unterschied zwischen Kompositen mit periodischer und unregelmäßiger Anordnung der piezoelektrischen Komponente, der sich besonders bei kleinen Volumenanteilen deutlich bemerkbar machte. Die bisher in der Praxis benutzte Näherungsformel zur Bestimmung des effektiven longitudinalen Piezokoeffizienten von 1–3-Kompositen überschätzt besonders bei kleinen Aspektverhältnissen den wirklichen Mittelwert und verfälscht damit den tatsächlichen Piezokoeffizienten.

Ausgewählte Publikation:

C Pientschke et al. **Modelling of the measured longitudinal piezoelectric coefficient of single ceramic fibres with annular electrodes**. Smart Mater. Struct. **20** (2011) 055015.

Defektcharakterisierung in Halbleitern

(industriergeförderte Projekte des IZM – Projektpartner Freiburger Compound Materials GmbH, OSRAM, Solar World)

Versetzungen als Grundbausteine der plastischen Verformung sind von ihrer Mikrostruktur recht gut verstanden. Die Bildung und Entwicklung großskaliger Struktureinheiten als ein Resultat der Wechselwirkung von Kristalldefekten ist bisher jedoch nur mit einigen, eher einfachen Modellansätzen betrachtet worden. Damit einher gehen limitierte empirische Einflussmöglichkeiten auf das Versetzungsensemble in seiner Rückwirkung auf die Kristalleigenschaften. Eine bessere Kontrolle des Versetzungsensembles erlaubt die Reproduzierbarkeit kristalliner Materialien und damit die Leistungsfähigkeit und Kosteneffizienz von modernen Bauelementen in der Photovoltaik, Photonik und Elektronik auf eine neue Stufe heben. In den durchgeführten Untersuchungen ging es um die Anwendung von mikroskopischen *State-of-the-Art*-Verfahren der Charakterisierung/Modellierung von ausgedehnten Kristalldefekten im Zusammenspiel mit den Kristallzüchtern, um ein Verständnis des hierarchischen Verhaltens der Strukturbildung und -evolution auf verschiedenen Längenskalen von nm bis cm zu erhalten. Dabei stand einerseits die Dynamik und die Kontrolle von Versetzungsclustern in multikristallinem Silicium als ein Hauptfaktor bei der Reduzierung des Wirkungsgrades von Si-Solarzellen im Mittelpunkt. Ein zweiter Schwerpunkt beschäftigte sich mit der Optimierung der Herstellung von GaN- oder GaAs-Wafern, insbesondere mit dem Verständnis von Versetzungsmustern. Besonderes Augenmerk wurde auf das grundlegende Verständnis der Defektdynamik gelegt, die sich nur in der Wechselwirkung mit Eigendefekten, Fremdatomen bzw. zweidimensionalen Gitterstörungen erfassen lässt.

Ausgewählte wichtige Publikationen:

Z. Zeng *et al.* **Effect of oxygen precipitates on dislocation motion in Czochralski silicon**. J. Cryst. Growth **312** (2010) 169. DOI 10.1016/j.jcrysgro.2009.10.030

I. Ratschinski *et al.* **Dislocations and cracks at Vickers indentations in (0001) GaN single crystals**. Phil. Mag. Lett. **90** (2010) 565. DOI 10.1080/09500839.2010.484398

D. Oriwol *et al.* **Small-angle subgrain boundaries emanating from dislocation pile-ups in multicrystalline silicon studied with synchrotron white-beam X-ray topography**. Acta Mater. **61** (2013) 6903. DOI 10.1016/j.actamat.2013.08.002

Drittmittelprojekte der Martin-Luther-Universität Halle–Wittenberg, die insbesondere den Reinraumtrakt des Nanotechnikums Weinberg mitnutzen

Förderer	Kurzname	Laufzeit	Gesamtbetrag in €	Projektleiter
BMBF	Nanovolt	01.10.2006–30.09.2010	419.349	R. Wehrspohn
BMBF	ReaWet 2-UA	01.10.2007–31.07.2010	77.000	H. S. Leipner
BMBF	Phiobe	01.05.2008–31.10.2011	436.800	R. Wehrspohn
BMBF	SINOVA	01.03.2009–31.03.2012	175.000	H. S. Leipner
DFG	Nanosun	01.04.2009–31.03.2012	163.700	R. Wehrspohn
BMBF	SiGeTE	01.09.2009–28.02.2014	552.000	H. S. Leipner

BMBF	ForMaT	01.10.2009–31.03.2010	100.000	H. S. Leipner, H. Beige
BMBF	ZIK Sili Nano	01.10.2009–30.09.2014	6.250.000	J. Schilling, S. Schweizer
BMBF	Infravolt	01.04.2011–31.03.2014	509.900	R. Wehrspohn
DFG	SFB 762 TP B9	01.07.2010–31.12.2011	156.960	G. Schmidt
BMBF	Super-Kon	01.11.2010–30.10.2012	1.500.000	H. S. Leipner H. Beige
EU	IFOX	01.12.2010–30.11.2015	955.820	G. Schmidt
EU	HINTS	01.06.2011–31.05.2014	338.400	G. Schmidt
DFG	SFB 762 TP B11	01.01.2012–31.12.2015	498.000	G. Schmidt
DFG	SFB 762 TP B9	01.01.2012–31.12.2015	454.000	G. Schmidt
BMBF	Struktursolar	01.01.2012–31.12.2014	1.036.770	R. Scheer R. Wehrspohn G. Schmidt
EU	Ecomagics	01.01.2012–31.12.2016	1.500.000	G. Woltersdorf
LSA/EU	NanoWerk	01.07.2012–01.04.2015	351.000	R. Neubert H. S. Leipner
DFG	GR 1290/10-1	01.05.2013–31.07.2017	264.000	T. Groth
DFG	SFB 1538	01.06.2014–31.05.2017	338.000	G. Schmidt G. Woltersdorf
DFG	Spincat	01.10.2014–30.09.2017	398.000	G. Schmidt G. Woltersdorf
BMBF	C ³ Superkon	01.07.2015–31.12.2016	312.000	H. S. Leipner
DFG	Hyperlinsen	01.07.2015–30.06.2018	200.000	J. Schilling
BMBF	Struktursolar II	01.10.2015–30.09.2018	955.000	R. Scheer
DFG	SFB 762 TP B9	01.01.2016–31.12.2019	541.000	G. Schmidt
LSA	Photovoltaik und Photonik	01.08.2016–30.12.2019	1.500.000	J. Schilling D. Lausch
DFG	OSV	01.09.2016–31.08.2019	210.500	G. Schmidt

Industrieprojekte

Titel	Laufzeit	Gesamtbetrag in €	Projektleiter
Entwicklung hochauflösender Elektronenstrahlresists 1	01.07.2009–30.06.2010	23.800	G. Schmidt
Entwicklung von neuen Faserkompositmaterialien für den Einsatz bei Ultraschallsensoren	03.05.2010–30.04.2013	194.100	H. S. Leipner
Dünnschichtsuperkondensatoren	01.09.2010–31.03.2010	50.000	H. Beige H. S. Leipner
Entwicklung hochauflösender Elektronenstrahlresists 2	01.10.2010–31.12.2010	9.520	G. Schmidt
Prozessierung von GaN	01.11.2010–31.12.2014	46.556	H. S. Leipner
Optimierung von multikristallinem Silicium	01.08.2011–31.07.2013	12.500	H. S. Leipner
Charakterisierung epitaxierter Wafer	01.02.2013–30.06.2014	13.300	H. S. Leipner
Effiziente Energiespeicherung auf neuartigen K-Cap-Kondensatoren	01.04.2015–30.06.2018	1.000.000	F. Lange H. S. Leipner

Ausstattung des Nanotechnikums Weinberg

Reinraumbereich

Reinraumtrakt: 200 m² Reinraum der Klasse 100, 410 m² Reinraum der Klasse 10000, 10 m² der Klasse 10

Im Reinraumtrakt des Nanotechnikums Weinberg, der gemeinsam von verschiedenen Arbeitsgruppen der **Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg** sowie vom **Max-Planck-Institut für Mikrostrukturphysik**, dem **Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik Halle** und dem **Fraunhofer-Center für Silizium-Photovoltaik** genutzt wird, werden Geräte für sämtliche zur Mikro- und Nanostrukturierung notwendigen Prozesse zusammengeführt und von den beteiligten Arbeitsgruppen gemeinschaftlich genutzt. Die für das jeweilige Gerät verantwortlichen Gruppe bzw. Eigentümer ist in der folgenden Übersicht in eckigen Klammern angegeben, deren Leiter für eine eventuelle Nutzung angesprochen werden muss. Darüber hinaus werden über das IZM alle für das Betreiben dieser Geräte notwendigen Einrichtungen zur Klimatisierung sowie zur Prozessmediumver- und -entsorgung (Reinstwasseranlage, Gasversorgungs- und warnanlage, Abluft und Abgasreinigungsanlage, Klimaanlage) betreut.

Lithographie

- JEOL JBX 6300FS (Bj. 2008) [MPI für Mikrostrukturphysik]
elektrostatischer Elektronenstrahlbelichter mit Feldemissionskathode und laserinterferometrisch kontrolliertem Probenstisch sowie elektrostatischem Ablenkensystem, Primärstrahlenergie: 100 keV, 8"-Wafer mit Schreibfeld bis zu 6", Driftstabilität (nm/h) → 0, kleinste Strukturgröße 5 nm, Field stitching accuracy 14 nm, Overlay accuracy 8 nm

- Raith PIONEER (Bj. 2010) [Institut für Physik, AG Nanostrukturierte Materialien]
Elektronenstrahlbelichter mit Feldemissionskathode und laserinterferometrisch kontrolliertem Probenstisch, Primärstrahlenergie: 0.5...30 keV, Strahldurchmesser (Auflösung) $\leq 2,5$ nm ($\leq 1,6$ nm), kleinste Strukturgröße ≤ 20 nm, Field stitching accuracy ≤ 50 nm (mean + 2σ), Overlay accuracy (alignment) ≤ 50 nm (mean + 2σ), Laserstage travel range 50 mm \times 50 mm \times 25 mm
- SUSS MJB-3 Mask Aligner [Institut für Physik, AG Nanostrukturierte Materialien]
UV-Belichter mit 365 nm Beleuchtung, Wafergröße max. 3", Auflösung der Belichtung 0,8 μ m, Maskenalignment: $> 0,25$ μ m
- OBDUKAT Nanoimprinter NIL-2,5" [MPI für Mikrostrukturphysik]
Hotembossing max. 250 °C, 70 bar, max Stempel-Substratgröße 65 mm Durchmesser
- Laserinterferenzlithographie [IZM/MPI für Mikrostrukturphysik]
Herstellung regelmäßiger Nanostrukturen mit Perioden von 150...700 nm, max. Probengröße: 50 mm Durchmesser, Laser: 266 nm, 10 mW

Trockenätzen

- Oxford Plasmalab 100 System [ZIK SiLi-nano]
reaktives Ionenätzen, Plasmaquelle RIE/ICP mit max. 300 W/5000 W, Wafer 4" oder 6", zwei Prozesskammern (F- bzw. Cl-Prozesse)
- Plasmaätzter Diener Nano (Bj. 2007) [IZM]
Ätzen, Aktivieren und Reinigen von Oberflächen für nachfolgende Prozesse, Prozess- und Spülgase: O₂, N₂, Ar, Generator LF 40 kHz mit max. 300 W
Nano (Bj. 2007)
- Ionenstrahlätzanlage [Institut für Physik, AG Nanostrukturierte Materialien]
für Argonionen, mit Strahlneutralisierung, Substratrotation und -kühlung sowie SIMS-Endpunktdetektion

Beschichtung

Hochvakuumanlagen zur homogenen Beschichtung ganzer Wafer

- Plasma-Laborsystem Roth & Rau PLS 500P (Bj. 1995) [IZM]
*thermischer Verdampfer,
DC-Sputtermagnetron mit 4"-Target zur Metallbeschichtung im HV*
- Sputteranlage X320 [IZM]
Prozessplatz für max. 3"-Wafer, vorhandene Targetmaterialien Ni, Fe-Ni-Legierungen, Cu
- Elektronenstrahl-Bedampfungsanlage MSBA400 (Bj. 2006) [IZM]
*6-fach Tiegelverdampfer 6 kW, Verdampfermaterialien: Pt, Au, Cr, Ti, Al
Wafer bis 6", Strahlungsheizung bis 350 °C*
- ALD Beneq TFS 200 [Institut für Physik, AG Mikrostrukturbasiertes Materialdesign]
thermische und plasmagestützte Atomic Layer Deposition zur Abscheidung von ZnO und Al₂O₃, Wafer bis 8"
- UHV-Clustertool [Institut für Physik, AG Nanostrukturierte Materialien]
Spezialanlage für kleinere Proben mit insgesamt 4 UHV-Kammern und Zentralmanipulator zur Kombination verschiedener Materialien mit: gepulster Laserdeposition für komplexe Oxide mit Widerstands- und Laserheizung (TSST); organische Molekularstrahlepitaxie für max. 4 organische Halbleiter mit in-situ Metallisierung; Magnetronsputterkammer für magnetoelektronische Anwendungen mit insgesamt 9 Magnetrons; Elektronenstrahlverdampfer

mit fünf Tiegeln (6 kW) und zwei verschiedenen Aufdampfpositionen für geringe thermische Belastung

- Oxford PECVD Plasmalab 100 [Fraunhofer CSP]
Abscheidung von Siliciumnitrid und -oxid, Wafer bis 8"
- Oxford Flexal-ALD (Bj. 2013) [Fraunhofer CSP]
Atomic Layer Deposition von amorphem Silicium (SiH₄/PH₃-Prozess), Al₂O₃, (Prozesse TMA/H₂O, TMA/O₂-Plasma, TMA/Ozon), Wafer bis 6" quadratisch oder 8" rund

Waferprocessing

[IZM]

- Nassbänke für die RCA-Reinigung von 4", 6" und 8"-Wafern
beheizbare PTFE-Prozessbecken mit Medienumlauf und Partikelfiltration, Quick-Dump-Rinser zum Spülen mit LF-Endpunktdetektion, Trockenschleudern Semitool SRD 101 für Prozesscarrier
- Nassbänke mit beheizbaren Quarz- und Kunststoffbecken
Ätzen von Wafern bis 6" sowie Quick-Dump-Rinsern mit LF- Endpunktindikation
- Heizplatten und Spincoater WSD-400
zum Aufbringen homogener Schichten für Photo- bzw. E-Beam-Resists, Spincoater mit Vakuumchucks für Probengrößen von 5×5 mm² bis 3" und max. 8000 rpm
- Spincoater Laurell WS-400 [Institut für Physik, AG Nanostrukturierte Materialien]
zur Schleuderbeschichtung homogener Lackschichten für Photo- bzw. E-Beam-Lithographie, Vakuumchucks für Probengrößen von 5×5mm² bis 3", max. 8000 U/min
- 2 Abzüge für Arbeiten mit HF
- Heizplatten Gestigkeit PZ14 [Institut für Physik, AG Nanostrukturierte Materialien]
Temperaturbereich bis 350 °C

Inspektion und Kontaktierung

- Veeco Dektak 150 [Institut für Physik, AG Nanostrukturierte Materialien]
eindimensionales Profilometer mit TV-Kamera, Andruckkraft Stylus: 1...15 mg, Reproduzierbarkeit: 6 Å (σ bei 100 nm Kante), Höhenbereich: 524 μm, max. Scanlänge: 55 mm
- Zeiss Axiotron [IZM]
lichtmikroskopische Waferinspektion
- Magnetooptische Kerrspektroskopie [Institut für Physik, AG Nanostrukturierte Materialien]
Charakterisierung ferromagnetischer Schichten bei Zimmertemperatur, max. Probengröße: 1,5×1,5 cm², Magnetfeldbereich: ±50 mT, max. Winkelauflösung: 0,005°
- Drathbonder tpt HB05 [Institut für Physik, AG Nanostrukturierte Materialien]
wedge/wedge oder ball/wedge bonding zur Kontaktierung strukturierter Proben

Laborbereiche des IZM

Elektronenmikroskopie

- STEM VG HB 501 UX (Bj. 1990) [IZM]
analytisches Raster-Transmissionselektronenmikroskop mit kalter Feldemissionskathode, Elektronenenergieverlustspektrometer (Gatan ENFINA 1000) und EDX-Option, Primärstrahlenergie: 100 keV, max. Ortsauflösung: ca. 1 nm (Analytik), EELS-Energieauflösung 0,4 eV (typisch)
- TEM LEO 912 OMEGA (Bj. 2001) [Institut für Physik, AG Werkstoffwissenschaften]
abbildendes Transmissionselektronenmikroskop mit Energiefilter und LaB₆-Kathode, Primärstrahlenergie: 80...120 keV, 2k-Slow Scan CCD-Kamera, Punktauflösung 3.7 Å (TEM-Mode)
- Philips ESEM XL 30 FEG (Bj. 1999) [IZM]
Rasterelektronenmikroskop mit Feldemissionskathode und EDX-Option (SiLi-Detektor von EDAX) zur hochaufgelösten Oberflächenabbildung von Proben auch unter Gasatmosphäre (ESEM-Mode), Primärstrahlenergie: 0,5 bis 30 kV, Druckbereich: Hochvakuum oder 0,3...10 Torr (ESEM), Temperaturbereich: -5 bis 60 °C, Strahldurchmesser bei 30 kV: 2 nm, bei 1 kV: 5 nm
- Rasterelektronenmikroskop JSM 6400 (Bj. 1995) [IZM]
Rasterelektronenmikroskop mit LaB₆-Kathode und Kathodolumineszenzspektrometer sowie EBIC-Option (point electronic) zur mikroskopischen Charakterisierung elektronischer Eigenschaften, Kühl-/Heiztisch, Vierpunktmessung

Elektronenmikroskopische Präparation

[IZM]

- Fadensägen, Diamantpräzisionsäge, Ultraschallbohrer, Schleif- und Poliergeräte, Dimpler
- Precision Ion Polishing System Gatan 691
Ar-Ionenätzer
- Gatan Duomill 600
Ar-Ionenätzer, Probenkühlung mit flüssigem Stickstoff
- Cressington 208 carbon coater
Kohlenstoffbeschichtung
- Cressington 208HR sputter coater
Metallbeschichtung
- Cressington 208 carbon coater
Kohlenstoffbeschichtung
- Gatan Precision Etching and Coating System PECS (Bj. 2013)
kombiniertes Ätz- und Beschichtungssystem zum Polieren und Freilegen von Oberflächen, Böschungätzverfahren, hochauflösende in-situ-Ionen-Sputterbeschichtung

Optische Charakterisierung

- Lichtmikroskop Leica DM RXE (Bj. 1995) [IZM]
Lichtmikroskop mit TV-Kamera zur Hellfeld-, Dunkelfeld- und Polarisationsmikroskopie in Verbindung mit einem SIS analysis Bildverarbeitungssystem, Extended focal imaging, differentieller Interferenzkontrast
- Ramanmikroskop LabRam Dilor (Bj. 1999) [IZM]

zur Bestimmung der chemischen Zusammensetzung, Kristallinität, Dotierung, Relaxation etc. von ramanaktiven Proben, räumliche Auflösung: 1...10 μm , spektrale Auflösung: 2...6 cm^{-1}

- spektrales Ellipsometer J. A. Woollam M-2000 (Bj. 2007) [IZM]
zur Bestimmung von Schichtdicke, Homogenität sowie komplexem Brechungsindex dünner Schichten
- Zeiss Auflichtmikroskop Axio Imager [IZM]
Kontrast: HF/DF/DIC, Digitalkameraaufsatz zur Bildaufnahme, Objektive 5 \times /20 \times /100 \times
- Ramanspektrometer Horiba LabRAM HR Evolution VIS-NIR (Bj. 2013) [ZIK Sili-nano]
Bestimmung der chemischen Zusammensetzung, Kristallinität, Dotierung, Relaxation etc. von ramanaktiven Proben; Anregungslaser: 532 nm und 633 nm; polarisationsabhängige Messungen; oberflächenverstärkte Ramanspektroskopie

Rasterkraftmikroskopie

- Pacific Nanotechnology Nano-R (Bj. 2005) [IZM]
Contact mode, Close Contact mode, Ortsauflösung: 2 nm
- Digital Instruments Nanoscope IV Dimension 3000 [Institut für Physik, AG Werkstoffwissenschaften]
Contact mode, Close Contact mode sowie Phase Contrast mode zur Unterscheidung der Materialsteifigkeit, conductive AFM mit TUNA-Modul
- DME Nanotechnologie DS95-50 AFM (Bj. 2013) [IZM]
Multimode-AFM (contact mode, close contact modes, phase contrast, STM-mode), Abbildung atomarer Stufen, SNOM

Elektrische & thermoelektrische Charakterisierung

[IZM]

- Spitzenmessplatz mit Mikromanipulatoren
temperaturabhängige Bestimmung der elektrischen Leitfähigkeit und des Seebeckkoeffizienten im Hochvakuum, Temperaturbereich 10...300 °C, Vierspitzenmethode
- 2 van-der-Pauw-Messplätze
elektrische Leitfähigkeit, Seebeckkoeffizient, Temperatur bis 100 °C
- Hallmessplatz
Halleffektmessungen bei Raumtemperatur

Probenpräparation

- 3 Hochvakuumanlagen B30, HVT Dresden [IZM]
thermische Bedampfung mit Au, Ag, Al, Cr, Ti
- Sputteranlage B30, HVT Dresden [IZM]
zwei Magnetrons für Abscheidung von Si/Ge
- Rein-Werkbänke ISO-Klasse 7 mit Spincoater und Hotplate zur Probenbelackung [IZM]
3 Digestorien, davon 2 für Arbeiten mit Flusssäure
- FEI FIB Versa 3D (Bj. 2013) [ZIK Sili nano]
Universelles Focused Ion Beam-Gerät zur Nanopräparation und Inspektion, Schottky-Feldemitter-Kathode 0,2...30 kV, bis 1 nm Auflösung, Hochstromionensäule mit Ga-Ionen-Quelle, 0,5...30 kV, 7 nm Ionenstrahlaufösung bei 30 kV
- Linearbeschichtungsanlage [IZM]
Rakelbeschichtung von dünnen Polymerfolien mit Strahlungs- und Konvektionstrockner

Forschungsschwerpunkte und -Highlights der Kooperationen anderer Universitätsgruppen mit dem IZM

Die folgende Zusammenstellung umfasst eine Übersicht über die Highlights der Kooperationen der letzten Jahre. Die Liste der Highlights wurde aus Sicht der Kooperationspartner zusammengestellt. Im Anschluss finden sich die Einzelberichte für das Jahr 2015. Weitere Einzelberichte mit Details sind den Jahresberichten 2010–2014 zu entnehmen. Die Jahreszahlen sind jeweils angegeben.

AG Positronenannihilation

Die Drittmittelaktivitäten von R. Krause-Rehberg (apl. Prof. und Praktikumsleiter am Institut für Physik) laufen direkt am IZM im Laborbereich Positronenannihilation/Kristalldefektphysik.

1. Identifikation von Leerstellendefekten nach Cu-Diffusion in GaAs

Die Leerstellen die nach Ausdiffusion von Cu in GaAs gefunden werden, konnten durch Positronen-Dopplerkoinzidenz-Messungen als Komplexe der Form $V_{\text{Ga}}\text{-Cu}_{\text{Ga}}$ identifiziert werden. Die Defekteigenschaften in Zn-diffundiertem GaAs sind, unter Verwendung der Positronenlebensdauerspektroskopie in Verbindung mit der Dopplerverbreiterung und der Koinzidenzspektroskopie monoenergetischer Positronen bestimmt worden. Positronenannihilationsmessungen wurden ebenfalls zur Identifizierung und zur Untersuchung der thermischen Stabilität leerstellenartiger Defekte in GaN-Volumenkristallen eingesetzt, die durch Kupfer hervorgerufen wurden.

Siehe **Jahresberichte Nanotechnikum Weinberg 2010, 2012**

M. Elsayed *et al.* **Cu diffusion-induced vacancy-like defects in freestanding GaN**. *New J. Phys.* **13** (2011) 13029. DOI 10.1088/1367-2630/13/1/01302

M. Elsayed *et al.* **Divacancy complexes induced by Cu diffusion in Zn-doped GaAs**. *Eur. Phys. J. B* **86** (2013) 1. DOI 10.1140/epjb/e2013-40414-7

M. Elsayed *et al.* **Identification of defect properties by positron annihilation in Te-doped GaAs after Cu in-diffusion**. *Phys. Rev. B* **84** (2011) 195208.

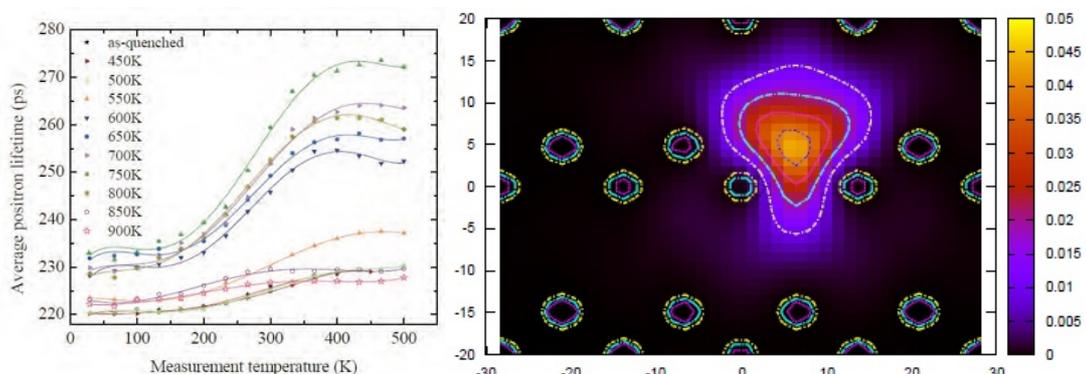


Abb. 1: Mittlere Positronenlebensdauer bei der Ausdiffusion von Cu in GaAs nach der Eindiffusion und dem Auflösen von ca. $6 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ Cu (*links*). Lokalisierte Positronen Wellenfunktion im $V_{\text{As}}\text{-Zn}_{\text{Ga}}$ Komplex in GaAs entsprechend den theoretischen Berechnungen (*rechts*).

2. Positronenannihilation-Spektroskopie zur Identifizierung von Defekten in photo-voltaischen $\text{Cu}(\text{In}_x\text{Ga}_{1-x})\text{Se}_2$ -Dünnschichtsolarzellen

Mit Hilfe der Positronenannihilation wurden leerstellenartige Punktdefekte in Dünnschichtsolarzellen charakterisiert. Zur Verbesserung der Tiefenauflösung der Positronenannihilations-Spektroskopie mittels monoenergetischen Positronen, wird die Probenoberfläche während der Messung mittels Ar^+ -Ionen abgetragen.

Fördermittelgeber: BMBF (Projekt POSIANALYSE, 05K13NHA, 01.07.2013–31.12.2016, 256.000 €)

Siehe IZM-Jahresberichte 2013, 2014

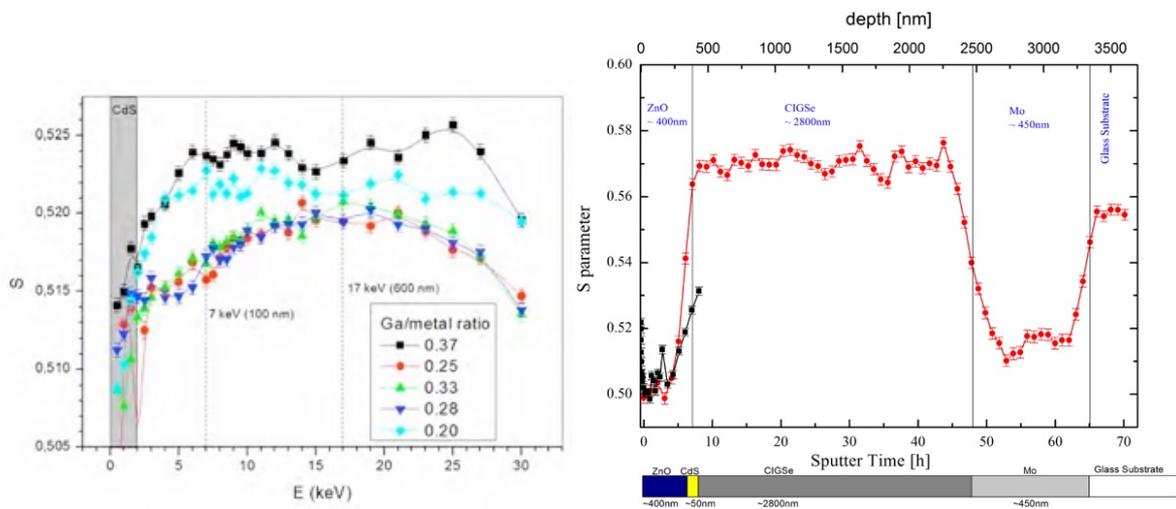


Abb. 2: Aufgenommene S -Parameter-Kurven in Abhängigkeit des Ga/Metall-Verhältnisses bei der Herstellung der CIGSe-Solarzellen (*links*). Tiefenabhängige Defektuntersuchung einer CIGSe-Solarzelle durch *in-situ*-Sputterabtrag der Oberfläche (*rechts*).

3. Untersuchungen an dünnen low- k -Schichten mit Hilfe der Positronen-Annihilation-Spektroskopie

Zur Untersuchung von dünnen low- k -Schichten wurde das monoenergetische Positronenstrahlensystem POSSY verwendet. Aus dem Verhältnis der $3\gamma/2\gamma$ -Annihilation von Positronium konnten Aussagen über das Vorhandensein von Poren und offenen Porensystemen getroffen werden. Die technologisch interessanten Proben wurden ebenfalls untersucht in ersten Experimenten mit dem MePS (Mono-energetic Positron System) der ELBE-Positronenquelle EPOS, als großer gemeinsamer Messplatz der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg und des Helmholtzforschungszentrums Dresden-Rossendorf. Das EPOS-System erlaubt Positronenlebensdauerspektroskopie von Dünnschichten.

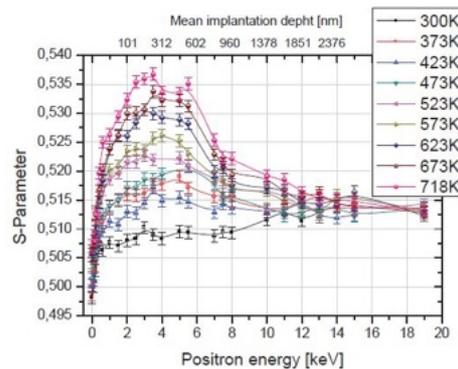


Abb. 3: Aufgenommene S -Parameter Kurven in Abhängigkeit von der Temperatur

Fördermittelgeber: BMBF (Projekte POSIMETHOD 05K10NHA 01.07.2010–30.06.2013 177.000 € und POSIANALYSE 05K13NHA, 01.07.2013–31.12.2016, 256.000 €)

Siehe **Jahresbericht Nanotechnikum Weinberg 2011**

M. Jungmann *et al.* **First experiments with MePS**. J. Phys. Conf. Ser. **443** (2013) 012088. DOI 10.1088/1742-6596/443/1/012088

M. Butterling *et al.* **Gamma-induced positron spectroscopy (GiPS) at a superconducting electron linear accelerator**. Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B **269** (2011) 2623.

AG Silicon-to-Light am ZIK Sili-nano

1. Frequenzverdoppelung in inhomogen verzerrten Siliziumwellenleitern

Im Rahmen dieses Projektes wird die Erzeugung einer nichtlinearen Suszeptibilität 2. Ordnung ($\chi^{(2)}$) im Silizium durch inhomogene mechanische Verzerrung untersucht, die zu einer Symmetriebrechung der Si-Kristallstruktur führt. Dazu werden verspannte SiO_2 und SiN_x -Deckschichten auf Si-Wellenleitern abgeschieden und die Erzeugung des nichtlinear optisch generierten, frequenzverdoppelten Lichtes im nahen Infrarot nachgewiesen. Dabei zeigte sich, dass zusätzlich zur inhomogenen Verzerrung auch statische elektrische Felder aufgrund von fixen Grenzflächenladungen entscheidend zur Symmetriebrechung und $\chi^{(2)}$ -Erzeugung beitragen. Diese Ergebnisse sind für die weitere Entwicklung hin zu einer aktiven Silizium-Photonik von Bedeutung.

Fördermittelgeber: BMBF (03Z2HN12)

Siehe **Jahresbericht Nanotechnikum Weinberg 2012**

C. Schriever *et al.* **Second order optical nonlinearity in silicon waveguides – inhomogeneous stress and interfaces**. Adv. Opt. Mater. **3** (2015) 129.

M. Cazzanelli, J. Schilling: **Second order optical nonlinearity in silicon by symmetry breaking**. Appl. Phys. Rev. **3** (2016) 011104.

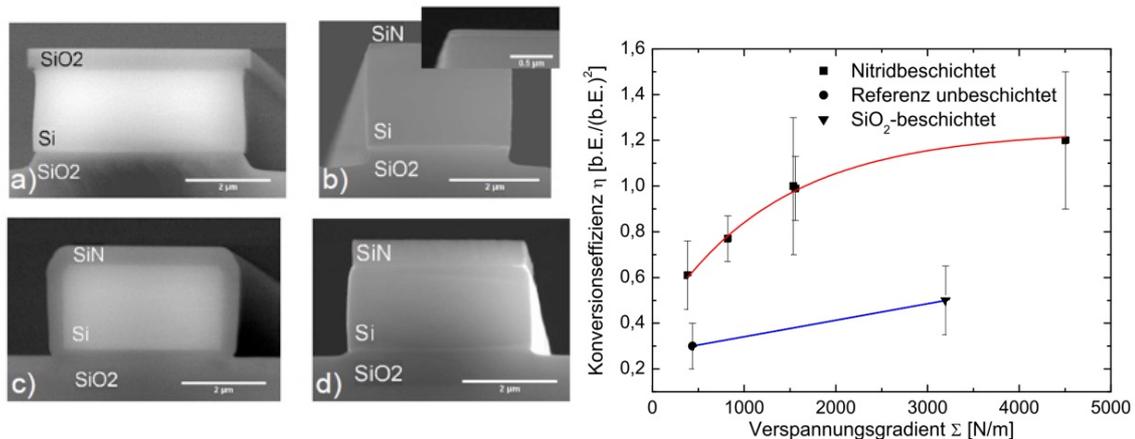


Abb. 1: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen von Si-Wellenleiterquerschnitten, die mit verschiedenen verspannten Deckschichten versehen wurden (*links*). Anstieg der Konversionseffizienz für frequenzverdoppeltes Licht in Abhängigkeit von der inhomogenen Verspannung/Verzerrung. Der Offset für nitridbeschichtete Wellenleiter ist auf den zusätzlichen Einfluss der Grenzflächenladungen zurückzuführen (*rechts*).

2. Lumineszenzerhöhung durch periodisch angeordneten plasmonische Nanoantennen

Aufgrund ihrer intensiven plasmonischen Resonanzen können Metallpartikel als effiziente Nanoantennen im sichtbaren und nahinfraroten Spektralbereich fungieren. Werden diese dann noch periodisch angeordnet kommt es für Wellenlängen, die in etwa dem Abstand der Partikel entsprechen zur Ausbildung von kollektiven Oberflächengitterplasmonenresonanzen, die zu einer weiteren Feldkonzentration im Bereich der Partikel führen. Diese konnte für die Erhöhung der Lumineszenz von PbS-Nanokristallen im nahen IR ausgenutzt werden, die in der Umgebung der Metallpartikel platziert wurden. Eine Anwendung zur Lumineszenzerhöhung im Bereich der integrierten Photonik erscheint damit möglich.

Fördermittelgeber: BMBF (03Z2HN12)

Siehe **Jahresberichte Nanotechnikum Weinberg 2013, 2014**

N. Sardana *et al.* **Localized surface plasmon resonance in the IR.** Opt. Exp. **24** (2016) 254.

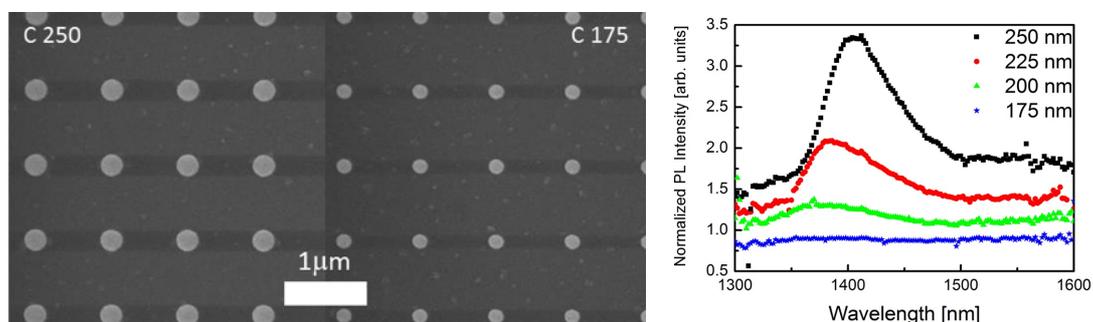


Abb. 2: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme von periodisch angeordneten Goldscheibchen als Nanoantennen (*links*). Erhöhung der Lumineszenz von PbS-Nanokristallen im Bereich der plasmonischen Gitterresonanz (*rechts*).

AG Biomedizinische Materialien des Instituts für Pharmazie

1. Find & Bind – „Mastering sweet cell-instructive biosystems by copycat nano-interaction of cells with natural surfaces for biotechnological applications”

Glykane besitzen vielfältige Funktionen im Organismus, die auch für Implantate und Biosensoren interessant sind. Deshalb wurde hier eine chemische Aktivierung von Glykanen mit deren homogener oder nanostrukturierter Organisation auf Materialoberflächen kombiniert, um den Effekt auf das Verhalten von Zellen zu untersuchen.

Fördermittelgeber: Europäische Union (FP7-NMP-2008-SMALL-2)

O. Guillame-Gentil *et al.* *Engineering the extracellular environment: Strategies for building 2D and 3D cellular structures.* Adv. Mater. **22** (2010) 5443.

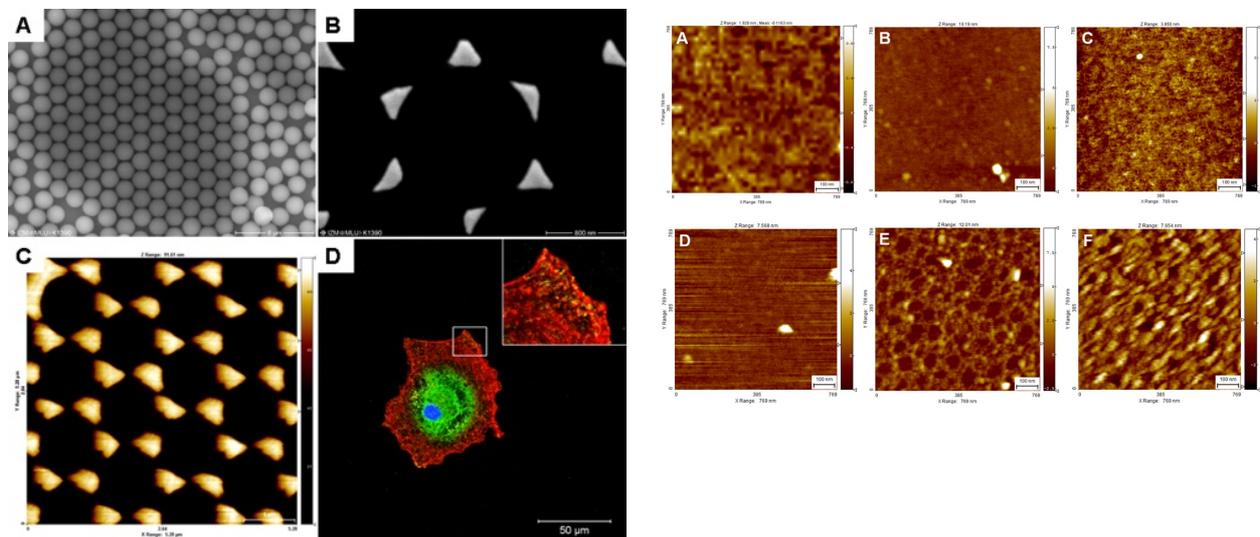


Abb. 1: (*links*) Geordnete Nanostrukturen und ihr Einfluss auf Zellen: (A) 1390 nm große Polystyrolpartikel (Skala: 6 μm) führen nach Bedampfung mit Gold zu tetraedrischen Strukturen, die mit Rasterelektronen- (B; Skala: 800 nm) und Rasterkraftmikroskopie (C; Skala: 1 μm) visualisiert wurden. Die Nanostrukturen zeichnen sich deutlich im Zellskelett humaner Hautfibroblasten ab (Insert in D; Skala: 50 μm).

Abb. 2: (*rechts*) Rasterkraft-Mikroskopie-Aufnahmen ($0,7 \times 0,7 \mu\text{m}^2$) von unterschiedlich beschichteten Siliziumoberflächen: A – aminofunktionalisiert; B – Hyaluronsäure (HS) auf A; C – Aldehyd-HS auf A; D – vinylfunktionalisiertes Silizium; E – HS auf D; F – thiolierte HS auf D.

2. Effekt der Kombination von Nanostrukturierung und Polyelektrolytmultischichten auf die Differenzierung von Stammzellen

Das Verhalten von menschlichen Zellen wird durch biochemische und mechanische Stimuli der Umgebung gesteuert. Hier wurden nanostrukturierte Oberflächen durch Laser-Interferenz-Lithographie (LIL) hergestellt und die Goldstrukturen zusätzlich mit einer viskoelastischen Beschichtung versehen, um deren Einfluss auf die Differenzierung mesenchymaler Stammzellen zu untersuchen.

Fördermittelgeber: Deutsche Forschungsgemeinschaft (GR1290/10-1)

M. S. Niepel *et al.* **Nanoscaled surface patterns influence adhesion and growth of human dermal fibroblasts.** *Langmuir* **29** (2013) 13378.

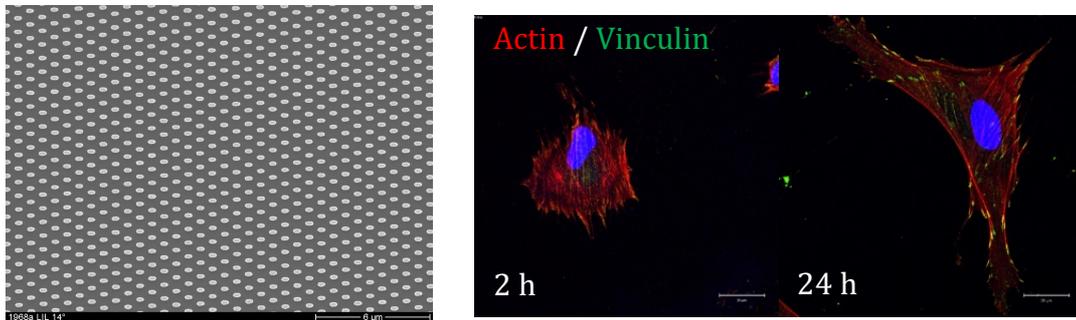


Abb 3: Nanostrukturen, die mit der Laserinterferenzlithographie bei einem Einfallswinkel von 14° hergestellt wurden (*links*) und humane mesenchymale Stammzellen nach 2 und 24 Stunden Adhäsion auf diesen Nanostrukturen (*rechts*).

3. Application of layer-by-layer technique and biomineralization on surfaces to promote osteogenic differentiation of mesenchymal stem cells

Die Layer-by-Layer-Technik (LbL) ist ein Verfahren zur Herstellung von Multischichten aus Polyelektrolyten. Bestandteile der Zellumgebung wie Proteine und Glykosaminoglykane können mit LbL zu nanostrukturierten Oberflächen komplexiert werden, die durch Struktur und mechanische Eigenschaften das Verhalten von Stammzellen beeinflussen.

Fördermittelgeber: Chinese Scholarship Council

M. Zhao *et al.* **Improved stability and cell response by intrinsic cross-linking of multilayers from Collagen I and oxidized glycosaminoglycans.** *Biomacromolecules* **15** (2014) 4272.

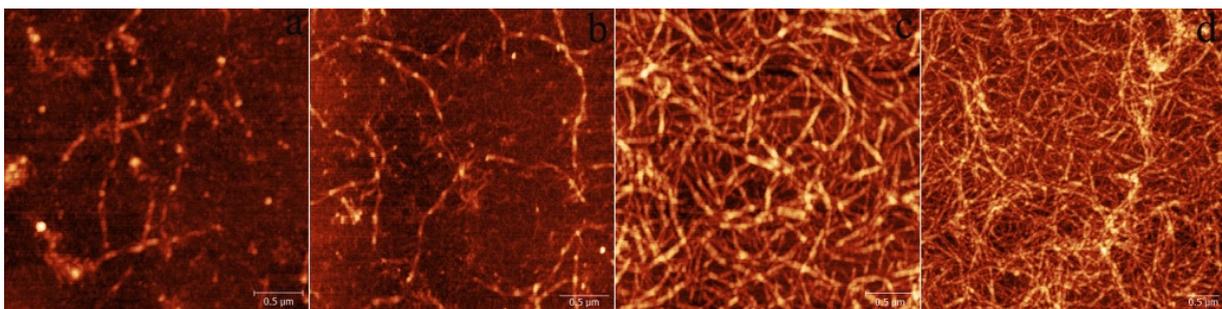


Abb. 4: Rasterkraftmikroskopie der terminalen Kollagenschicht, die aus (a) nativer Hyaluronsäure (nHA) und Kollagen I (Col I), (b) oxidierter HA (oHA) und Col I, (c) aus nativem Chondrotinsulfat (nCS) und Col I sowie oxidiertem CS (oCS) und Col I gebildet wurden [(a) P(HA-Col I)₄, (b) P(oHA-Col I)₄, (c) (CS-Col I)₄, (d) P(oCS-Col I)₄, Größe: (3×3) μm^2 .]

4. Stimuli-responsive multilayer systems by the application of thiolated polyelectrolytes for tissue engineering applications

Die mechanische Eigenschaften und Stabilität von Multischichten können durch intrinsische Vernetzung gesteuert werden. Hier wurden thiolierter Polysaccharide für die Formierung von Multischichten durch LbL

untersucht, die durch Ausbildung von Disulfidbrücken eine höhere Stabilität und eine verbesserte Biokompatibilität solcher Beschichtungen für medizinische Anwendungen aufweisen.

P. Esmailzadeh *et al.* **Synthesis of thiolated polysaccharides for formation of polyelectrolyte multilayers with improved cellular adhesion.** Carbohydrate Polymers, under review (2016).

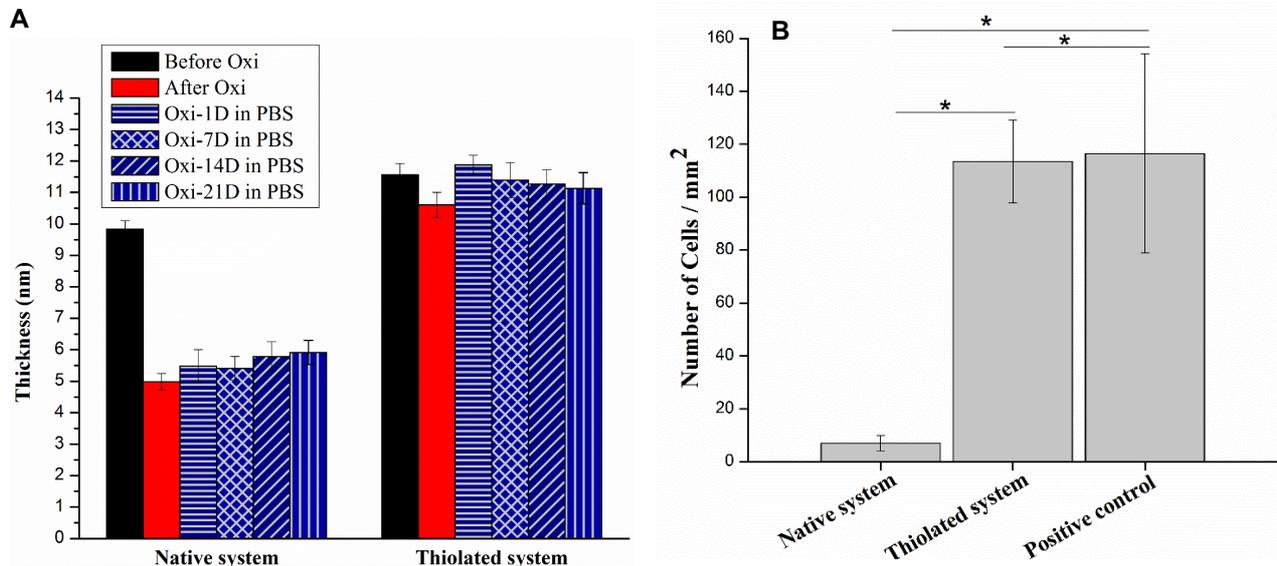


Abb. 5: (A) Bestimmung der Dicke von Multischichten aus nativen und thiolierten Polysacchariden mit Ellipsometrie. (B) Vergleich der Adhäsion von Keratinozyten auf Multischichten aus nativen und thiolierten Polysacchariden im Vergleich zu Glas als positive Kontrolle.

AG Photovoltaik des Instituts für Physik

Strukturierte Rückkontakte für anorganische Dünnschichtsolarzellen

Mikro- bzw. nanostrukturierte Rückkontakte in $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$ (CIGS) Dünnschichtsolarzellen haben das Ziel, die Lichteinkopplung zu erhöhen. Hierfür wurde SiO_2 am Rückkontakt, strukturiert mittels Laserinterferenzlithographie (siehe Abb.1) aufgebracht. Der solare Wirkungsgrad verbesserte sich um 50% (Abb. 2).

Fördermittelgeber: BMBF (Projekte StrukturSolar 03SF0417B und StrukturSolar II 03EK3570B)

E. Jarzembowski *et al.* **The influence of sodium on the molybdenum/ $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$ interface recombination velocity, determined by time resolved photoluminescence.** Appl. Phys. Lett. **107** (2015) 051601.

E. Jarzembowski *et al.* **Quantitative analysis of CIGSe PERC solar cells by laser interference lithography.** Thin Solid Films, under review (2016).

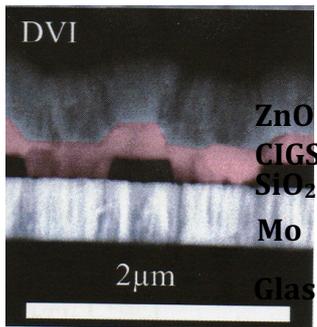


Abb. 1: Rasterelektronenmikroskopaufnahme einer 190 nm CIGS-Schicht auf Glas/Molybdän und strukturiertem SiO₂.

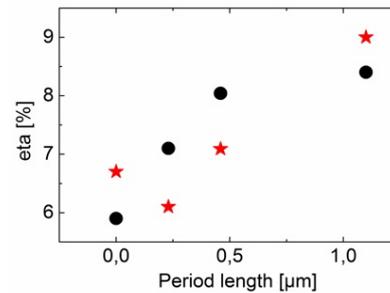


Abb. 2: Energieumwandlungswirkungsgrad ultradünner CIGS Solarzellen ohne Strukturierung (0 nm) und Strukturierung mit Periodenlängen 230, 460 und 1100 nm. Gezeigt sind zwei Serien mit SiO₂ Schichtdicken 60 nm (Punkte) und 130 nm (Sterne).

AG Technische Chemie Erneuerbarer Energien des Instituts für Chemie

1. Hierarchisch strukturierte Elektroden durch bottom-up-Synthesen

Über die wiederholte elektrochemische Abscheidung von Fe-Partikeln, an denen mittels chemischer Gasphasenabscheidung CNTs gewachsen werden, gelingt die Erzeugung 3-dimensionaler hierarchisch strukturierter Elektroden. Über die Abscheidebedingungen lassen sich die strukturellen Eigenschaften der strukturierten Elektroden einstellen.

Fördermittelgeber: DFG (BR2244/7-1)

Siehe **Jahresberichte Nanotechnikum Weinberg 2011, 2013, 2014**

P. Wang *et al.* **Pt supported on nanostructured NCNTs/RGO composite electrodes for methanol electrooxidation.** ChemElectroChem **2** (2015) 1396.



Abb. 1: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme von Pt-dekorierten CNTs, die auf Graphen-modifiziertem Kohlenstoffvlies abgeschieden wurden.

2. Kern-Schale-Elektrokatalysatoren für die elektrokatalytische Sauerstoffreduktion

Katalysatoren aus einem Pt-umhüllten Kern eines Zweitmetalls zeigen hervorragende elektrokatalytische Eigenschaften. Im Projekt werden verschiedene Synthesewege zu Kern-Schale-Katalysatoren untersucht und die Katalysatoren strukturell und bezüglich ihrer elektrochemischen Eigenschaften charakterisiert.

Fördermittelgeber: DFG (BR2244/9-1)

H. El-Deeb, M. Bron: *Electrochemical dealloying of PtCu/CNT electrocatalysts synthesized by NaBH₄-assisted polyol-reduction: Influence of preparation parameters on oxygen reduction activity*. *Electrochim. Acta* **164** (2015) 315.

H. El-Deeb, M. Bron: *Microwave-assisted polyol synthesis of PtCu/carbon nanotube catalysts for electrocatalytic oxygen reduction*. *J. Power Sources* **275** (2015) 893.

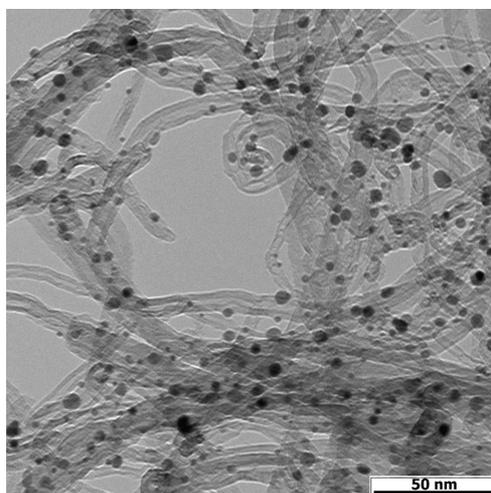


Abb. 2: TEM-Aufnahme fein verteilter PtCu-Nanopartikel auf CNTs

3. Transmissionselektronenmikroskopische Untersuchung von Elektrokatalysatoren

Eine Vielzahl der Projekte der AG befasst sich mit der Synthese, Charakterisierung und elektrochemischen Testung metallischer und oxidischer Nanopartikel, die häufig auf einem Trägermaterial aufgebracht werden. In Kooperation mit dem IZM werden die morphologischen Eigenschaften dieser Materialien mittels TEM untersucht.

A. B. A. A. Nassr *et al.* *PtNi supported on oxygen functionalized carbon nanotubes: In depth structural characterization and activity for methanol electrooxidation*. *Appl. Catal. B: Environmental*, **142–143** (2013) 849.

A. B. A. A. Nassr *et al.* *Electrocatalytic oxidation of formic acid on Pd/MWCNTs nanocatalysts prepared by the polyol method*. *Electrochim. Acta* **102** (2013) 202.

D. Z. Mezalira, M. Bron: *High stability of low Pt loading high surface area electrocatalysts supported on functionalized carbon nanotubes*. *J. Power Sources* **231** (2013) 113.

AG Nanostrukturierte Materialien

1. Yttriumeisengranat-Schichten mit extrem niedriger Dämpfung

Yttriumeisengranat (YIG) wurde mittels gepulster Laserdeposition bei Raumtemperatur auf Galliumgadoliniumgranat (GGG) abgeschieden. Die zuerst amorphen Filme werden nach Ausheilen in Sauerstoff monokristallin und nach allen angewandten Untersuchungsmethoden defektfrei. Die Filme weisen in der Ferromagnetischen Resonanz die niedrigsten weltweit in dünnen YIG-Schichten gemessenen Dämpfungen auf.

Fördermittelgeber: DFG (SFB 762/TP B9)

Siehe **Jahresbericht Nanotechnikum Weinberg 2014**

C. Hauser *et al.* **Yttrium iron garnet thin films with very low damping obtained by recrystallization of amorphous material.** *Sci. Rep.* **6** (2016) 20827. DOI 10.1038/srep20827

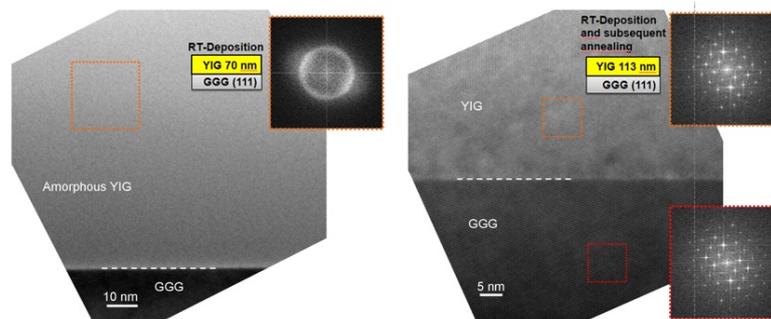


Abb. 1: Transmissionselektronenmikroskopische Aufnahme von amorphem YIG auf GGG (*links*) und der ausgeheilten Schichten (*rechts*). Die Fouriertransformationen in den roten Rahmen zeigen die Kristallinität.

2. Modifikation von Tunnelbarrieren an der LSMO-AIQ₃-Grenzfläche durch Spannungspulse

Organische Spinventile mit nur einer magnetischen Elektrode (LSMO) wurden hergestellt. Die Bauelemente zeigen deutlichen anisotropen Tunnelmagnetowiderstand (TAMR). Durch Spannungspulse kann der Widerstand der Bauelemente reversibel um zwei Größenordnungen erhöht werden, wobei zugleich der TAMR von 0,8 auf 18 % steigt.

Fördermittelgeber: EU (FP7-Projekt HINTS)

Siehe **Jahresbericht Nanotechnikum Weinberg 2013**

M. Grünewald *et al.* **Voltage-controlled oxide barriers in organic/hybrid spin valves based on tunneling anisotropic magnetoresistance.** *Phys. Rev. B* **90** (2014) 205208.

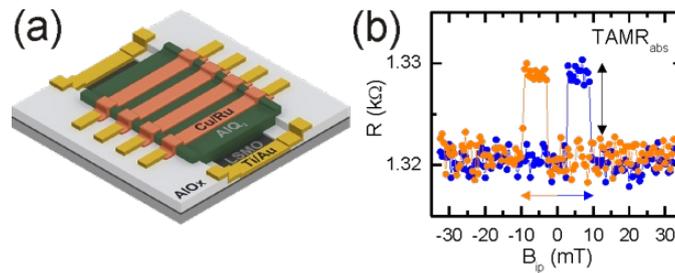


Abb. 1: Schematische Darstellung der LSMO/AIQ₃/Cu-Struktur (*links*). TMR-Signal vor dem ersten elektrischen Schalten (*rechts*).

3. Herstellung von Organischen Spin-Ventilen mit lateralen Abmessungen im sub-Mikrometer-Bereich

Durch Entwicklung eines neuen Fertigungsprozesses ist es gelungen organische Spinventile mit lateralen Abmessungen von 500 nm herzustellen. Eine statistische Auswertung macht deutlich, dass der Spinventileffekt durch Tunnelmagnetowiderstand an Pinholes entsteht und nicht wie häufig vermutet auf Spininjektion beruht. Beobachtungen an großflächigen Systemen zeigen aber häufig nur eine Mittelung über eine Vielzahl solcher Pinholes, die den Eindruck homogenen Spintransports durch den organischen Halbleiter vermitteln.

Fördermittelgeber: EU (FP7-Projekt HINTS)

Siehe **Jahresbericht Nanotechnikum Weinberg 2013**

R. Göckeritz *et al.* **Nanosized perpendicular organic spin-valves**. Appl. Phys. Lett. **106** (2015) 102403. DOI 10.1063/1.4914830

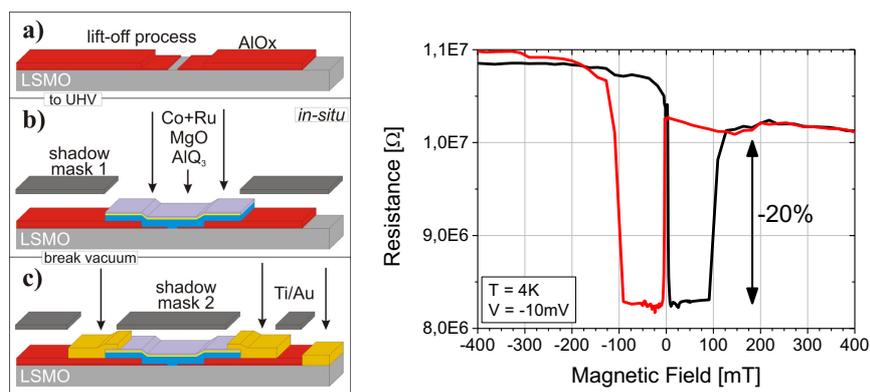


Abb. 1: Schematische Darstellung der LSMO/AIQ₃/Cu-Struktur (*links*). TMR-Signal vor dem ersten elektrischen Schalten (*rechts*).

Assessment of physiological stability of a new thiolated polysaccharide multilayer model

Pegah Esmailzadeh¹, Alexander Köwitsch¹, Frank Heyroth², Bodo Fuhrmann², Georg Schmidt², Thomas Groth¹

¹Biomedical Materials Group, Institute of Pharmacy, Martin Luther University Halle-Wittenberg, D-06099 Halle

²Interdisciplinary Center of Materials Science, Martin Luther University Halle-Wittenberg, D-06099 Halle

Interdisciplinary sciences are increasingly approaching maturity on the molecular and macroscopic length scales, shifting importance toward new nanoscale materials and nano-organized systems. The so-called layer-by-layer (LbL) deposition technique is a more recent approach toward nanoscale multimaterial architecture [1]. The LbL approach consists of alternating deposition of polyelectrolytes that self-assemble on the material's surface [2].

In this study, two naturally derived polymers, chitosan (Chi) and chondroitin sulfate (CS), were chosen as model for polysaccharide-based LbL films to study the stability in physiological medium and mechanical resistance. The problem of decomposition should be overcome by chemical cross-linking. Therefore, the native polymers were chemically thiolated at the amino residues of Chi (t-Chi) and the carboxyl groups of CS (t-CS) to generate reactive sulfhydryl groups which are able to form intermolecular disulfide bonds to support multilayer stability. Multilayers of 5 bilayers on silicon substrates were prepared by alternating adsorption of t-Chi and t-CS with t-CS as terminal layer.

Assessment of multilayer stability with ellipsometry

The film thickness of 10-layer films in PBS buffer (pH 7.4) was monitored at specific time points (1, 7, 14 and 21 days). Therefore, spectroscopic ellipsometry (M-2000V, J.A. Woollam Company, Lincoln, NE, USA), equipped with WVase32 software was applied. Cleaned silicon was used as reference substrate. A Cauchy model was used to extract the optical constants of the thiolated films. The values of the Cauchy layer were obtained by taking the mean value of the fitted parameters in

thicker thiolated films with 20 and 30 layers as it was not possible to obtain reliable fits to the ellipsometry data on the basis of 10-layer films. The test was conducted under dry conditions (*ex situ*) over a wavelength range of $\lambda = 400$ to 1000 nm and angles of incidence ranging from 55° to 70° . Samples were provided in triplicate while for each sample 5 spots were measured and statistics as mean \pm standard deviation were calculated.

As depicted in Figure 1, the thickness of the t-Chi/t-CS multilayer films shows that incubation of multilayers in PBS medium up to 21 days did not result in any further significant changes in thickness. This demonstrates very well the stability of such multilayer systems made of modified polysaccharides in physiological environments in the absence of enzymes and cells for a time period of 3 weeks.

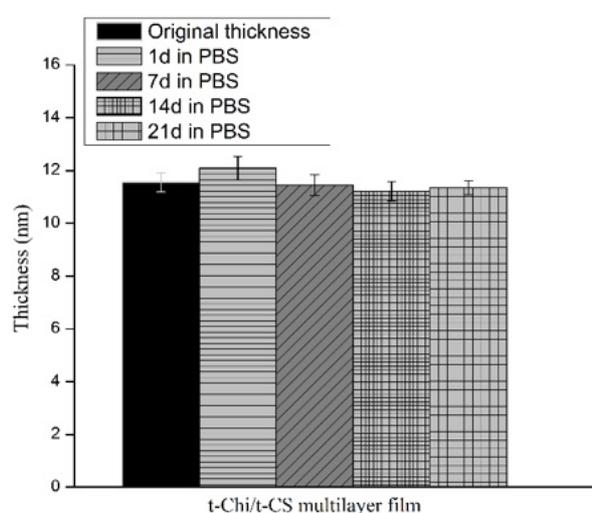


Figure 1: Stability tests of thiolated multilayer film stored in PBS (pH 7.4) showing the layer thickness of t-Chi/t-CS multilayers after an incubation time of 1, 7, 14 and 21 days in PBS.

- [1] G. Decher: Multilayer Thin Films: Sequential Assembly of Nanocomposite Materials, Second Edition (2012). Wiley-VCH, Weinheim.
- [2] Boudou, T., Crouzier, T., Ren, K., Blin, G., Picart, C.; Adv. Mater. 22 (2010) 441–467.

Relevant congress contributions 2015 as part of the collaboration:

Esmailzadeh P, Köwitsch A., Fischer S., Groth T., Synthesis of thiolated glycosaminoglycans and formation of bioactive polyelectrolyte multilayers with intrinsic cross-linking capability, 7th International BioNanoMed conference, 6th - 8th April 2016, Krems/ Danube, Austria

Reduced inflammatory responses to biomaterials with GAG-polymeric drug conjugate immobilization in a multilayer system

Hala Al-Khoury¹, Frank Heyroth², Frank Syrowatka², Chandralekha Chatterjee¹, Maria Rosa Aguilar³, Juilo San Román³, Georg Schmidt², Thomas Groth¹

¹Biomedical Materials Group, Institute of Pharmacy, Martin Luther University Halle-Wittenberg, 06099 Halle

²Interdisciplinary Center of Materials Science, Martin Luther University Halle-Wittenberg, D-06099 Halle

³Biomaterials Group, Institute of Polymer Science and Technology, ICTP-CSIC, 26006 Madrid, Spain.

Layer-by-layer (LbL) assembly of biopolymers is a versatile technique for multilayer thin film formation, which is based mainly on ion pairing and hydrogen bonding. In addition, LbL was applied in different fields such as drug delivery, biosensors and tissue engineering in which it facilitates the incorporation of drugs with other polyelectrolytes for tailoring the surface properties of bulk materials.

This work is aimed to design novel anti-inflammatory coatings with improved biocompatibility to be used in various biomedical application. Therefore, the adsorption of poly (ethylene imine) (PEI) as single layer controls macrophage behavior. Second, PEI in combination with other polyelectrolytes such as heparin (Hep), chitosan (Chi) and a polymeric drug conjugate (NPs) in multilayers can be used to control the inflammatory response. The latter one is composed of a hydrophilic shell (imidazole residue) which covers and protects the core domain of the covalently bound hydrophobic drug (Naproxen residue) to increase the therapeutic effect towards bioactive components [1]. The polyelectrolyte multilayers (PEM) will act as a sacrificing layer that releases the preloaded anti-inflammatory glycosaminoglycans (GAG) and NPs after physical immobilization using the LbL technique.

NPs were adsorbed on top of a RCA-cleaned silicon wafer for 60 min, while PEI was adsorbed for 30 min and Hep for 15 min only. In addition, multilayers were physically characterized *ex situ* to determine the topography with atomic force microscopy (AFM, Nano-R[®], Pacific Nanotechnology Inc., Santa Clara, USA) and scanning electron microscopy (SEM, Philips ESEM XL30 FEG, Eindhoven, Netherlands).

As a result, **Figure 1** and **Figure 2** illustrate the surface topography of the fourth bilayer with NPs as the

terminal layer. The images show a homogenous distribution of the NPs across the surface with a certain surface roughness indicating a successful immobilization of the NPs.

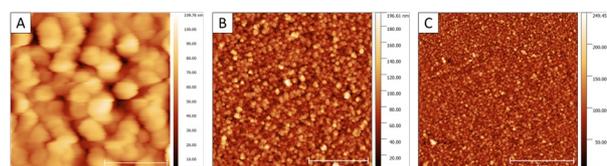


Figure 1: AFM images of the terminal NPs layer in the PEI (Hep-NP)₄ system at a scan size of (A) 1 μm, (B) 5 μm and (C) 10 μm, respectively [scale: 300 nm, 2 μm and 4 μm].

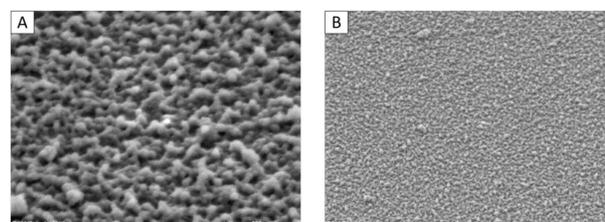


Figure 2: SEM images to visualize layer formation of the terminal NPs layer [scale: 300 nm and 2 μm, respectively] with a tilt of 45°.

In conclusion, the successful immobilization of the NPs together with Hep is a promising approach as it will facilitate the investigation of a synergistic effect between the nonsteroidal anti-inflammatory drug (NSAID) Naproxen and the anti-inflammatory potential of Hep that might diminish the inflammatory process after biomaterials implantation.

[1] Suarez *et al.*, *Macromol. Biosci.* **2013**, 13, 1174–1184

This study was partly supported by the German Academic Exchange Service (DAAD) scholarship for Hala Al-Khoury.

Nanostructures modified with polyelectrolyte multilayers tuned in stiffness for mesenchymal stem cell differentiation

Marcus S. Niepel¹, B.K. Ekambaram¹, T. Groth¹

¹Biomedical Materials Group, Institute of Pharmacy, Martin Luther University Halle-Wittenberg, D-06099 Halle

Nanostructured surfaces are believed to recreate the nano-architecture of natural environment for cells *in vitro*. In this study, we established a unique system by combination of topographical and viscoelastic features to control various cellular events of human adipose-derived stem cells (hADSC).

Three-beam laser interference lithography (LIL) was used here to design hexagonally arranged nanostructures on silicon surfaces. The wafers were cut to (20*20) mm² and a standard protocol developed at the IZM was used to deposit a negative photoresist. All samples were further cut and mounted on a vacuum chuck equipped with two mirrors for illumination with a UV laser ($\lambda = 258$ nm). The angles of incidence and exposure times were varied to obtain different nanostructure dimensions. After post-baking and developing, hexagonally arranged gold nanostructures were generated using electron beam physical vapor deposition (EBPVD). First, 10 nm chromium were deposited as adhesion promoter. Afterwards, 50 nm of gold were coated and a lift-off process was used to remove the remaining photoresist and to obtain discrete structures. Finally, a polyelectrolyte multilayer (PEM) system composed of poly-L-lysine (PLL) and hyaluronic acid (HA) was spray-coated on the nanostructures using layer-by-layer (LbL) deposition. Mechanical properties of PEM films were tuned by chemical cross-linking using carbodiimide chemistry.

Atomic force microscope (AFM, Nano-R[®], Pacific Nanotechnology Inc., Santa Clara, USA) in close-contact mode was used here to determine the height and periodicity of pristine nanostructures. **Figure 1a** displays the hexagonally arranged gold nanostructures with varying periodicities. An increase in angle of incidence resulted in a decrease of periodicity. Scanning electron microscopy (SEM, Philips ESEM XL30 FEG, Eindhoven, Netherlands) was used here to investigate the influence of the PEM coating on the area covered by the nanostructures (**Figure 1b**).

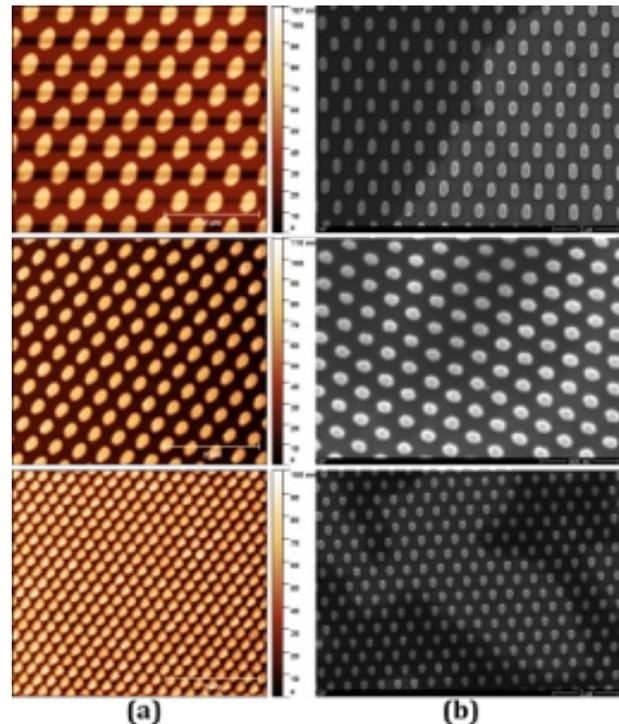


Figure 1: (a) AFM Images of pristine nanostructures at 14°, 20°, and 36° (from top) [Scale: 5 μ m]. (b) SEM images of PEM-modified nanostructures at 4°, 20°, and 36° (from top) [Scale: 2 μ m].

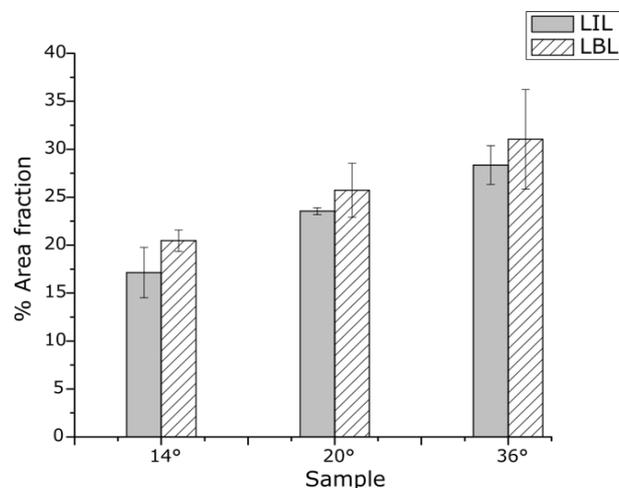


Figure 2: Quantification of area fraction [%] covered by nanostructures before and after PEM deposition.

Image analysis revealed that the surface coverage with gold nanostructures increased with increasing angle of incidence, i.e. a higher angle led to an increased amount of gold (**Figure 2**). After multilayer formation, the area covered by the nanostructures increased for each size, indicating an increase in dimension due to the coating.

In conclusion, the presented system offers great potential to guide stem cell differentiation in regenerative medicine due to the combination of topographic and viscoelastic features.

The investigations were carried out in the framework of the DFG project "Nanomaterials and Stem Cell Differentiation" (GR 1290/10-1). We thank Dr. Bodo Fuhrmann and Frank Syrowatka from IZM for their assistance with SEM and the introduction of the three-beam LIL. Additionally, we thank Sven Schlenker for gold coating of samples.

Relevant congress contributions 2016 as part of the collaboration:

Niepel M.S., Almouhanna F., Ekambaram B.K., Groth T., Multischichten aus Poly-L-Lysin und Hyaluronsäure in Kombination mit geordneten Nanostrukturen beeinflussen Stammzellendifferenzierung, Annual Meeting of the German Society for Biomaterials e.V., 12. - 14. November, 2015, Freiburg, Germany, Abstract in , Bionanomaterials, 16 (2-3), 2015, p. 141, ISSN 2193-0651

Niepel M.S., Nanostructures and their physicochemical modification as tool to control cell function, **PhD Award Ceremony**, 42nd Congress of European Society for Artificial Organs, 02. - 05. September, 2015, Leuven, Belgium

Niepel M.S., Almouhanna F., Ekambaram B.K., Groth T., Cross-linked multilayers of poly-L-lysine and hyaluronic acid in combination with ordered nanostructures affect mesenchymal stem cell response, 42nd Congress of European Society for Artificial Organs, 02. - 05. September, 2015, Leuven, Belgium, Abstract in The International Journal of Artificial Organs, 38 (7), 2015, p. 364

Niepel M.S., Almouhanna F., Groth T., Polyelectrolyte multilayers with controlled stiffness influence the response of human adipose-derived stem cells, 5th International Symposium Interface Biology of Implants, 06. - 08. May, 2015, Rostock, Germany

Development of anti-inflammatory surfaces using nanotopographies and glycosaminoglycans

Hala Al-Khoury¹, Bodo Fuhrmann², Frank Syrowatka², Georg Schmidt², Thomas Groth¹

¹Biomedical Materials Group, Institute of Pharmacy, Martin Luther University Halle-Wittenberg, 06099 Halle

²Interdisciplinary Center of Materials Science, Martin Luther University Halle-Wittenberg, D-06099 Halle

Cellular interaction investigation becomes more essential for *in vitro* and *in vivo* applications. However, as the chemical modification of biomedical surfaces may lack in stability over the long-term performance, approaches like applying different surface topographies ranging from micro- to nanoscale is thought to be beneficial to the research field.

It is known that the implantation of a biomaterial causes an inflammation cascade that attracts different kinds of cells to the inflammation site. Therefore, it is thought to develop a biomaterial with nanoscale protrusions for further cellular interaction investigation toward the modified biomedical implants in terms of adhesion of macrophages, subsequent foreign body giant cell (FBGC) formation and pro-inflammatory cytokine release IL-1 β .

This work is aimed to fabricate arrays of microchannels with varying depths, sizes and distances of 1:1 ratio of ridge and groove, variable lines size and hexagonal pillars with 1:1 ratio onto thick poly (methyl methacrylate) (PMMA) polymer foils, which shall be used as housing for biomedical sensors for screening experiments.

Nanoimprint lithography (NIL) was selected, because this is a fast and inexpensive technique for the large area production of micro- and nanostructures [1].

For this, master stamps were fabricated by photolithography for structures with dimensions larger than 1 μm from 2,5" Si wafers, for structures smaller than 1 μm electron beam lithography (EBL) was used on 2" Si wafers. The stamps were dry etched (Plasmalab100 ICP/RIE system Oxford Instruments) in an SF₆/C₄F₈ plasma for different times resulting in stamps with structure depths of 0.5, 1.0 and 2,0 μm respectively. Finally the stamps were coated with an anti-adhesive layer by dipping into a

0.1 % solution of perfluorodecyltrichlorosilane (FDTs) in dry toluene for one hour in nitrogen atmosphere.

For the NIL process itself a 2.5" hot embossing machine (NIL-2.5" Obducat) was used. The imprint parameters were varied during the nanoimprint lithography in terms of the heating temperature, which is supposed to be above the glass transition temperature of PMMA, the pressure and the cooling temperature.

The topography of the structures was determined *ex situ* with optical and scanning electron microscopy (SEM, Philips ESEM XL30 FEG, Eindhoven, Netherlands).

As a first result, **Figure 1** and **Figure 2** illustrate the structures topography of the micro and nano structures. The images show sharp end of the large size lines while it is observed that the smaller structures are shifted from the edge and some other structures are completely ruptured. Reasons for this could be the different thermal expansion coefficient of PMMA and Si, an imperfect anti adhesion layer but most of all the much higher imprint depth of up to 2 μm , which yields to a high aspect ratio of the structures, especially for the stamps made by EBL.

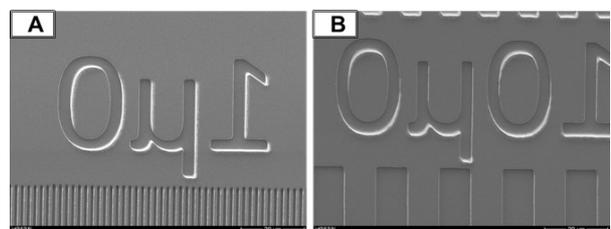


Figure 1: SEM images of the imprinted microstructures on PMMA from a stamp written with photolithography. **(A)** 1 μm and **(B)** 10 μm microstructures imprinted with a heating temperature of 155 $^{\circ}\text{C}$, 40 bar pressure and a cooling temperature of 87 $^{\circ}\text{C}$.

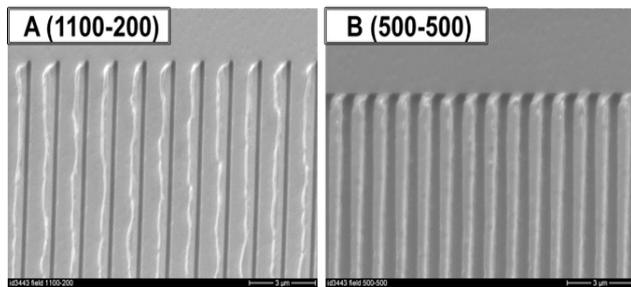


Figure 2: SEM images to visualize nanostructured structures imprinted on PMMA from a stamp written with electron beam lithography (EBL). **(A)** 1100–200 nm and **(B)** 500 nm nanostructures imprinted with a heating temperature of 145 °C, 40 bar pressure and a cooling temperature of 75 °C.

In conclusion, after further improvement, the NIL is a suitable method for the fast fabrication of structured PMMA foils for cell screening experiments.

Cellular interactions with these different applied topographies could lead to a new generation of biomedical devices that are able to treat a wide range of diseases.

[3] S. Chou, P. R. Krauss, P. J. Renstrom: Appl. Phys. Lett. **67** (1995) 3114.

This study was supported financially by the German Academic Exchange Service (DAAD).

Size, shape and surface morphology of starch granules isolated from Cassava, Dioscorea, Enset and Maize starches

Getahun Paulos¹, Reinhard H. H. Neubert², Tsigie Gebre-Mariam¹, Yahya Mrestani², Frank Heyroth³

¹Addis Ababa University, Addis Ababa, Ethiopia

²Institute of Applied Dermatopharmacy, Martin Luther University Halle-Wittenberg

³Interdisciplinary Center of Materials Science, Martin Luther University Halle-Wittenberg

Starch, as one of the most abundant biopolymers in nature, has been considered as an alternative material for pharmaceutical applications because of its biocompatibility, biodegradability, stability and compatibility with most drugs. Nowadays, there is a growing interest in making use of starch as precursor material for formulations produced by nanotechnology.

Currently our research group is working on fabrication of starch based nanoparticles for drug delivery. For this purpose, we are using various native starches obtained from Ethiopia, namely, Cassava starch, Dioscorea starch and Enset starch. These starches are distinctly different from each other with respect to chemical composition and physical properties. One of these properties is starch granule morphology.

In the year 2015, our research group has studied the morphology of both native and acetylated starch granules by using environmental scanning electron microscopy (ESEM). In this study, ESEM exhibited good depth of field and gave detailed information about the surface of starch granules [1].

The photomicrograph of native Cassava (*Manihot esculenta*) starch granule is depicted in Fig. 1. The native Cassava starch granules are essentially spherical with a flat and relatively rough surface on one side of the granules. The mean particle size of granule is 12.7 μm .

The photomicrograph of native Dioscorea (*Dioscorea abyssinica*) starch granule is composed of entirely single entities of small and large granules with oval shape showing no signs of fissures under high magnification as depicted in Fig. 2. The mean particle size of granule is 29.2 μm .

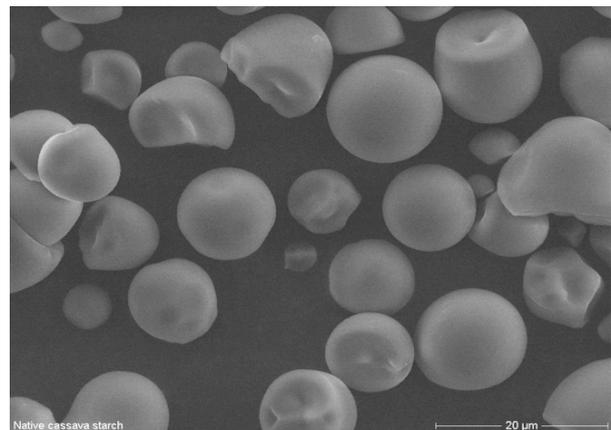


Fig. 1: Environmental scanning electron micrographs of native Cassava starch granules

ESEM of Enset (*Ensete ventricosum*, Musaceae) starch granules showed characteristic morphology that was somewhat angular and elliptical (Fig. 3). The starch has normal granule size distribution with a mean particle size of 46 μm .

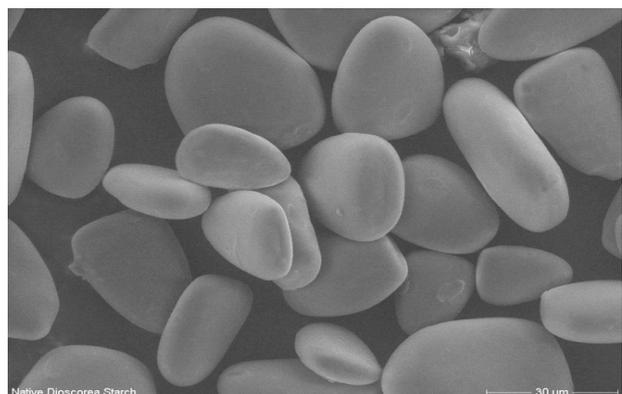


Fig. 2: Environmental scanning electron micrographs of native Dioscorea starch granules

The photomicrograph of the native maize starch granules depicted in Fig. 4 shows that the shape of native maize starch granules varies from angular to polyhedral.

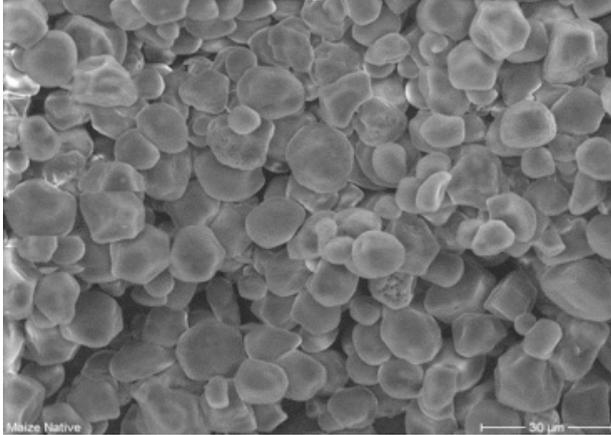


Fig. 3: Environmental scanning electron micrographs of native Enset starch granules

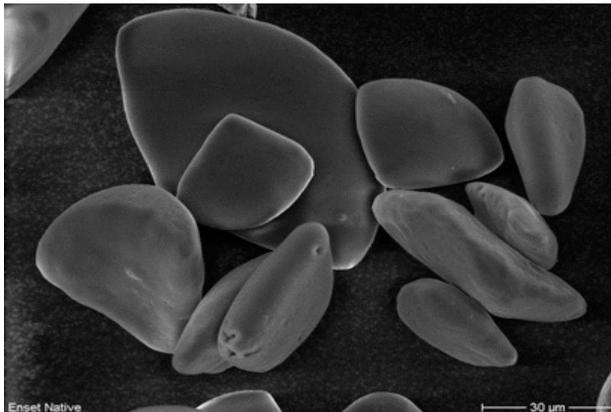


Fig. 4: ESEM of native maize starch granules

The shape of Cassava starch granules is not retained throughout acetylation i. e., a significant variation in the shape of starch granules was observed in acetylated starches. The starch granules lost their smooth surface texture and shape after acetylation.

Upon acetylation, Dioscorea starch granules lose their smooth surface texture and shape and exhibit a beehive-like structure with uniform porosity. In addition, the granule surfaces are fused.

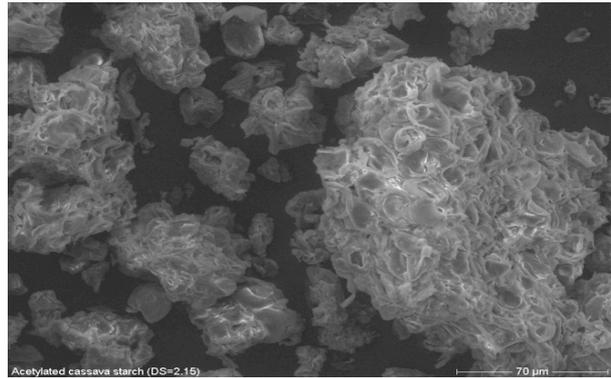


Fig. 5: ESEM of acetylated cassava starch granules with a degree of acetylation DA = 2.15

[1] G. Paulos *et al.* J. Drug Delivery Sci. Technol. **31** (2016) 83.

Keimbildung an der Phasengrenze zwischen übersättigter Lösung und externem Saatmaterial

Joachim Ulrich, Julia Herfurth

Thermische Verfahrenstechnik, Zentrum für Ingenieurwissenschaften, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, 06099 Halle

Mit Hilfe des Philips XL 30 ESEM FEG am IZM konnten strukturelle Eigenschaften verschiedener Saatmaterialien, die die Keimbildung einer übersättigten Lösung initiieren, aufgezeigt werden. Hierfür wurden verschiedene Materialien wie Stärken (Mais, Tapioka, Kartoffel, Weizen) sowie Puderzucker und Weizenmehl untersucht. Die dadurch hervorgehenden Oberflächen der Saatmaterialien schaffen unterschiedliche Voraussetzungen für eine optimale Auslösung der Keimbildung einer übersättigten Saccharoselösung.

Der Lehrstuhl Thermische Verfahrenstechnik am Zentrum für Ingenieurwissenschaften fokussiert die Forschung im Wesentlichen auf die technische Kristallisation. In der Süßwarenindustrie wird bei der Produktion von Krustenpralinen mit Hilfe von Puderbetten die Form, aber auch die Kristallisation verschiedener Produkte ausgelöst (Mogul Technik [1]). Um den genauen Prozess an der Grenze zwischen übersättigter Lösung und Saatmaterial (Puderbett) zu verstehen und auch zu optimieren, wurden alternative Pudermaterialien (Saatmaterialien) untersucht. Die Beurteilung des Kristallisationsprozesses kann für das Finden von Alternativen zu herkömmlich verwendeten Stoffen für das Auslösen der Keimbildung genutzt werden und optimierte Produktionsbedingungen schaffen.

Die unterschiedlichen Oberflächen der Partikel (siehe Abb. 1), die zur Kristallisation der Saccharoselösung führen, spielen eine bedeutende Rolle. Auch die Größe der Partikel sowie weitere Eigenschaften können die Keimbildung während der Kristallisation von Saccharose beeinflussen.

Mit Hilfe der SEM Analyse konnte herausgefunden werden, dass eine unebene, kantige Oberfläche der Saatmaterialien (z. B. Mais- und Reisstärke)

vorteilhaft für die Keimbildung ist [2]. Die übersättigte Lösung kann durch kantige Partikel besser „irritiert“ werden, wodurch Cluster entstehen und die Kristallisation gleichmäßig ausgelöst wird. Die scharfkantigen Oberflächen der Partikel täuschen möglicherweise einen Kristallkeim an dem die Lösung kristallisiert vor, was als heterogene Keimbildung bezeichnet wird. Das resultierende Endprodukt entwickelt eine ebene gleichmäßig kristallisierte Schicht aus. Sehr runde und große Partikel (z. B. Kartoffelstärke) führen zu einem schlechteren Kristallisationsergebnis mit rauer Oberfläche und ungleichmäßig ausgebildeter Schicht, die nicht lückenlos geschlossen ist und somit das Endprodukt negativ beeinflusst. Tapiokastärke und Maisstärke ähneln sich in ihrer Größe stark, weisen jedoch unterschiedliche Partikeloberflächen auf. Dies liefert Begründungen für unterschiedliche Kristallisationsergebnisse. Maisstärke initiiert die Kristallisation der Saccharoselösung sehr gleichmäßig und „fehlerfrei“ wohingegen die Tapiokastärke zu völlig anderen Ergebnissen führt. Die kristallisierte Schicht ist deutlich unebener und teilweise „löchrig“. Tapiokastärke kann aufgrund der glatten Oberfläche im Vergleich zur Maisstärke die Keimbildung nur eingeschränkt und fehlerhaft auslösen. Die Partikel interagieren beim Überstreuen der Saccharoselösung mit dieser und resultieren in unerwünschten Endprodukten. Das Material lässt sich nicht mehr vollständig vom Endprodukt entfernen und unvollständig ausgebildete Krusten stören den Produktionsprozess. Es kann bei fehlerhafter Kristallisation zum vollständigen Erliegen der Produktion kommen, sodass hohe Kosten entstehen.

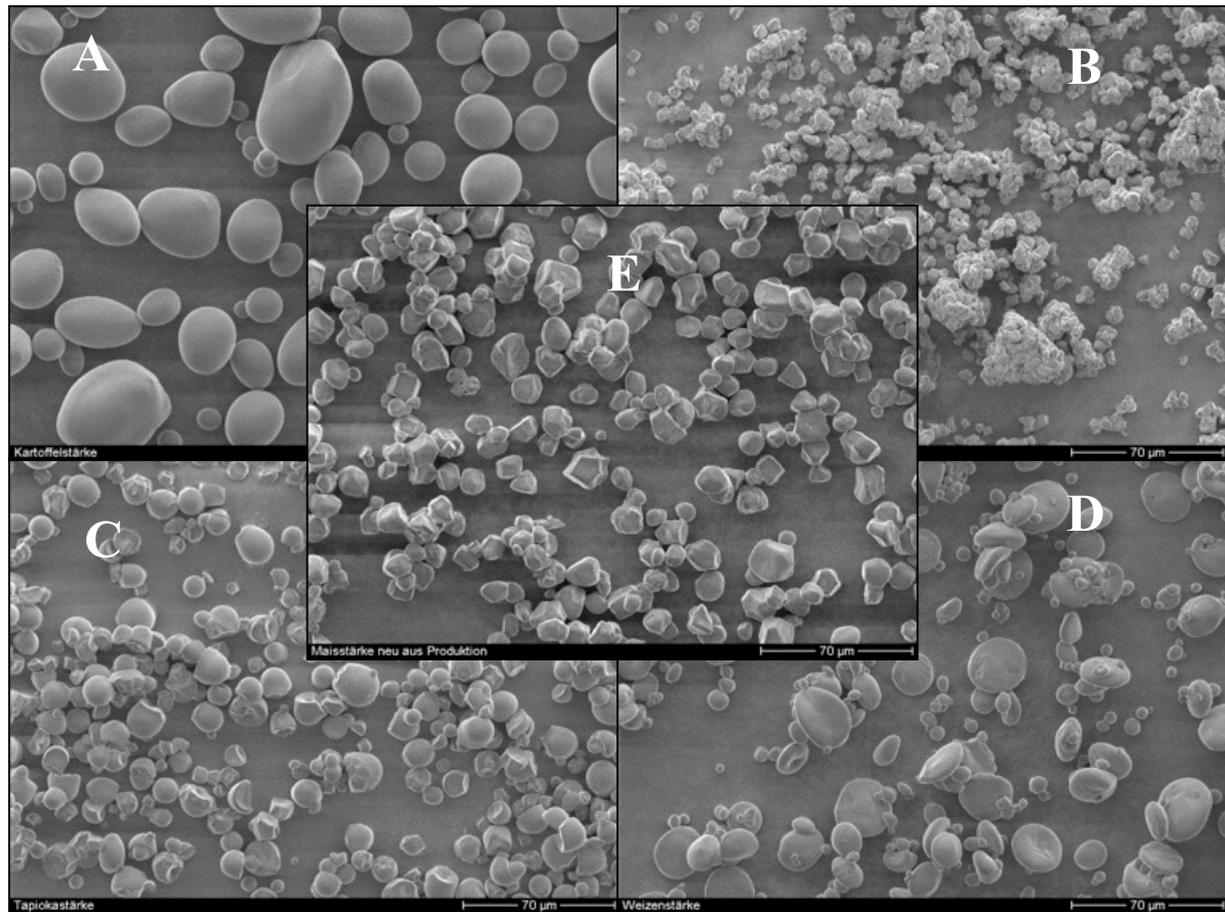


Abb. 1: A: Kartoffelstärke, B: Reisstärke, C: Tapiokastärke, D: Weizenstärke, E: Maisstärke.

- [1] <http://treiber-trays.com/produkte/mogultechnologie/> (Stand: 6.6.2016)
- [2] J. Herfurth, J. Ulrich, Surface Nucleation in Complex Rheological Systems, in ACTS, eds. D. Hongyuan, Asian Crystallization Technology Symposium. Tianjin, China 2016, pp.19-21.

Herstellung und Charakterisierung von Superkondensatorfolien mittels Linearbeschichtung

Thomas Fläschel¹, Hartmut S. Leipner¹, S. Wickert², M. Diestelhorst³, S. Ebbinghaus⁴, Frank Apse²

¹Interdisziplinäres Zentrum für Materialwissenschaften, Martin-Luther-Universität Halle–Wittenberg, 06099 Halle

²enfas GmbH, 80809 München

³Institut für Physik, Martin-Luther-Universität Halle–Wittenberg, 06099 Halle

⁴Institut für Chemie, Martin-Luther-Universität Halle–Wittenberg, 06099 Halle

Aufbauend auf Untersuchungen im Rahmen des Super-Kon-Projektes bestand das Ziel dieser Arbeiten in der Herstellung eines nanokompositbasierten Kondensators mit Bariumtitanat in einer Polymermatrix. Diese Matrix soll in Form einer dielektrischen Dünnschicht über ein industrienahes Fabrikationsverfahren mittels Linearbeschichtung gefertigt werden. Durch eine anschließende beidseitige Kontaktierung des Dielektrikums entsteht der Kondensator, welcher morphologisch und elektrisch charakterisiert wird.

Als Polymermatrix diente Poly(vinylidenfluorid-co-hexafluorpropylen) (P(VDF-HFP)) welches bereits ohne Dehnung eine Strukturierung, ähnlich der β -Phase von PVDF aufweist und somit ferroelektrische Eigenschaften besitzt [1]. Durch Zugabe von BaTiO_3 entsteht daraus ein 0–3-Komposit.



Abb. 1: Linearbeschichtungsanlage

Zur Herstellung der Kompositsschichten wurde eine Linearbeschichtungsanlage (LBA) des IZM eingesetzt. Die eigentliche Schichtformung erfolgte

durch einen Rakelprozess. In Abhängigkeit von der Rakelhöhe entstehen unterschiedliche Nassfilme. An die Schichtformung schließt sich der Verfestigungsprozess in Form einer mehrstufigen Trocknung (Kontakt-, Infrarot- und Heisslufttrocknung) an.

Die Kontaktierung der Kompositsschichten erfolgte durch beidseitige Vakuumbedampfung oder Sputterdeposition mit Aluminium.

Die auf diese Weise hergestellten unterschiedlichen Kondensatoren wurden morphologisch und elektrisch analysiert. Für die Aufklärung der Struktur wurden u. a. rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen von mit FIB (*Focussed ion beam*) präparierten Proben genutzt.

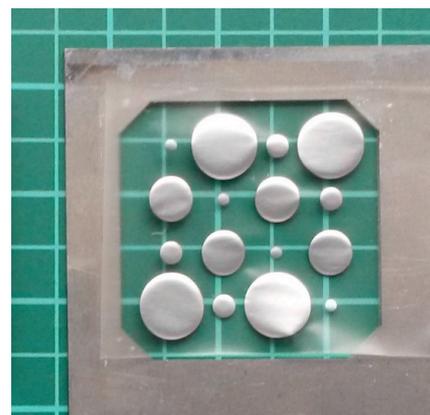


Abb. 2: Polymerschicht mit Al kontaktiert

Die Bestimmung der elektrischen Eigenschaften der kontaktierten Kompositstrukturen wurde am physikalischen Institut durchgeführt.

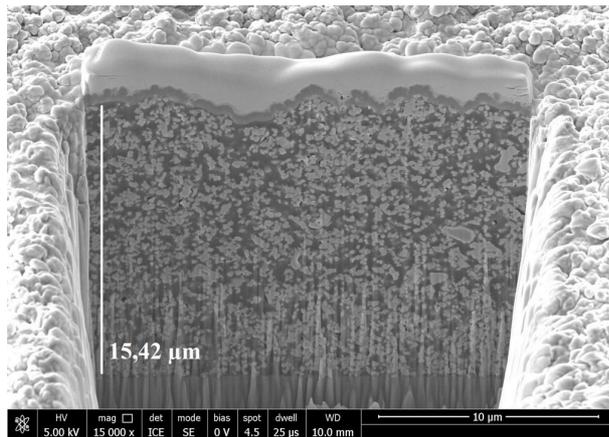


Abb. 3: Schnitt mittels *Focused-ion-beam* eines Komposit mit BaTiO₃ aus der Mischoxidsynthese (Al-kontaktiert)

Als Ergebnis der gesamten Untersuchungen wurden die besten Werte für ein Komposit mit 10 % BaTiO₃ aus einer Mischoxidsynthese ermittelt. Die Durchschlagfeldstärke lag bei 250 MV/m, die Energiedichte bei 0,6 J/cm³ bei einer Feldstärke von 80 MV/m, was einer Klemmenspannung von 1000 V entspricht. Bei dieser Feldstärke beträgt die elektrische Leitfähigkeit 0,4 nS/m. Bei einer Klemmenspannung von z. B. 60 V beträgt die Energiedichte $2,2 \cdot 10^{-3} \text{ Jcm}^{-3}$ und die elektrische Leitfähigkeit liegt unter 0,04 nS/m.

[1] W. Wegener, K. Richter, R. Gerhard-Multhaupt: J. Appl. Phys. **92** (2002) 7442

Die Untersuchungen wurden im Rahmen eines Kooperationsprojektes mit der Industrie „E-CES“ Effiziente Energiespeicherung auf neuartigen K-Cap-Kondensatoren (EFP-1504-0002) durchgeführt. Partner ist die enfas GmbH, München.

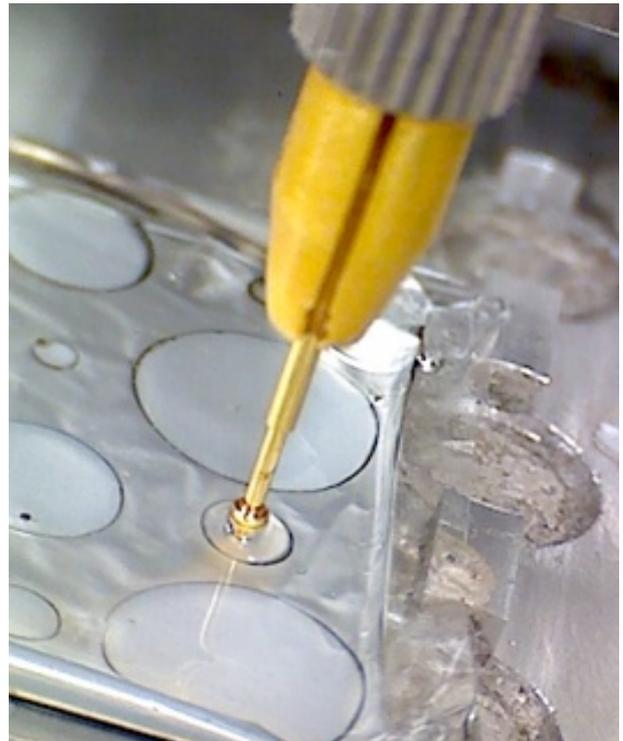


Abb. 4: Messapparatur zur Bestimmung der Kondensatoreigenschaften

Vergleich verschiedener Kontaktierungsverfahren für Superkondensatoren

Jonas Hamperl¹, Hartmut S. Leipner¹, Frank Apsel²

¹Interdisziplinäres Zentrum für Materialwissenschaften, Martin-Luther-Universität Halle–Wittenberg, 06099 Halle

²enfas GmbH, 80809 München

Durch den Ausbau der Bereiche erneuerbare Energien und Elektromobilität hat die Speicherung elektrischer Energie eine technologische Schlüsselrolle eingenommen. Neben Batterien, deren Funktionsweise auf chemischen Prozessen beruht, kommen für die kurzfristige Speicherung häufig Kondensatoren zum Einsatz. Ein Kondensator besteht aus einem Dielektrikum sowie den leitenden Kontakten. Die Funktion als Energiespeicher ist auf das elektrische Feld zurückzuführen, welches sich zwischen den Kontakten im Dielektrikum aufbaut, wenn der Kondensator geladen wird. Aufgrund ihrer hohen Leitfähigkeit werden als Kontaktmaterialien vor allem Metalle wie z. B. Aluminium verwendet.

Im Rahmen dieser Arbeit wird als Dielektrikum ein Bariumtitanat-Polymer-Komposit verwendet. Die Kontaktierung dieser Schicht soll zunächst mit Hilfe dreier konventioneller Vakuumbeschichtungen erfolgen. Die damit hergestellten Kontakte wurden anschließend unter dem Rasterelektronenmikroskop untersucht und bezüglich Schichtdicke und Oberflächenstruktur verglichen.

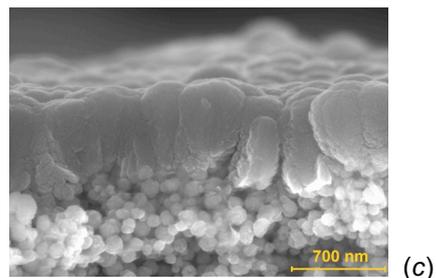
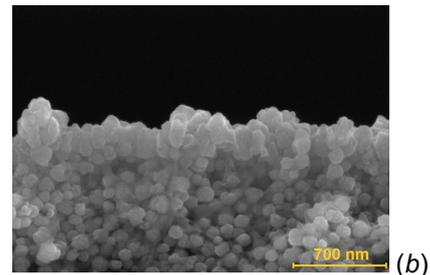
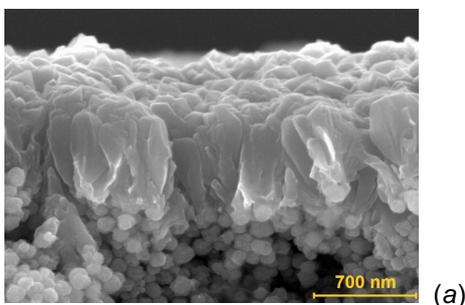


Abb. 1: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen der thermisch (a), der Elektronenstrahl bedampften (b) und der gesputterten Kontakte (c).

Die gesputterte Aluminiumschicht wirkt kompakter in der Struktur und damit beständiger. Die Schichtdicke lässt sich bei bekannter Sputterrate einfach über die Zeit regeln, wohingegen beim widerstandsbeheizten Verdampfen eine Schichtdickenkontrolle wesentlich komplizierter ist.

Die beschriebenen Kontaktierungen finden alle im Hochvakuum statt und machen daher aufwändige Vakuumtechnik erforderlich. Aus diesem Grund wurde die Herstellung von Kontakten mittels leitfähigem Polymer (PEDOT:PSS) durch Beschichtung untersucht. Es zeigte sich, dass eine chemische Modifizierung des Polymers mittels Zugabe von Isopropanol (1:1) zu qualitativ guten Kontakten auf Kompositschichten führt.

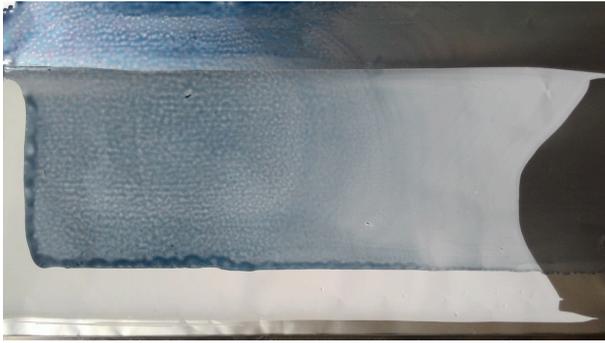


Abb. 2: Beschichtung von BaTiO₃-P(VDF-HFP) Komposit mit PEDOT:PSS-Isopropanol-Lösung

Die hergestellten Kontakte wurden auf ihre elektrischen Eigenschaften hin untersucht. Die Messungen ergaben für die ca. 2 µm PEDOT:PSS-Schichten einen spezifischen Widerstand von $77 \pm 12 \Omega\text{mm}^2/\text{m}$ und eine elektrische Leitfähigkeit von $(1,3 \pm 0,2) \cdot 10^4 \text{ S/m}$.

Durch die Messungen des Flächenwiderstandes konnte gezeigt werden, dass die PEDOT:PSS-Schicht eine für Polymere beachtliche Leitfähigkeit aufweist [1] und für einen Einsatz als Kontaktschicht geeignet scheint. Zum Vergleich: die Leitfähigkeit von Metallen liegt im Bereich von 10^6 S/m .

[1] D. R. Lide: CRC handbook of chemistry and physics: A ready-reference book of chemical and physical data. Boca Raton: CRC Taylor & Francis, 872006.

Die Untersuchungen wurden im Rahmen eines Kooperationsprojektes mit der Industrie „ECES – Effiziente Energiespeicherung auf neuartigen K-Cap-Kondensatoren“ (EFP-1504-0002) durchgeführt. Partner ist die Enfas GmbH, München.

Entwicklung eines BaTiO₃/Polymer-Komposites als neuartiges Kondensatormaterial

S. Wickert^{1,4}, T. Mälzer², F. Apse^{2,4}, T. Band³, H. S. Leipner², M. Diestelhorst³, S. G. Ebbinghaus¹

¹Institut für Chemie, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Kurt-Mothes-Straße 2, 06120 Halle

²Interdisziplinäres Zentrum für Materialwissenschaften, Heinrich-Damerow-Straße 4, 06120 Halle

³Institut für Physik, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, von-Danckelmann-Platz 3, 06120 Halle

⁴enfas GmbH, 80809 München

Kompositmaterialien mit einer ferroelektrischen Komponente in einer Polymermatrix sind höchst interessante Kandidaten als Dielektrika für Multischichtkondensatoren. Durch Vereinigung von günstigen Materialeigenschaften, wie hohe Permittivität, hohe Durchschlagsfestigkeit und einfache Formbarkeit, soll eine neue Generation BaTiO₃-basierter Superkondensatoren für den Einsatz z.B. im automotiven Bereich entwickelt werden.

In den von uns hergestellten 0-3 Kompositen werden BaTiO₃ als Ferroelektrikum und P(VDF-HFP) als formgebendes Polymer eingesetzt. Die einzelnen BaTiO₃-Partikel liegen dabei homogen verteilt im Polymer vor. Über ein Rakelverfahren mit anschließendem Trocknungsprozess werden Schichten von wenigen µm Dicke hergestellt. Diese werden anschließend kontaktiert und hinsichtlich ihrer dielektrischen Eigenschaften charakterisiert und nachfolgend optimiert.

Zur Herstellung des BaTiO₃ kommen verschiedene Verfahren (z. B. nasschemisch oder über Mischoxidsynthese) zum Einsatz. XRD-Untersuchungen belegen die Ausbildung von phasenreinem BaTiO₃. Rasterelektronenmikroskopie (REM) und Raman-spektroskopie werden eingesetzt, um die morphologischen Eigenschaften zu untersuchen.

Je nach Wahl der Synthesebedingungen können Partikelgrößen im Bereich von 50-500 nm mit einheitlicher Verteilung erhalten werden. Ebenso lässt sich auf diese Weise die Partikelform/-struktur (kubisch, sphärisch, hohl, kompakt) gezielt beeinflussen. In Abbildung 1 ist eine REM-Aufnahme eines hydrothermal hergestellten BaTiO₃-Pulvers mit Hohlstruktur dargestellt. Gut zu erkennen sind die homogene Partikelgrößenverteilung und die sehr gute Kristallinität. Letztere lässt sich anhand der ausgebildeten Kristallflächen abschätzen.

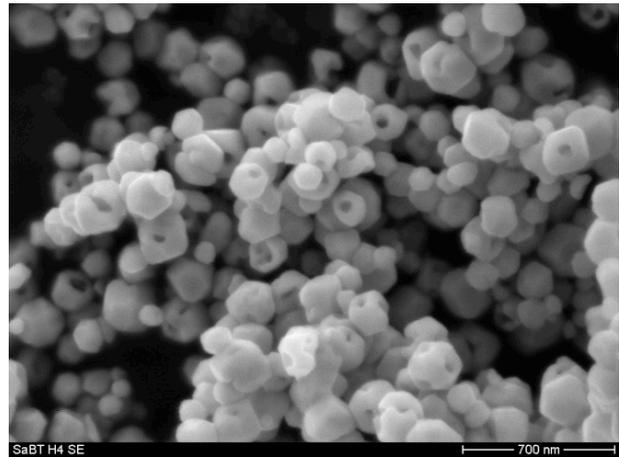


Abb. 1: REM-Aufnahme von hydrothermal hergestellten BaTiO₃-Partikeln

Für neue Synthesemethoden lässt sich zudem mit Hilfe elektronenmikroskopischer Aufnahmen der Bildungsprozess des BaTiO₃ verfolgen (s. Abbildung 2).

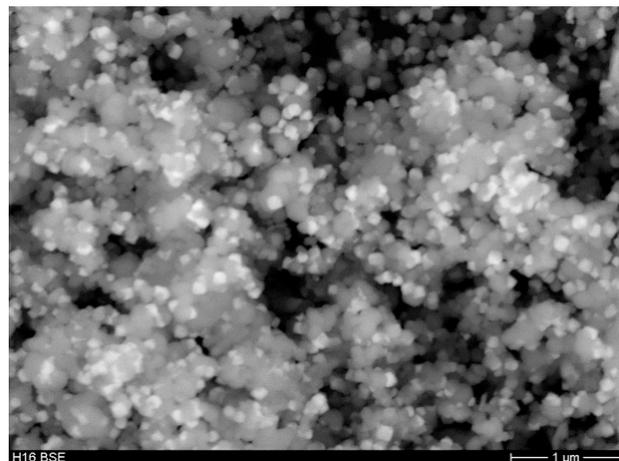


Abb. 2: REM-Aufnahme (Rückstreuelektronenmodus) kleiner BaTiO₃-Kristallite (helle Bereiche) nach einem (unvollständigem) mikrowellenunterstützten Syntheseprozess

Damit werden wichtige Erkenntnisse zur Optimierung der Herstellung und zur kristallinen Struktur gewonnen. Diese helfen bei der Verbesserung der ferroelektrischen Eigenschaften und ermöglichen den Einsatz in Superkondensatoren.

Da die gewünschten geringen Partikelgrößen zu einer Verbreiterung der XRD-Reflexe führen, lässt sich röntgenographisch die ferroelektrische Phase des BaTiO_3 nicht sicher identifizieren. Hingegen ist die Ramanspektroskopie eine sehr sensitive Methode, um die ferroelektrische tetragonale Phase von der paraelektrischen kubischen Phase unterscheiden zu können. Ergänzend zu XRD-Messungen lassen sich mittels Ramanspektroskopie Schwingungen des Kristallgitters darstellen, die wichtige Hinweise auf Phasenzusammensetzung und Defektanteilen geben können.

Exemplarisch sind die Ramanspektren zweier BaTiO_3 -Pulver – zum einen hydrothermal und zum anderen über die Mischoxidsynthese hergestellt – in Abbildung 3 dargestellt.

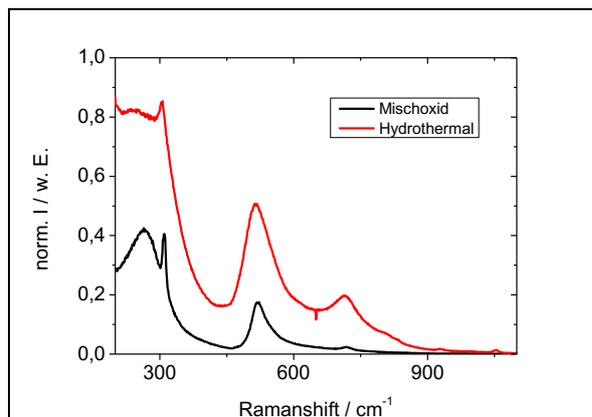


Abb. 2: Ramanspektrum von BaTiO_3 -Pulvern

Die Signale bei 260, 305, 515 und 720 cm^{-1} sind charakteristisch für die tetragonale Modifikation und bestätigen die Ausbildung der ferroelektrischen Phase unabhängig von der verwendeten Syntheseroute. Außerdem lassen sich aus der relativen Intensität des Peaks bei 720 cm^{-1} Aussagen über die Konzentration von Bariumdefekten innerhalb des Kristallgitters treffen [1]. Hydrothermal hergestellte BaTiO_3 -Pulver weisen üblicherweise eine hohe Defektkonzentration in Form von Hydroxidgruppen und Bariumfehlstellen auf. Hingegen werden beim Mischoxidverfahren aufgrund der ho-

hen Reaktionstemperaturen vergleichsweise defektarme Pulver erzeugt.

Frequenz- und temperaturabhängige dielektrische Messungen zeigen, dass die von uns hergestellten Kompositschichten ein hohes Potential für den Einsatz in neuartigen Kondensatoren besitzen, jedoch hinsichtlich ihres Selbstentladungsverhaltens noch optimiert werden müssen.

Die Untersuchungen wurden im Rahmen des Projektes „ECES“ – Effiziente Energiespeicherung auf neuartigen K-Cap-Kondensatoren durchgeführt.

[1] G. Busca, V. Buscaglia, M. Leoni, P. Nanni: Chem. Mater. **6** (1994) 955.

Bottom-up-Synthese hierarchisch strukturierter Elektroden mit hoher elektrokatalytischer Aktivität

Pei Wang, Katarzyna Kulp, Michael Bron

Naturwissenschaftliche Fakultät II, Institut für Chemie, Technische Chemie erneuerbarer Energien, Martin-Luther-Universität Halle–Wittenberg, von-Danckelmann-Platz 4, 06120 Halle (Saale)

Der stetige Anstieg fluktuierend zur Verfügung stehender elektrischer Energie z.B. aus Sonnen- und Windkraft hat die elektrochemische Energiewandlung, d.h. die Wandlung elektrischer in speicherbare chemische Energie, verstärkt in das Interesse von Forschung und Entwicklung gerückt. Systeme zur elektrochemischen Energiewandlung wie z.B. Elektrolyseure, Brennstoffzellen oder Redox-Flow-Batterien benötigen Elektroden mit hoher aktiver Oberfläche und für die Anwendung optimierter Porosität bei gleichzeitig guter elektrischer Leitfähigkeit. Wir untersuchen einen Ansatz zum gezielten bottom-up-Aufbau von Elektrodenstrukturen, den wir auch schon in früheren IZM-Jahresberichten diskutierten. Dabei werden zunächst Eisenpartikel gezielt auf einem Substrat abgeschieden (s.a. IZM-Jahresbericht 2011), an denen dann in einer chemischen Gasphasenabscheidung (CVD, chemical vapor deposition) Kohlenstoffnanoröhren (carbon nanotubes, CNTs) gewachsen werden (IZW-Jahresbericht 2013). Additive wie Graphen erhöhen die Leitfähigkeit innerhalb der Elektrodenstrukturen und führen zu verbesserten elektrokatalytischen Eigenschaften (IZM-Jahresbericht 2014 und [1]). Derzeitige Untersuchungen zielen auf die gezielte Verzweigung der primär gewachsenen CNTs ab, um zu hierarchisch strukturierten Elektroden zu gelangen [2].

Zunächst wurden Eisenpartikel mittels der elektrochemischen Doppelpulsabscheidung auf Glaskohlenstoff (glassy carbon, GC) als Substrat abgeschieden. Die Doppelpulsabscheidung erlaubt es, über das gezielte Einstellen des (stark negativen) Nukleationspotentials die Zahl der Nukleationskeime auf der Oberfläche zu beeinflussen, während die Dauer des anschließend angelegten (weniger negativen) Wachstumspotentials die Größe der Fe-

Partikel bestimmt. Abbildung 1 zeigt beispielhaft eine rasterelektronenmikroskopische (REM) Aufnahme von auf diese Weise abgeschiedenen Fe-Partikeln. Es wurden homogen verteilte Partikel von ca. 100-200 nm Durchmesser erhalten.

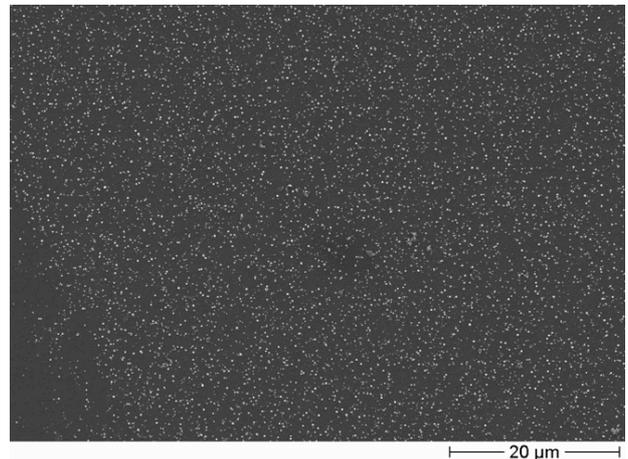


Abb. 1: REM-Aufnahme von auf GC mittels elektrochemischer Doppelpulsabscheidung aufgetragenen Eisenpartikeln

Das Wachstum von CNTs an den abgeschiedenen Nanopartikeln erfolgte mittels CVD in einem beheizten, durchströmten Quarzrohr aus einem mit Cyclohexan gesättigten Gemisch aus Argon und Wasserstoff. Dabei zeigte sich, dass neben der Temperatur des CVD-Prozesses (typischerweise 750 °C) auch Parameter wie die Strömungsgeschwindigkeit und das Wasserstoff/Cyclohexan-Verhältnis einen großen Einfluss auf Wachstum und Eigenschaften der CNTs haben. So führt ein zu geringer Wasserstoffanteil zur Verkokung der Eisenpartikel, während ein zu großer Wasserstoffanteil das CNT-Wachstum vermutlich durch Hydrierung von Zersetzungsprodukten des Cyclohexans verhindert. Die so auf GC aufgewachsenen CNTs dienen als Substrat für eine weitere Eisen-

abscheidung und einen weiteren CVD-Schritt. Abb. 2, oben zeigt die an CNTs abgeschiedenen Eisen-nanopartikel, während Abb. 2 unten die daran gewachsenen CNTs („sekundäre CNTs“) zeigt.

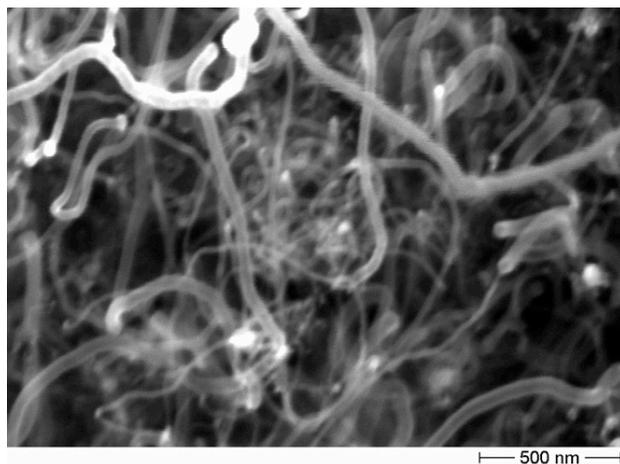
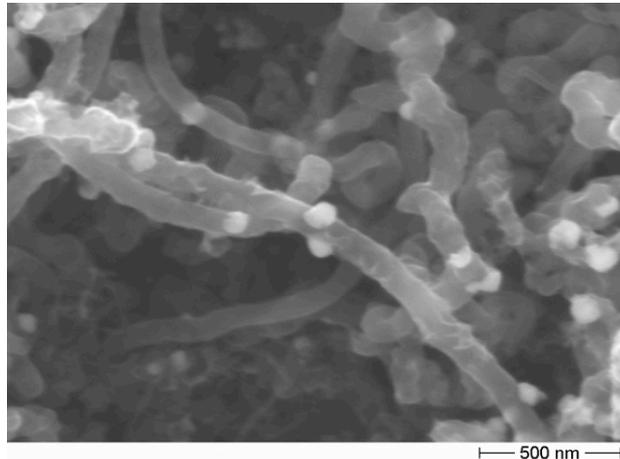


Abb. 2: REM-Aufnahme von mit Eisenpartikeln belegten primären CNTs (oben) sowie an diesen primären CNTs gewachsene sekundäre CNTs (unten)

Es ist zu erkennen, dass die Eisennanopartikel auf den CNTs weniger gleichmäßig abgeschieden werden, als auf Glaskohlenstoff. Die sekundären CNT lassen sich gut von den primären CNTs durch ihren über veränderte Wachstumsbedingungen eingestellten kleineren Durchmesser unterscheiden. Ramanspektroskopie (nicht dargestellt) belegt dabei, dass die sekundären CNTs defektreicher als die primären sind, wie sich an dem erhöhten Intensitätsverhältnis der den Defekten zugeordneten

Bande zu der den graphitischen Strukturen zugeordneten Bande zeigt.

In die so erzeugten Strukturen können nun auf unterschiedliche Weise elektrokatalytisch aktive Materialien eingebracht werden. Im vorliegenden Fall erfolgte dies durch elektrochemische Platin-Abscheidung Abb. 3 vergleicht die Methanoloxidation an Platin-belegten verzweigten CNTs mit der an einfachen CNTs und der an Pt, das auf dem Substrat Glaskohlenstoff abgeschieden wurde. Deutlich sind die höheren Ströme, die auf eine verbesserte elektrokatalytische Aktivität hinweisen, zu erkennen, welche zum einen auf die erhöhte verfügbare Oberfläche in der 3-dimensionalen Struktur, zum anderen aber auch auf die verbesserte Leitfähigkeit in der hoch verzweigten Struktur zurückgeführt werden kann.

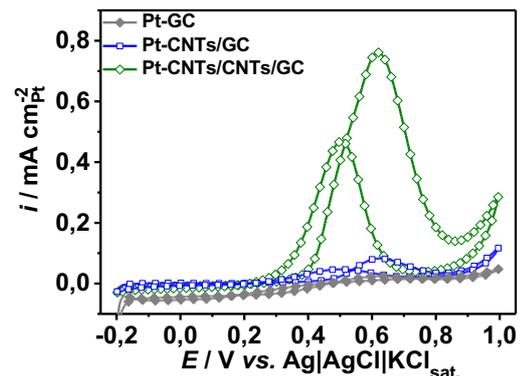


Abb. 2: Zyklovoltammogramme der Methanoloxidation an mit Pt belegten verzweigten CNTs (Pt-CNTs/CNTs/GC) im Vergleich zu nicht verzweigten CNTs und zum reinen Substrat.

[1] P. Wang, T Kottakatt, M, Bron, ChemElectroChem, 2 (2015) 1396–1402.

[2] P. Wang, K. Kulp, M. Bron, J. Mater. Chem. 2016, submitted.

Die Untersuchungen wurden von der DFG im Rahmen des Projektes BR 2244/7–1 gefördert. Wir danken dem IZM für den Zugang zu Rasterelektronen- und Transmissionselektronenmikroskop sowie F. Syrowatka (IZM) und A. Quetschke für die Durchführung der elektronenmikroskopischen Untersuchungen.

Strukturierte Rückkontakte für anorganische Dünnschichtsolarzellen

E. Jarzembowski¹, B. Fuhrmann², H. Leipner², W. Fränzel¹, R. Scheer¹

¹Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Institut für Physik, 06120 Halle

²Martin-Luther-Universität, Interdisziplinäres Zentrum für Materialforschung, 06120 Halle (Saale)

Die Strukturierung von anorganischen Dünnschichtsolarzellen hat zum Ziel, die Rekombination von Ladungsträgern in der Solarzelle zu reduzieren und die Lichteinkopplung zu erhöhen. Im Rahmen des BMBF Projektes Struktursolar I wurden verschiedene Strukturierungsmethoden für den Rückkontakt erforscht.

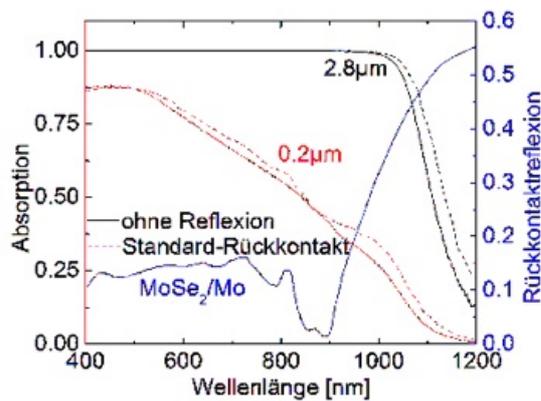


Abbildung 1 Absorptionsvermögen von CIGS Schichten mit Dicken 0.2 μm und 2.8 μm als Funktion der Wellenlänge sowie Rückkontaktreflexion am System MoSe_2/Mo errechnet nach optischen Daten aus [2, 3]. Betrachtet sind die Fälle ohne Reflexion am Rückkontakt und mit Reflexion (Standard-Rückkontakt).

Die Verbesserung des Wirkungsgrads von $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$ (CIGS) Solarzellen durch Strukturierung des Rückkontakts begründet sich aus den Problemen einer geringen optischen Reflexion am System $\text{Mo}/\text{MoSe}_2/\text{CIGS}$ und aus einer angenommenen hohen Rückkontaktrekombinationsgeschwindigkeit (siehe dazu Werte bis $S_n = 10^6$ cm/s in [4-8]). Es wurde daher eine Strukturierung ähnlich einer PERC-Siliciumsolarzelle angestrebt, die Bereiche elektrischer Kontaktierung (und hoher Rekombinationsgeschwindigkeit) lokal minimiert und mit Bereichen hoher optischer Reflexion (und niedriger Rekombinationsgeschwindigkeit) kombiniert. Eine schematische Darstellung gibt die Abbildung 2. Mittels optischer Simulation wurde als

geeignetes Material für den Passivierungsbereich SiO_2 bestimmt, dass mit einem Brechungsindex von $n \approx 1.54$ eine große Differenz zu dem von CIGS ($n \approx 3$) aufweist. Um die Effekte des Rückkontaktes für die Untersuchung besonders deutlich werden zu lassen, wurde sich auf dünne CIGS Schichten unter 0.5 μm konzentriert. Dies rechtfertigt sich aus der Abbildung 1, die zeigt, dass eine größere relative Erhöhung der Absorption für dünne Schichten durch Rückkontaktreflexion zu erzielen ist.

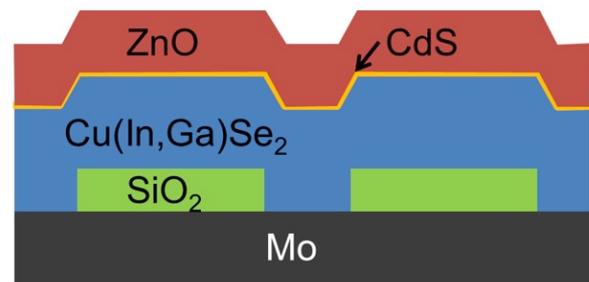


Abbildung 2: Schematische Darstellung der angestrebten SiO_2/Mo Struktur für den Rückkontakt einer CIGSe Solarzelle

Strukturierung von Rückseitenkontakten

Um sowohl die optische Reflexion zu erhöhen, als auch eine mögliche Passivierung der Solarzellenrückseite zu erreichen, wurde die in Abbildung 2 gezeigte Struktur angestrebt. Auf die metallische Molybdänschicht sollte eine dielektrische SiO_2 Schicht von ca. 100 nm Dicke derart strukturiert werden, dass der Mo-Rückkontakt nur punktuell zugänglich ist. Als Strukturierungsverfahren kamen zur Erprobung: Fotolithografie, Nanoimprintlithografie und Laserinterferenzlithografie. Aufgrund seiner Eignung für Partikel-behaftete Molybdänsubstrate (Substrate wurden aus großen Platten gebrochen und trugen vereinzelt Glassplitter) wurde am Ende das Verfahren der Laserinterferenzlithografie (LIL) für die Solarzellenstrukturierung im

Rahmen dieses Projektes ausgewählt. Die für die Projektergebnisse hauptsächliche Einschränkung war das limitierte Abstands-Öffnungs-Verhältnis der LIL. Das heißt, dass die Strukturgröße und deren Periode nicht unabhängig voneinander gewählt werden können und die Größen von der verwendeten Wellenlänge des Lasers abhängen.

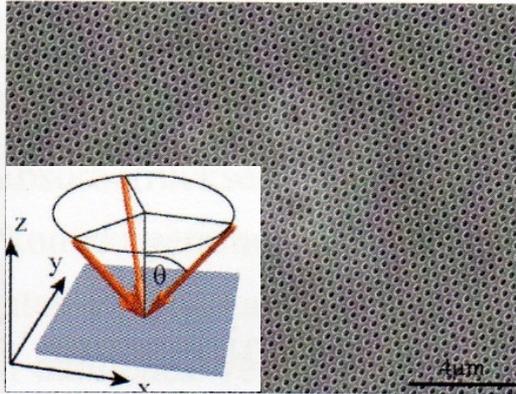


Abbildung 3 Rasterelektronenmikroskopieaufnahme einer strukturierten SiO_2 -Schicht auf einem Glas/Mo Substrat. Die Periode der hexagonalen Struktur beträgt $0,46 \mu\text{m}$. Die Öffnungen zur Mo-Schicht erscheinen als schwarze Kreise. Das Einsetzbild zeigt die Anordnung der interferierenden Lichtstrahlen bei der Belichtung des Photolacks

Bei der LIL wird in einem ersten Schritt ein Fotolack aufgetragen. Dieser wird dann in einem maskenfreien Verfahren belichtet. Dazu wird ein UV CW Laser der Wellenlänge $\lambda = 266 \text{ nm}$ verwendet. Mit Hilfe eines Lloyd's Interferometers kommt es zu konstruktiver bzw. destruktiver Interferenz des Lichts, das Interferenzmuster wird somit auf den Fotolack übertragen. Bei der quadratischen Struktur wurde unter Verwendung von 2 Strahlen und 90° Verdrehung der Probe 2mal belichtet. Die hexagonale Struktur wurde unter Verwendung von 3 Strahlen erzeugt (siehe Einsetzbild in Abbildung 3). Nach dem Entwickeln des Lacks folgt ein Ätzschritt und das anschließende Entfernen der Lackreste in einem Plasmaätzverfahren. Insbesondere dieser letzte Schritt war kritisch, da der Lack vollständig entfernt werden musste ohne die Struktur zu unterätzen. Mit diesem Verfahren konnten dann regelmäßige Strukturen wie in Abbildung 3 gezeigt hergestellt und zu Solarzellen umgesetzt werden (siehe 3.3).

Experimentelle Validierung strukturierter Kontakte

Abbildung 4 zeigt Rückstreuelektronenaufnahmen des Querschnitts der Proben aus Serie VI aufgenommen im Rasterelektronenmikroskop (SEM). Es ist zu erkennen, dass aufgrund des Ätzvorgangs die Strukturwände nicht senkrecht sondern abgechrägt sind. Weiterhin ist zu erkennen, dass sich die Strukturierung für Periodenlängen kleiner $1,1 \mu\text{m}$ nicht auf die Oberfläche der CIGS Schicht überträgt. Offensichtlich führt das Überwachsen der Rückkontakterhebungen aus SiO_2 zu einer Glättung der Filmoberfläche. Der hier verwendete CIGS Prozess war der etablierte 3-Stufen Prozess. Schließlich ist zu vermerken, dass die CIGS Schicht einen geschlossenen Film bildet, der den Rückkontakt ohne sichtbare Löcher bedeckt. Damit ist die Voraussetzung für niedrige Parallelwiderstände der Solarzellen gegeben.

Es wurden 2 Serien von Absorbern mit jeweils den Periodenlängen $0,23 \text{ (B)}$, $0,46 \text{ (C)}$ und $1,1 \mu\text{m} \text{ (D)}$ präpariert und mit einem konventionellen Rückkontakt verglichen (A). Dabei durchliefen alle Proben einer Serie die identischen Prozesse der Absorber- und Zellpräparation um den Einfluss von Prozessvariationen auszuschließen. Solarzellen wurden mittels des Standardprozesses bestehend aus der nasschemischen Abscheidung von CdS, der Ionenzerstäubung von ZnO und ZnO:Al sowie der Elektronenstrahlverdampfung von Ni/Al Kontakten erstellt. Die einzelnen Solarzellen auf den inch^2 -großen Substraten wurden vermessen. Die Ergebnisse sind in Abbildung 5 dargestellt. Man erkennt, dass bezüglich einer Probe ohne Strukturierung (Periodenlänge $0 \mu\text{m}$) der Kurzschlussstrom mit der Periodenlänge zunimmt. Dies ist im Einklang mit der Simulation. Dabei ist der Unterschied zwischen den beiden SiO_2 Schichtdicken gering, was wiederum darauf verweist, dass der Einfluss der Lichtstreuung durch die Strukturierung größer ist als der der kohärenten Reflexion. Ein Einfluss der Strukturierung auf die Leerlaufspannung ist nicht auszumachen. Dies deutet auf einen ähnlich (niedrigen) Wert der Rückkontaktrekombinationsgeschwindigkeit an der Grenzfläche SiO_2/CIGS hin. Es wurde erstmals gefunden, dass die Rekombination an der Rückkontakt/Absorber Grenzfläche ei-

ner Cu(In,Ga)Se₂ Solarzelle bereits so gering ist, dass sie durch eine Punktkontaktkonfiguration kaum weiter reduziert werden kann [1].

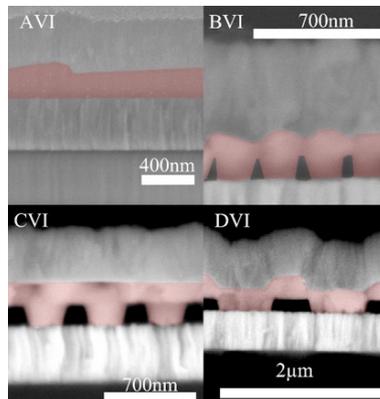


Abbildung 4 Querschnittsaufnahmen der Probenserie VI mittels eines Rückstreudetektors in einem SEM. Das SiO₂ erscheint als schwarze Fläche zwischen den CIGSe Kristallen (rot eingefärbt). Probenpräparation mittels Focused-ion-beam.

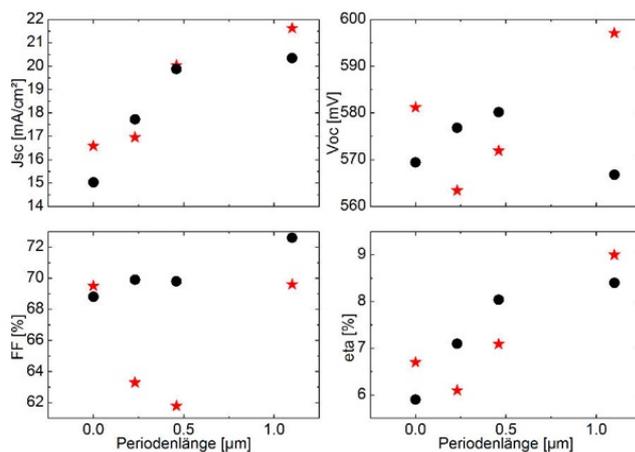


Abbildung 5 J_{sc}, V_{oc}, FF und η in Abhängigkeit von der Periodenlänge der Probenserien V (Punkte – 60 nm SiO₂) und VI (Sterne – 130 nm SiO₂)

Um den Effekt der Lichteinkopplung zu verifizieren, wurde die Externe Quantenausbeute (EQE) der Solarzellen ermittelt. Abbildung 6 zeigt, dass im Vergleich zum unstrukturierten Rückkontakt aus Mo/MoSe₂ für alle Wellenlängen eine Steigerung der EQE zu verzeichnen ist. Probenserie VI zeigt einen deutlicheren Einfluss der Periodenlänge auf die EQE als die Probenserie V. Insbesondere die EQE der Probe DVI ist besonders erhöht. Daraus kann gefolgert werden, dass die Lichtstreuung mit steigender Strukturhöhe zunimmt und dass zusätzlich die durch den Rückkontakt übertragende Rauigkeit der CIGS Oberfläche für große Periodenlängen (Proben D) die Lichteinkopplung unterstützt.

Die Proben CV und CVI besitzen eine erhöhte Quanteneffizienz für Wellenlängen größer als 950 nm. Dies steht dies im Einklang mit den optischen 3D Simulationen und kann mit einem Wellenleiter-effekt erklärt werden.

Um die beobachteten optischen Effekte weiter zu beleuchten, wurden EQE Spektren simuliert. Dazu wurde von den Proben AV und AVI und deren Sammlungsverhalten, das in deren gemessene EQE eingeht, ausgegangen. In Gleichung (1) wurde die gemessene EQE der Probe A mittels dem Verhältnis der theoretischen Absorptionsspektren in hypothetische Spektren der Proben B-D umgerechnet. Dieser Ansatz ist allerdings nur eine grobe Näherung, da der Einfluss der Sammlungsfunktion komplett vernachlässigt wurde. Die theoretischen EQE Spektren in Abbildung 6 geben daher auch nur tendenziell den gemessenen Verlauf wieder.

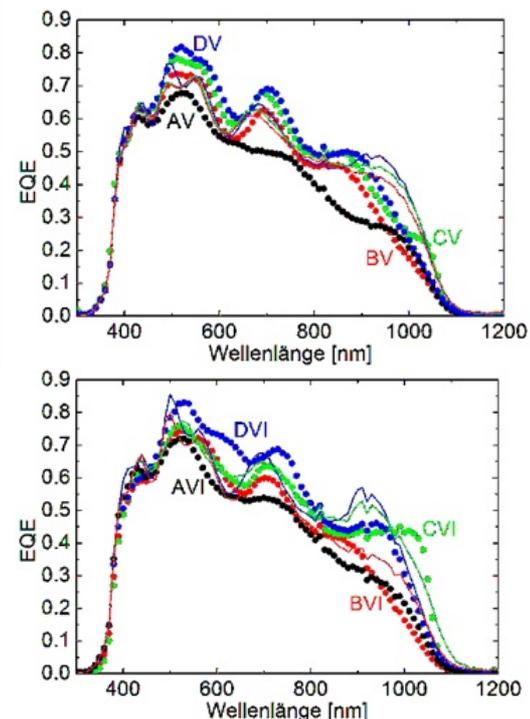


Abbildung 6 Gemessene (Punkte) externe Quantenausbeute der Probenserien (links) V und (rechts) VI. Errechnete Quantenausbeuten gemäß Gleichung 1). Periodenlängen A: 0 µm, B: 0,23 µm, C: 0,46 µm und D: 1,1 µm.

$$EQE_{theo}(\lambda) = EQE_A(\lambda) \frac{A_{theo_{B,C,D}}(\lambda)}{A_{theo_A}(\lambda)} \quad 1)$$

Mit den oben gezeigten Ergebnissen konnte das Konzept eines mikrostrukturierten Rückkontakts einer CIGS Solarzelle verifiziert werden [9]. Der relative Gewinn des Kurzschlussstroms einer ca. 200 nm dicken CIGS Schicht in einer Solarzelle liegt bei 25%. Dabei wurde gezeigt, dass dieser Gewinn (1) nicht auf eine Reduktion der Rekombination am Rückkontakt, (2) wenig auf die erhöhte Reflexion am Rückkontakt aber (3) vorwiegend auf Lichtstreuung und Beugung zurückzuführen ist. Damit ist der Pfad für weitere Forschung gelegt, diese Ergebnisse mit anderen Strukturierungsverfahren zu erzielen und auch auf dickere CIGS Schichten zu übertragen. Dies soll im Rahmen des Projekts Struktursolar II erfolgen.

1. E. Jarzembowski, F. Syrowatka, K. Kaufmann, W. Fränzel, T. Hölscher, and R. Scheer, *The influence of sodium on the molybdenum/Cu(In,Ga)Se₂ interface recombination velocity, determined by time resolved photoluminescence*. Applied Physics Letters, 2015. **107**: p. 051601.
2. E. Palik, *Handbook of optical constants of solids*. 1985: Academic Press.
3. B.L. Evans and R.A. Hazelwood, *Optical and structural properties of MoSe₂*. Physica status solidi, 1971. **4**: p. 181.
4. S. Shirakata and T. Nakada, *Time-resolved photoluminescence in Cu(In,Ga)Se₂ thin films and solar cells*. Thin Solid Films, 2007. **515**: p. 6151.
5. K. Bothe, G.H. Bauer, and T. Unold, *Spatially resolved photoluminescence measurements on Cu(In,Ba)Se₂ thin films*. Thin Solid Films, 2002. **403-404**: p. 453-456.
6. W.K. Metzger, I.L. Repins, M. Romero, P. Dippo, M.A. Contreras, R. Noufi, and D. Levi, *Recombination kinetics and stability in polycrystalline Cu(In,Ga)Se₂ solar cells*. Thin Solid Films, 2009. **517**: p. 2360.
7. W.-W. Hsu, J.Y. Chen, T.-H. Cheng, S.C. Lu, W.-S. Ho, Y.-Y. Chen, Y.-J. Chien, and C.W. Liu, *Surface passivation of Cu(In,Ga)Se₂ using atomic layer deposited Al₂O₃*. Applied Physics Letters, 2012. **100**(2).doi:<http://dx.doi.org/10.1063/1.3675849>: p. 023508.
8. B. Vermang, V. Fjällström, J. Pettersson, P. Salome, and M. Edoff, *Development of rear surface passivated Cu(In,Ga)Se₂ thin film solar cells with nanosized local rear point contacts*. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2013. **117**: p. 505.
9. E. Jarzembowski, B. Fuhrmann, H. Leipner, W. Fränzel, and R. Scheer, *Quantitative analysis of CIGSe PERC solar cells by laser interference lithography*. Thin Solid Films, submitted.

Die Untersuchungen wurden im Rahmen des BMBF-Projekts StrukturSolar (03SF0417B) durchgeführt.

Resistives Schalten und spannungsgesteuerte Modulation von Tunnelbarrieren in organischen Spinventilen

Robert Göckeritz¹, Nico Homonnay¹, Alexander Müller¹, Bodo Fuhrmann², Georg Schmidt^{1,2}

¹Institut für Physik, Martin-Luther-Universität Halle–Wittenberg, 06099 Halle

²Interdisziplinäres Zentrum für Materialwissenschaften, Martin-Luther-Universität Halle–Wittenberg, 06099 Halle

Organische Spinventile (OSV) mit sub-Mikrometer Abmessungen wurden hergestellt. Die auf einem $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3/\text{Alq}_3/\text{Co}$ Trilayer basierenden Elemente zeigen resistives Widerstandsschalten von bis zu 5 Größenordnungen. Zugleich weisen sie einen Magnetowiderstand von bis zu 70% auf, der bei Anlegen eines Spannungspulses sein Vorzeichen wechseln kann. Diese Kombination von Phänomenen ist normalerweise nur in multiferroischen Tunnelkontakten zu beobachten. Modellrechnungen weisen darauf hin, dass das Schalten von einer Modifikation der $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ -Oberfläche (LSMO) herrührt. Diese Modifikation beeinflusst das Tunneln von Ladungsträgern und somit sowohl den Tunnelwiderstand als auch den Tunnelmagnetowiderstand, der von Pinholes in der Organischen Schicht herrührt.

Resistives Schalten (RS) in organischen Spinventilen wurde bereits in der Vergangenheit beobachtet [1]. In diesen Experimenten konnte jedoch keine klare Ursache für den Effekt nachgewiesen werden. In den genannten Bauelementen trat bei Anlegen eines Spannungspulses eine Änderung des Widerstandes auf. Zugleich änderte sich auch der relative Magnetowiderstand (MR). Da mit steigendem Gesamt-widerstand der relative MR abnahm, kann davon ausgegangen werden, dass RS und MR an unterschiedlichen Stellen auftreten und der erhöhte Widerstand den MR überdeckt. Es sollte erwähnt werden, dass eine Kombination von RS und MR auch in multiferroischen Tunnelementen bestehend aus LSMO/Ferroelektrikum/Ferromagnet beobachtet wird [2]. Hierbei wird das RS auf Tunnel-elektrowiderstand und eine Änderung des MR auf magnetoelektrische Kopplung zurückgeführt.

Wir haben Untersuchungen Nano-OSV durchgeführt, in denen sowohl RS als auch eine Änderung des MR während der Widerstandsänderung auftritt.

Die OSV wurden mittels eines von uns entwickelten Lithographieprozesses hergestellt, der es erlaubt OSV mit lateralen Abmessungen unter einem μm herzustellen. Aufgrund einer Vielzahl von Experimenten können wir davon ausgehen, dass der MR in den hergestellten Spinventilen Tunnelmagnetowiderstand ist, der an Pinholes im organischen Halbleiter auftritt. Abbildung 1 zeigt das Spinventil-signal für ein ausgewähltes Bauelement. Nach Anlegen eines positiven bzw. negativen Spannungspulses wurde jeweils eine MR-Messung durchgeführt. Der Gesamt-widerstand des Bauelements ändert sich zwischen den beiden Messungen um drei Größenordnungen. Der relative MR ändert sowohl seinen Absolutwert als auch sein Vorzeichen (von +26% auf -38%).

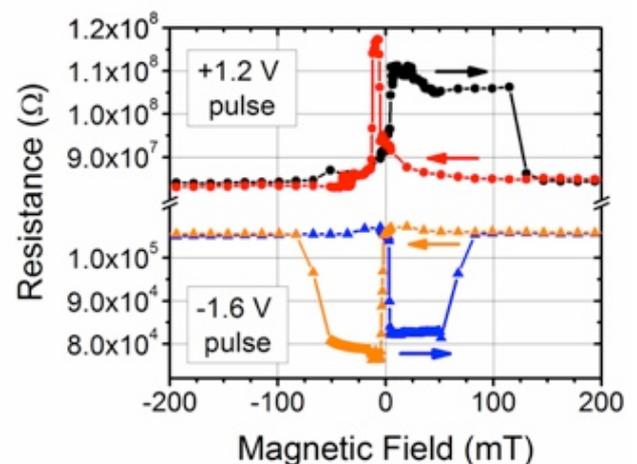


Abb. 1: HRTEM-Aufnahme einer getemperten Probe mit $D = 3 \text{ nm}$. In der unteren linken Ecke ist das Si-Substrat sichtbar.

In anderen OSV zeigt sich ein ähnliches Bild. Das resistive Schalten folgt hierbei einer Hysteresekurve, wobei das Minimum bei negativen und das Maximum bei positiven Spannungen (Masse an

LSMO) angenommen wird. Je nach Bauelement kann die Widerstandsänderung bis zu fünf Größenordnungen betragen. Die Untersuchung von I/U-Kennlinien in verschiedenen Zuständen zeigt, dass der Transport durch Tunneln dominiert wird. Ähnliches Schalten wurde bereits von Grünewald et al. beobachtet [3] und auf die Entstehung und Migration von Sauerstofffehlstellen an der LSMO-Oberfläche zurückgeführt, die eine variable Tunnelbarriere hervorriefen. Eine Analyse unserer Ergebnisse mittels eines erweiterten Simmons-Fits [4] zeigt jedoch, dass eine einzelne Barriere nicht zur Erklärung der Ergebnisse ausreicht. Vielmehr handelt es sich um eine zweifache Barriere mit einem statischen und einem variablen Anteil. Die statische Barriere wird durch den organischen Halbleiter im Pinhole gebildet. Direkt angrenzend daran erzeugen Sauerstoffleerstellen im LSMO eine zweite Barriere, die sich ähnlich wie bei [3] im elektrischen Feld verschieben lassen. Durch die zusätzliche Barriere werden jedoch in den hier gezeigten Experimenten die elektrischen Felder soweit verändert, dass einzig eine Bewegung von Leerstellen aber keine Erzeugung und Vernichtung stattfindet.

Die Hypothese, dass das Schalten allein im LSMO stattfindet wird außerdem dadurch unterstützt, dass OSV in denen AlQ_3 durch H_2PC ersetzt wurde fast identische Ergebnisse liefern, obwohl diese beiden organischen Halbleiter völlig unterschiedliche Eigenschaften haben.

Zum Schluss soll noch einmal auf die Ergebnisse zu multiferroischen Tunnелеlementen eingegangen werden. Diese zeichneten sich vor allem durch resistives Schalten und durch die Änderung des MR während des Schaltprozesses aus. Es ist augenfällig, dass unsere Experimente fast identische Effekte zeigen. Allerdings sind sowohl das resistive Schalten als auch die Änderung des relativen MR bei uns deutlich größer als in [2]. In unseren Experimenten beruht der Schaltvorgang allein auf dem LSMO. Auch die veröffentlichten Ergebnisse zu multiferroischen Tunnелеlementen nutzen LSMO jeweils eine LSMO Elektrode, haben aber an Stelle des organischen Halbleiters eine ferroelektrische Barriere. Es stellt sich somit die Frage, ob die Barriere und eine eventuelle magnetoelektrische Kopplung an das LSMO wirklich entscheidend sind

oder ob auch dort nur eine Modifikation der LSMO Elektrode stattfindet

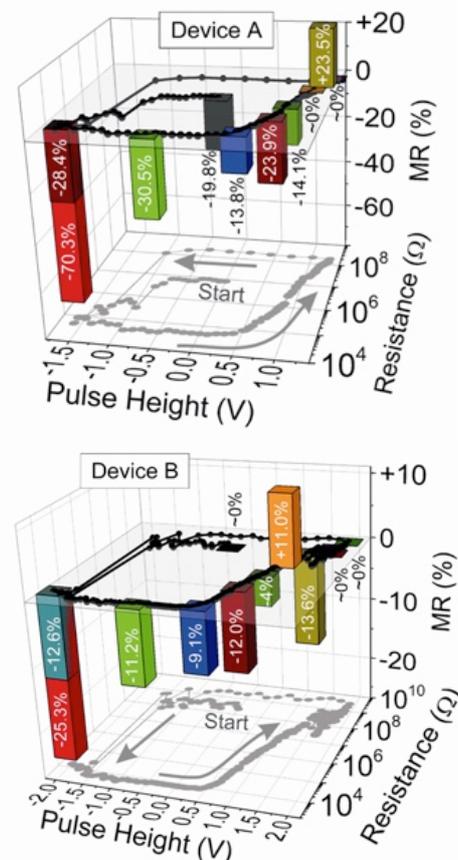


Abb. 2: RS und MR nach verschiedenen Spannungspulsen in zwei verschiedenen OSV. Die schwarze Linie zeigt jeweils den Widerstand nach dem entsprechenden Spannungspuls, der farbige Balken zeigt den zugehörigen MR an ausgewählten Punkten.

- [1] M. Prezioso et al. Adv. Mater. 23, 1371 (2011)
- [2] Z.B. D. Pantel et al. Nat. Mater. 11, 289 (2012)
- [3] M. Grünewald et al. Phys. Rev. B 90, 205208 (2014)
- [4] M.G. Chapline et al. J. Appl. Phys. 101, 83706 (2007)

Diese Arbeit wurde durch die DFG im SFB 762 und durch die EU im Projekt HINTS unterstützt.

Relevante Veröffentlichungen 2015 im Rahmen des Projekts/der Zusammenarbeit:

R. Göckeritz, N. Homonnay, A. Müller, T. Richter, B. Fuhrmann, and G. Schmidt, Appl. Phys. Lett. **106** (2015) 102403.

Unidirektionaler Wärmetransfer durch Spinwellen in Yttriumeisengranat

Olga Wid¹, Jan Bauer¹, Alexander Müller², Otwin Breitenstein³, Stuart S. P. Parkin⁴, Georg Schmidt^{1,3}

¹Institut für Physik, Martin-Luther-Universität Halle–Wittenberg, 06099 Halle

²Max-Planck-Institut für Mikrostrukturphysik, Weinberg 2, 06120 Halle

³Interdisziplinäres Zentrum für Materialwissenschaften, Martin-Luther-Universität Halle–Wittenberg, 06099 Halle

Der unidirektionale Wärmetransfer durch Spinwellen in dünnen Yttriumeisengranat (YIG) Schichten wurde mittels Lock-In Thermographie untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass durch die asymmetrische Ausbreitung der nicht reziproken Damon-Eshbach Moden (DEM) Temperaturasymmetrien von mehreren mK entstehen können. Aufgrund der besonderen Eigenschaften der DEM ändern diese Unterschiede ihr Vorzeichen, wenn das externe Magnetfeld umgekehrt wird.

2013 zeigten An et al., dass in dicken YIG-Schichten bei passender Anregung anisotroper und asymmetrischer Wärmetransport stattfinden kann. Grund hierfür ist die Tatsache, dass magnetostatische Oberflächenspinwellenmoden (MSSSW oder auch Damon Eshbach Moden) an Ober- und Unterseite einer magnetischen Schicht jeweils entgegengesetzte k -Vektoren haben, die senkrecht auf der Magnetisierung \sin der Ebene liegen. In dicken YIG Schichten können die DEM durch eine Antenne verstärkt auf einer Seite der Schicht angeregt werden, so dass eine Vorzugsrichtung der Ausbreitung und somit des Wärmetransports besteht.

Für dünne YIG Schichten ist das zu erwartende Verhalten weniger offensichtlich. Aufgrund der endlichen Eindringtiefe der DEM können an Ober- und Unterseite der Schicht jeweils beide k -Vektoren auftreten, wobei aber für jeden k -Vektor leicht unterschiedliche Amplituden auf den beiden Seiten zu erwarten sind. Auch ist eine selektive Anregung auf Ober oder Unterseite nicht mehr möglich, da das Anregungsfeld auf beiden Seiten der Schicht etwa gleich groß ist. Andererseits kann aber aufgrund der Geometrie des Wellenleiters eine nach einer Seite gerichtete Anregung erfolgen und auch die

einseitige Grenzfläche zum Substrat (hier YIG/GGG) eine verstärkte Dämpfung auf einer Seite der Schicht verursachen. In jedem Fall ist davon auszugehen, dass der Effekt des asymmetrischen Wärmetransports in dünnen YIG-Schichten wesentlich schwächer ist als in dicken. Um trotzdem eine detaillierte Untersuchung durchführen zu können, wurde an Stelle der von An et al. Verwendeten Infrarotkamera in Zusammenarbeit mit dem Max-Planck-Institut für Mikrostrukturphysik die Lock-In Thermographie eingesetzt, die Temperaturdifferenzen im μK Bereich auflösen kann. Gleichzeitig ermöglicht sie eine Ortsauflösung von etwa $30 \mu\text{m}/\text{Pixel}$.

Für die Experimente wird auf einer 200 nm dicken YIG Schicht mit den Abmessungen $5 \times 8 \text{ mm}$ ein koplanarer Wellenleiter mittels Elektronenstrahl-lithographie und Lift-Off hergestellt. Anschließend wird die Probe mit Tusche geschwärzt um homogene Wärmeemission zu ermöglichen.

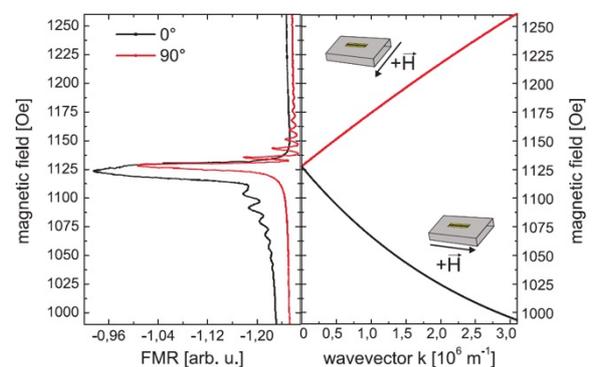


Abb. 1: Spinwellenspektren (links) und Dispersionsrelation (rechts) für die untersuchte Probe. Die schwarzen Kurven zeigen die DEM, die roten Kurven die BVM.

Der Wellenleiter wird anschließend mit Hochfrequenzmessspitzen direkt kontaktiert. An die Probe

wird mittels eines rotierbaren Elektromagneten ein externes Magnetfeld in der Probenebene angelegt. Zunächst wird in der für die DEM passenden Geometrie (B-Feld parallel zum CPW) bei 5 GHz bei einem Magnetfeldscan ein Spektrum der Spinwellen aufgenommen. Es zeigt die uniforme Mode bei 1125 Oe sowie diskrete DEM bei niedrigeren Feldern. Die Diskretisierung entsteht, da die Geometrie des Wellenleiters nur einen bestimmten k -Vektor und ganzzahlige Vielfache zulässt. Ein ähnliches Bild ergibt sich für die Backward Volume Mode (BVM) für die das Magnetfeld in der Ebene senkrecht zum CPW angelegt wird. In diesem Fall treten die Spinwellen entsprechend der Dispersion bei höheren Feldern auf. Anschließend werden für verschiedene Punkte der Spektren Bilder mit der Lock-In Thermographie aufgenommen, die in Abbildungen 2 und 3 zu sehen sind. Die mit H^+ und H^- gekennzeichneten Bilder zeigen jeweils Aufnahmen, die bei entgegengesetzten Magnetfeldern gleicher Größe aufgenommen wurden. Für die DEM maximaler Amplitude ergibt sich hier eine vom CPW aus abnehmende Erwärmung der Umgebung, die die durch die Magnonen dissipierte Wärme widerspiegelt. In diesen Bildern ist zunächst keine Asymmetrie zu erkennen. Wird jedoch pixelweise die Differenz gebildet, so ergibt sich ein antisymmetrischer Temperaturverlauf, das heißt, beide Bilder sind bezüglich des CPW asymmetrisch, mit Umkehr des Magnetfeldes wird diese Asymmetrie jedoch mit dem CPW als Symmetrieachse gespiegelt. Es liegt also eine asymmetrische Emission von Spinwellen vor, wie schon von An et al. beobachtet. Die Kontrollmessungen für die BVM bestätigen dies. In diesem Fall wird die Messung ebenfalls für die Spinwellen maximaler Amplitude vorgenommen. Auch hier zeigt sich eine Erwärmung für beide Magnetfeldrichtungen, die Differenz beider Bilder zeigt aber keine Asymmetrie bzw. keinerlei Temperaturprofil. Das Temperaturprofil ändert sich mit Feldumkehr also nicht. Es ist zu beachten, dass für die direkten Aufnahmen (H^+ und H^-) hellere Grauwerte eine Erwärmung anzeigen. Im Differenzbild bedeuten hellere Grauwerte nur einen höheren Wert der Differenz zwischen den Bildern. Wichtig ist noch zu bemerken, dass in der DEM Geometrie durch den Überlapp der Magnonen und der uniformen Mode der FMR eine asymmetrische Erwärmung nicht vollständig zu

vermeiden ist. Weitere Details können [2] entnommen werden.

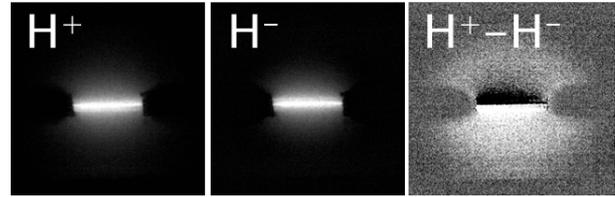


Abb. 2: Lock-In-Thermographieaufnahmen der YIG Probe mit CPW für positives und negatives H-Feld (H^+ und H^-) in der DEM Geometrie. Das Differenzbild ($H^+ - H^-$) zeigt, dass die aufgenommenen Temperaturprofile bezüglich des CPW asymmetrisch sind.

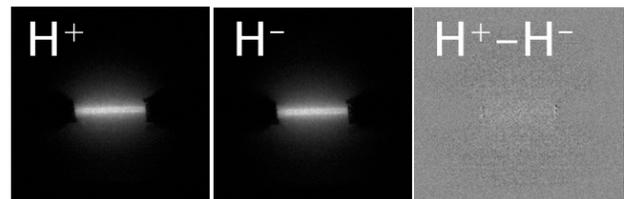


Abb. 3: Lock-In-Thermographieaufnahmen der YIG Probe mit CPW für positives und negatives H-Feld (H^+ und H^-) in der BVM Geometrie. Es liegt eine Erwärmung vor. Das Differenzbild ($H^+ - H^-$) zeigt jedoch, dass die aufgenommenen Temperaturprofile identisch sind.

Es konnte also gezeigt werden, dass auch in dünnen YIG Schichten durch die nicht reziproken DEM ein asymmetrischer Wärmetransport und somit ein asymmetrisches Temperaturprofil erzeugt werden kann. Dies ist besonders bemerkenswert, da in dieser Geometrie häufig eine Messung des inversen Spin-Hall-Effektes vorgenommen wird. Hierbei werden Spannungen teilweise im nV Bereich gemessen, die aufgrund Ihrer Vorzeichenumkehr bei Magnetfeldumkehr von Thermospannungen unterschieden werden können. Der hier gezeigte Effekt ermöglicht jedoch die Entstehung von Thermospannungen, die ihr Vorzeichen mit der Feldumkehr wechseln, also nicht mehr vom ISHE zu unterscheiden sind.

[1] T. An et al., Nat Mater, 2013, 12, 549-553

[2] O. Wid et al. Scientific Reports 6, 28233 (2016)

Die Untersuchungen wurden im Rahmen des SFB 762 im Teilprojekt B9 durchgeführt.

Morphologie und magnetische Eigenschaften dünner Ferrit-spinell-Filme in Abhängigkeit von der Synthesetemperatur

Norman Quandt¹, Frank Syrowatka², Stefan G. Ebbinghaus¹

¹Institut für Chemie, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Kurt-Mothes-Straße 2, 06120 Halle (Saale)

²Interdisziplinäres Zentrum für Materialwissenschaften, Heinrich-Damerow-Straße 4, 06120 Halle (Saale)

Die magnetischen und chemischen Eigenschaften der Ferrite (allgemeine Summenformel AFe_2O_4) hängen stark vom zweiwertigen Kation A ab, woraus sich verschiedene Anwendungsmöglichkeiten ergeben. So wird z.B. $CoFe_2O_4$ als Datenspeicher oder als magnetooptischer Träger eingesetzt, während $MgFe_2O_4$ in der heterogenen Katalyse und $CuFe_2O_4$ als Gassensor angewandt wird [1-3]. Für viele dieser Anwendungen werden dünne Filme benötigt, die sich neben Gasphasenabscheidungen auch über nasschemische Verfahren herstellen lassen.

In unseren Untersuchungen wurden Ferrit-spinellfilme durch Rotationsbeschichtung hergestellt, wobei zur Erhaltung der gewünschten Schichtdicken fünf sukzessive Beschichtungsschritte durchgeführt wurden. Es wurden AFe_2O_4 ($A = Co, Mg, Cu$) Schichten auf Pt-beschichteten Si-Substraten gebildet und bei Temperaturen von 500 °C bis 1000 °C kristallisiert. XRD, IR und Raman-spektroskopie zeigen die Bildung der phasenreinen Spinelle. Die jeweiligen Filme sind ca. 150 nm dick, wie in Abbildung 1 gezeigt. Dabei ist zu erkennen, dass es durch geeignete Kristallisationstemperaturen gelingt, Partikel zu erhalten, deren Höhe gleich der Gesamtschichtdicke ist. Die $CoFe_2O_4$ -Filme und $CuFe_2O_4$ -Filme weisen ein ausgeprägtes säulenartiges Wachstum auf, wobei die Kristallite senkrecht zur Substratoberfläche stehen. Im Gegensatz dazu bestehen die $MgFe_2O_4$ -Filme eher aus plättchenförmigen Partikeln.

Das magnetische Verhalten der Spinellfilme wurde hinsichtlich der Abhängigkeit von der Synthesetemperatur untersucht.

Dabei zeigte sich, dass die Texturierung der Partikel sich in einem anisotropen magnetischen Verhalten der Filme widerspiegelt (Abb. 2a und 2b).

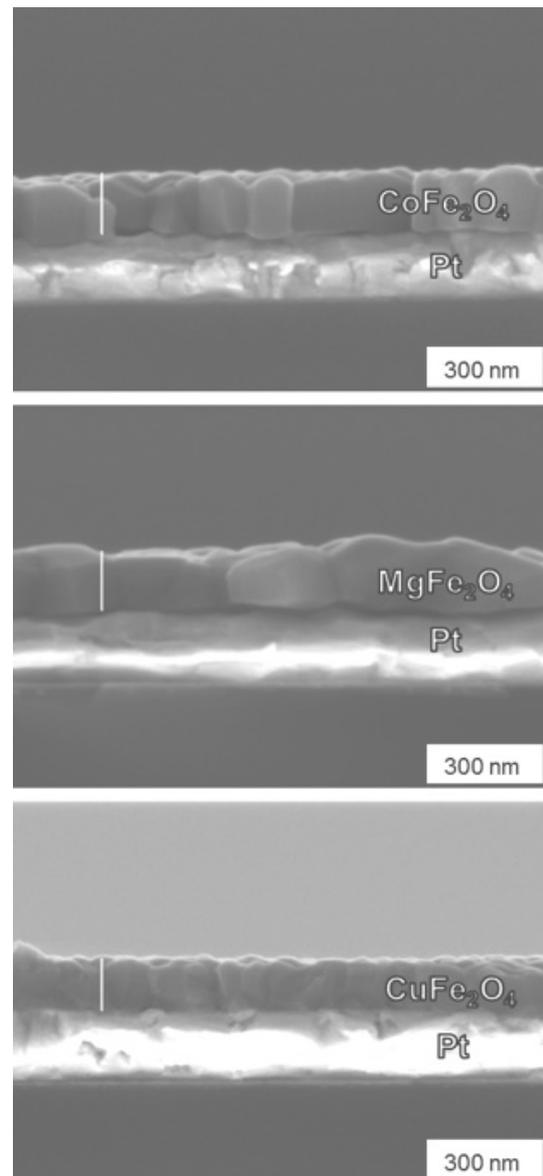


Abb. 1: REM-Querschnittsaufnahmen von a) $CoFe_2O_4$ kristallisiert bei 900 °C, b) $MgFe_2O_4$ bei 1000 °C und c) $CuFe_2O_4$ bei 700 °C.

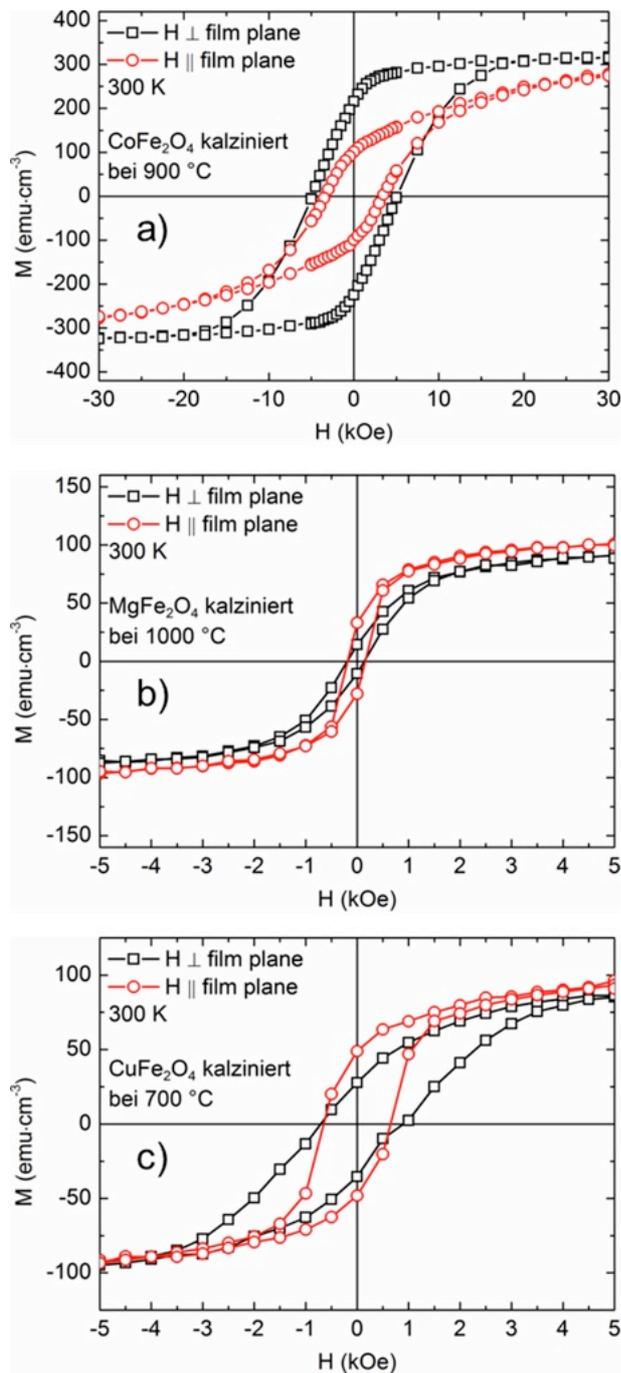


Abb. 2: Magnetische Messungen bei 300 K mit Magnetfeld senkrecht und parallel zur Filmebene a) CoFe_2O_4 kalziniert bei 900 °C, b) MgFe_2O_4 kalziniert bei 1000 °C, c) CuFe_2O_4 kalziniert bei 700 °C.

Für CoFe_2O_4 wurden die größten Werte für Sättigungsmagnetisierung, Remanenzmagnetisierung und Koerzitivfeld gefunden und die magnetisch weiche Achse steht senkrecht zur Filmebene. Für

MgFe_2O_4 (Abb. 2c) fand sich nur eine geringe Anisotropie der Magnetisierung in Korrespondenz mit der eher regulären Partikelmorphologie. Die magnetisch weiche Achse liegt hier in der Filmebene.

Im Falle des CuFe_2O_4 wurde wiederum eine starke magnetische Anisotropie beobachtet. Obwohl die REM-Untersuchungen ein säulenartiges Partikelwachstum belegen, liegt die magnetisch weiche Achse überraschenderweise in der Filmebene.

Ähnliche Verhalten wurden für die drei Spinellsysteme auch für die anderen Synthesetemperaturen gefunden, wobei die Änderung der Anisotropie unterschiedlich stark ausgeprägt ist.

In weiterführenden Arbeiten soll der Einfluss der Schichtdicke auf die magnetische Anisotropie eingehend untersucht werden. Dazu sollen über die Anzahl der einzelnen Rotationsbeschichtungsschritte Schichtdicken zwischen 50 und 250 nm realisiert werden.

- [1] M. Khodaei, S.A. Seyyed Ebrahimi, Y.J. Park, J.M. Ok, J.S. Kim, J. Son, J. Magn. Magn. Mater. **340** (2013) 16–22.
- [2] A.K. Giri, E.M. Kirkpatrick, P. Moongkhamklang, S.A. Majetich, V.G. Harris: Appl. Phys. Lett. **80** (2002) 2341.
- [3] M.D.P. Silva, F.C. Silva, F.S.M. Sinfrônio, A.R. Paschoal, E.N. Silva, C.W. de A. Paschoal: Condens. Matter Mater. Sci. (2013) 1–27.

Die Untersuchungen wurden im Rahmen des SFB 762 „Funktionalität oxidischer Grenzflächen“ (INST271/240-2) durchgeführt.

Oberflächenverstärkter Raman-Effekt (SERS) in plasmonischen Nanoantennenketten

Yong-Tae Kim¹, Frank Heyroth², Sven Schlenker², Hartmut S. Leipner², Jörg Schilling³

¹Fachgruppe μ MD, Institut für Physik, Martin-Luther-Universität Halle–Wittenberg, 06099 Halle

²Interdisziplinäres Zentrum für Materialwissenschaften, Martin-Luther-Universität Halle–Wittenberg, 06099 Halle

³ZIK SiLi-nano, Martin-Luther-Universität Halle–Wittenberg, 06099 Halle

In parallel zueinander periodisch angeordneten Ketten von Nanoantennen bilden sich deutliche Gitterresonanzen aus. Zusätzlich kommt es innerhalb der Nanoantennenketten noch zur Feldkonzentration zwischen benachbarten Nanoantennen (sogenannte „Hot-spots“). Diese führen zur deutlichen polarisationsabhängigen Erhöhung des SERS-Effekts für Moleküle, die an die Nanoantennen gebunden sind.

Der Raman-Effekt erlaubt es, die für Moleküle charakteristischen Schwingungsfrequenzen im sichtbaren Spektralbereich detektieren zu können und ermöglicht somit eine hochspezifische Identifizierung chemischer und biologischer Substanzen vorzunehmen. Da das detektierte frequenzverschobene Ramansignal aber normalerweise äußerst schwach ist, besteht seit geraumer Zeit ein hohes Interesse am oberflächenverstärkten Raman-Effekt, bei dem die lokale Konzentration des Lichtes an Edelmetalloberflächen und speziell in dort vorhandenen nanoskopischen Gräben eine entscheidende Rolle spielt. Grund für diese Feldkonzentration der Lichtwellen im Nahfeld von Metallen sind die dort lokalisierten Oberflächenplasmonen. Insbesondere wenn sich zwei Metalloberflächen gegenüberstehen, kann es durch Kopplung der Oberflächenplasmonenfelder im Nahfeld der beiden Metalloberflächen zu sogenannten „Hot-spot“ in engen Gräben und Zwischenräumen kommen. Moleküle, die genau dort platziert werden, werden dann sehr effektiv zur Ramanstreuung angeregt.

Dieses Prinzip wurde beim Design und der Herstellung von speziellen Substratoberflächen gezielt ausgenutzt. Ziel ist es, eine reproduzierbare metallische Nanostruktur zu schaffen, die eine reguläre (möglichst hohe) Dichte an hot-spots aufweist. Dazu wurde mittels Elektronenstrahlithographie und

einem nachfolgenden lift-off-Prozeß Ketten von ca. 50 nm hohen Gold-Nanoscheibchen hergestellt. Diese fungieren als Nanoantennen und weisen aufgrund ihrer Abmessungen Einzelpartikel-Plasmonenresonanzen im sichtbaren Spektralbereich auf. Die Lücken zwischen den Nanoantennen derselben Kette betragen < 50 nm und stellen die Positionen der beabsichtigten Hot-spots dar. Zusätzlich sind die Nanoantennenketten noch parallel zueinander ausgerichtet und in einem festen periodischen Abstand angeordnet [Abb. 1].

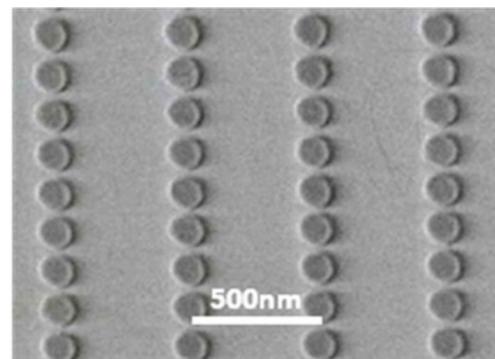


Abb. 1: Periodisch angeordnete Gold-Nanoantennenketten auf Glas. Hergestellt mittels Elektronenstrahlithographie und Lift-off-Prozeß am IZM.

Fällt senkrecht auf diese Struktur kollimiertes Licht, so werden die Nanoantennen zu kohärenten Oszillationen angeregt. Aufgrund der periodischen Anordnung der Ketten kommt es dabei zur Kopplung zwischen benachbarten Ketten über die abgestrahlten Fernfelder der Nanoantennen. Entspricht der Abstand zwischen den Ketten gerade etwa der Wellenlänge des einfallenden Lichts, kommt es zur gegenseitigen Verstärkung der Oszillationen benachbarter Ketten und der Ausbildung von Oberflächenplasmonen-Gitterresonanzen. Diese können in Transmissionsspektren eindeutig als dips beobachtet werden [Abb. 2].

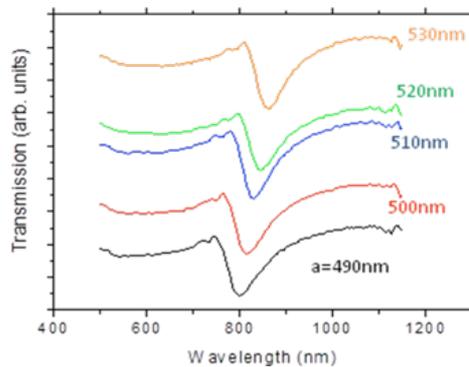


Abb.2 : Transmissionsspektren von Nanoantennenketten mit unterschiedlichen Perioden a . Mit steigendem Abstand a der Ketten verschiebt sich die Gitterresonanz zu längeren Wellenlängen.

Die spektrale Position der Gitterresonanzen hängt von der Größe der einzelnen Nanoantennen - vor allem aber vom Abstand der Ketten ab. Außerdem hängt die Anregung der Gitterresonanzen entscheidend von der Polarisation des einfallenden Lichtes ab. Ist das Licht parallel zu den Ketten polarisiert, kommt es zu der beschriebenen Beobachtung der starken Gitterresonanzen, da dann die Dipolstrahlung jeder Nanoantenne senkrecht zur Kettenrichtung maximal wird und eine optimale Kopplung der Plasmonenoszillationen benachbarter Ketten auftritt. Ist das Licht dagegen senkrecht zur Kettenrichtung polarisiert, ist die Kopplung minimal.

Eine Polarisationsabhängigkeit tritt dabei nicht nur für die beschriebene Fernfeldkopplung zwischen den Nanoantennen auf. Auch die Ausbildung der hot-spots zwischen den Nanoantennen ist davon entscheidend betroffen. Dies konnte durch polarisationsaufgelöste Raman-Messungen an den mit dem Molekül 4-methylbenzenethiol (4-MBT) dekorierten Nanoantennenketten demonstriert werden [Abb. 3]. Aufgrund der Thiol-Gruppen binden die 4-MBT-Moleküle direkt an die Gold-Nanoantennen und bilden im Idealfall eine mono-molekulare Beschichtung. Damit befinden sich auch Moleküle in den < 50 nm Lücken zwischen den Nanoantennen derselben Kette. Ist das elektrische Feld der Lichtwelle parallel zu den Ketten polarisiert überlagern sich die Nahfelder der oszillierenden Nanoantennen. Da diese entlang der Ketten maximal sind, kommt es besonders in den schmalen Lücken innerhalb der Ketten zur Ausbildung von starken

Nahfeldüberhöhungen (den Hot-spots). Das Raman-Signal für diese Polarisation wird maximal (blaue Kurve in Abb. 3). Bei der Polarisation senkrecht zu den Ketten wird das Nahfeld in den Lücken dagegen minimal, da senkrecht zur Oszillationsrichtung der Nanoantennen die Nahfeldkomponenten des Dipolfeldes verschwinden (rote Kurve in Abb. 3).

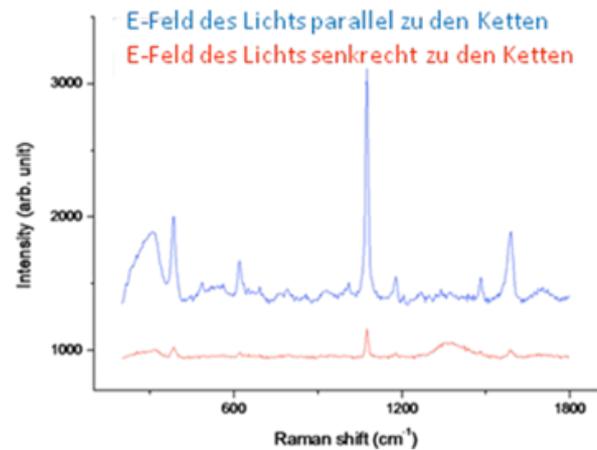


Abb. 3: Polarisationsabhängigkeit des Raman-Signals von 4-MBT-Molekülen in der Nanoantennenkettenstruktur

In Zukunft soll versucht werden, durch genaues Tunen der Kettenabstände auf die Laserwellenlänge eine Kombination aus Nahfeldkopplung und Fernfeldkopplung zur effektiven Verstärkung des Raman-Signals auszunutzen und so eine „optimale“ Nanostruktur zur hot-spot-Erzeugung zu generieren.

Die Untersuchungen wurden im Rahmen des DFG-Projektes „Durchstimmbarer oberflächenverstärkter Raman-Effekt an metallischen Nanostabensembles“ (WE 4051/15-1) durchgeführt.

Charakterisierung nanostrukturierter amorpher Materialien

Stephan Sander¹, Thomas Pfeiffer¹, Melanie Dathe¹, Hans Roggendorf¹, Dirk Enke², Frank Syrowatka³

¹FG Anorganisch-Nichtmetallische Materialien, Martin-Luther-Universität Halle–Wittenberg, Von-Danckelmann-Platz 3, 06099 Halle

²Institut für Technische Chemie, Universität Leipzig, Linné-Str. 3-4, 04103 Leipzig

³Interdisziplinäres Zentrum für Materialwissenschaften, Martin-Luther-Universität Halle–Wittenberg, 06099 Halle

Entmischungen. Strukturell unverträgliche Struktureinheiten können – jede für sich – Gläser bilden jedoch nicht in immer in einer homogenen Struktur. Bei den technischen Gläsern sind Natriumsilicate und Natriumborate als gute Glasbildner bekannt, die als jedoch nur bei hohen Temperaturen oder sehr rascher Abkühlung durchgehend mischbar sind. Diese Natrium-Borosilicatgläser besitzen dennoch ein sehr breites Anwendungsspektrum. Das System $\text{Na}_2\text{O} - \text{B}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$ weist eine Mischungslücke im natriumarmen Bereich auf. Schmelzen mit Zusammensetzungen Im Kern der Mischungslücke entmischen bei geeigneter Temperaturbehandlung spinodal in eine silicatreiche Phase sowie eine natriumreiche Boratphase und können Durchdringungsstrukturen ausbilden. Durch Herauslösen der Boratphase entsteht ein im Nanometerbereich strukturiertes poröses Glas, das z. B. als Filtermedium oder Templat für Katalysatoren eingesetzt werden kann. Im Vordergrund neuerer Arbeiten standen Versuche zur Beeinflussung der Porenstruktur hinsichtlich Form und Größe durch Variation von Zusammensetzung und Temperaturbehandlung. Ziel war eine Vergrößerung der Porenweite in den μm -Bereich. Im Rasterelektronenmikroskop können die entstandenen Strukturen nach chemischer Auslaugung sichtbar gemacht werden, wie Bild 1 zeigt, und damit der Erfolg der Entwicklungsstrategie überprüft werden. Das Ergebnis einer Porengrößenanalyse mittels Hg-Intrusion (Bild 2) belegt, dass Poren im gewünschten Größenbereich erzeugt werden konnten.

Untersuchungen an Wasserglas als Bindemittel. Wasserglas ist eine flüssige Phase, die durch Auflösen von Natrium – Silicatgläsern in Wasser oder durch hydrothermalen Direktaufschluss von Kieselsäure in Laugen entsteht. Zur hydrothermalen Herstellung wurden unterschiedlichste SiO_2 -Materialien wie Opal (siehe Bild 3), Diatomeenerde, Reisschalenasche, pyrogene Kieselsäure, eingesetzt. Im Falle der Anwendung als Bindemittel wird

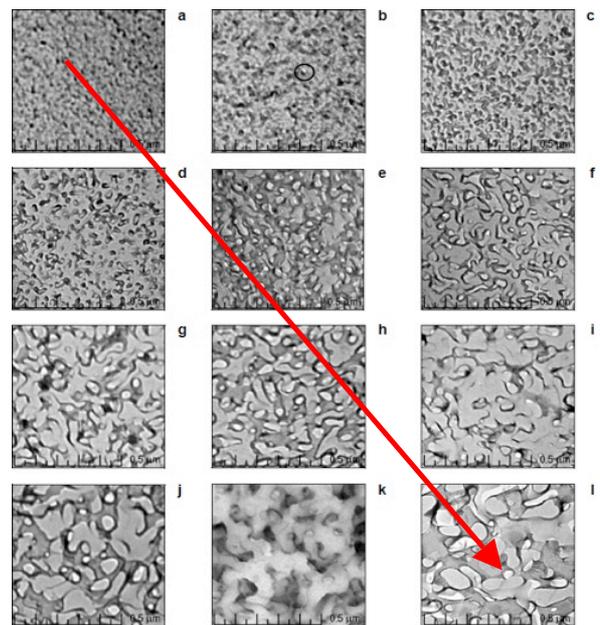


Abb. 1: Entmischungsstrukturen in Silicatgläsern. In Richtung des Pfeils wurden Zeit und Temperatur der Entmischungsbildung erhöht.

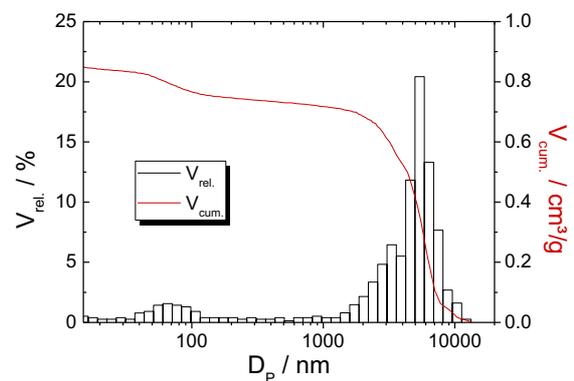


Abb. 2: Porenhäufigkeit und Porenvolumen eines entmischten und ausgelaugten Natrium-Boro-silicatglas mit 7 M.-% Na_2O und 33 M.-% B_2O_3 als Funktion der Porengröße; 120 h bei 730 °C.

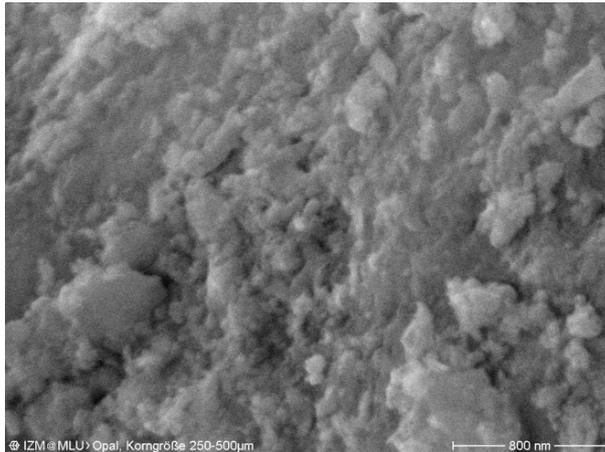


Abb. 3: Nanostruktur von gemeinem Opal, der zur Herstellung von Wasserglas eingesetzt wurde.

die flüssige Phase durch Trocknen oder Reaktion mit atmosphärischem CO_2 in ein festes Gel überführt und kann dann Zuschlagsstoffe binden.

Die Anwendung von Wasserglas als Bindemittel erfordert auch Untersuchungen an Bruchflächen. Die getrockneten Bindemittel enthalten jedoch H_2O , das im Vakuum entzogen. Zur Vermeidung solcher strukturellen Veränderungen bietet sich das ESEM an, das durch geringe H_2O -Partialdrücke in der Messkammer der Trocknung entgegen wirken kann. Bruchflächen von getrocknetem Wasserglas werden in den Bild 4. Das Bild zeigt typische Merkmale eines Sprödbruches aber auch Inhomogenitäten im Material selber.

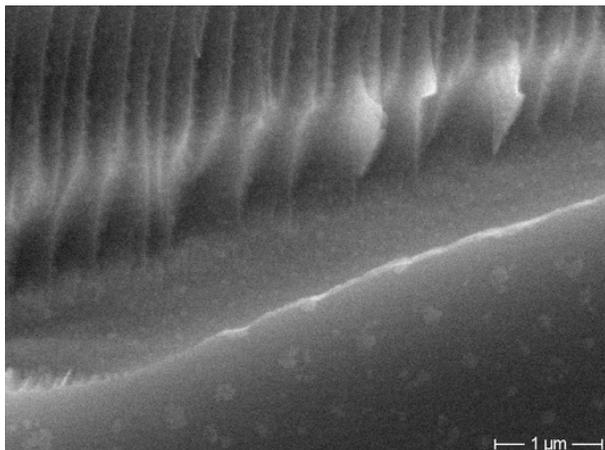


Abb. 4: Bruchfläche eines bei 40 °C getrockneten Wasserglases, das durch Auflösen pyrogener Kieselsäure in NaOH hergestellt wurde.

Untersuchungen an Schlacken. Schlackengläser entstehen bei der Roheisenproduktion und dienen zur Abtrennung von Gangart und Verunreinigungen von der Metallschmelze. Chemisch gesehen handelt es sich um Calcium–Alumosilicatgläser mit zementähnlicher Zusammensetzung, die daher auch als latent hydraulisches Bindemittel eingesetzt werden. Ihre Reaktivität, die für die Kinetik des Abbindeprozesses von Bedeutung ist, wird durch Zusammensetzung und Struktur bedingt. Rasterelektronenmikroskopie diente dabei zur Identifizierung von Inhomogenitäten, die wahrscheinlich auf Entmischung zurückzuführen sind (Bild 6). Die Detailkenntnisse zur Mikrostruktur halfen bei der Interpretation der Messungen zur Reaktionskinetik.

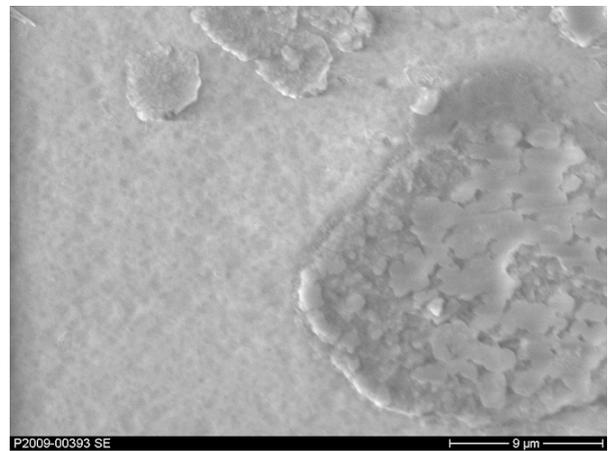


Abb. 5: Bruchfläche eines industriellen Hüttensandes, bei dem durch Anwittern Mikro-inhomogenitäten sichtbar wurden.

Kolloid-definierte optische Oberflächen und Strukturen mit maßgeschneiderten Streueigenschaften

Peter M. Piechulla¹, Alexander Sprafke¹, Ralf B. Wehrspohn^{1,2}

¹ Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Institut für Physik, Fachgruppe μ MD, Heinrich-Damerow-Straße 4, 06120 Halle.

² Fraunhofer-Institut für Mikrostruktur von Werkstoffen und Systemen, Walter-Hülse-Straße 1, 06120 Halle

Selbstorganisation von Kolloiden ist ein vielversprechender Bottom-up-Ansatz zur Herstellung zwei- und dreidimensionale photonischer Strukturen. Gegenüber der Strukturierung von Materialien mithilfe klassischer Photolithographie ergeben sich andere Designfreiheiten und Kostenvorteile. Eine Schlüsselanwendung sind Lichtmanagementstrukturen für Photovoltaik-Anwendungen.

Mikro- und nanostrukturierte optische Oberflächen und Strukturen sind ein Forschungsfeld von großem und langanhaltendem Interesse, motiviert auch durch die Anwendung als Lichtmanagement-Struktur in optoelektronischen Bauteilen, wie beispielsweise Solarzellen [1]. Durch den immer breiteren Einsatz numerischer Simulationen ist die Definition von anwendungsspezifischen Strukturgeometrien stark erleichtert worden, allerdings ist die Herstellung gerechneter Strukturen oft nur unter großem Aufwand möglich. Ein Ansatz, diesem Rückstand in der praktischen Umsetzung zu begegnen, ist die Nutzung von Selbstorganisationseffekten bei Kolloiden.

Als Beispiel dient hier die Herstellung künstlicher Opale aus Kunststoffpartikeln. Eine monodisperse Kolloidsuspension wird auf ein Substrat aufgesprüht und die Partikel ordnen sich während des anschließenden Trocknungsprozesses in kristalliner Form an. Das so gewonnene Template wird durch Atomlagenabscheidung (ALD, Beneq TFS 200) konformal beschichtet, sodass stabile dreidimensionale Struktur entsteht, welche über die Schichtzusammensetzung einstellbare optische und elektrische Eigenschaften aufweist. Die optischen Eigenschaften der Schicht lassen sich beispielsweise anhand von flachen Referenzproben durch spektrale Ellipsometrie bestimmen. Das Kunststofftemplate wird nach der konformalen Beschichtung thermisch, über Zersetzung im Sauer-

stoffplasma oder durch Lösungsmittel herausgelöst.

Zur qualitativen Beurteilung der Strukturen dient Rasterelektronenmikroskopie in Kombination mit per fokussiertem Ionenstrahl (SEM und FIB, Versa 3D von FEI) erzeugten Schnittflächen, wie in Abbildung 1 gezeigt. Hier ist eindrucksvoll die Eigenschaft von ALD zur Erzeugung nanostrukturierter Materialien zu erkennen.

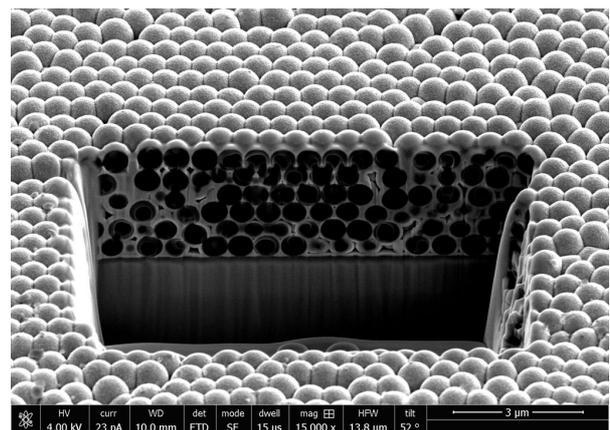


Abb. 1: SEM-Aufnahme einer per FIB erzeugten Schnittfläche an einem ALD-invertierten Opal. Partikeldurchmesser: 617 nm.

Die Translationsymmetrie der Brechungsindexverteilung macht die Struktur zu einem photonischen Kristall, wobei die spektral aufgelöste Reflexion in Abbildung 2 gezeigt ist. Durch die Bandstruktur des photonischen Kristalls ergeben sich zwei verschiedene Regime, in denen die Reflexion besonders ausgeprägt ist. Im Stopgap-Regime ist die Ausbreitung von Licht des entsprechenden Wellenlängenbereichs in keiner Raumrichtung möglich. Im kurzwelligeren, diffraktiven Regime wird das Licht durch Beugung abgelenkt. Gerade dieser Effekt lässt sich für das eingangs erwähnt Lichtmanagement in Solarzellen nutzen, in dem man eine entsprechende Struktur auf die Rückseite eines dün-

nen Absorbers aufbringt. Das transmittierte Licht wird im schrägen Winkel zurück in den Absorber geleitet und breitet sich weiter in geführten Moden aus, sodass der Lichtweg und damit die Absorptionswahrscheinlichkeit im Absorber erheblich erhöht werden.

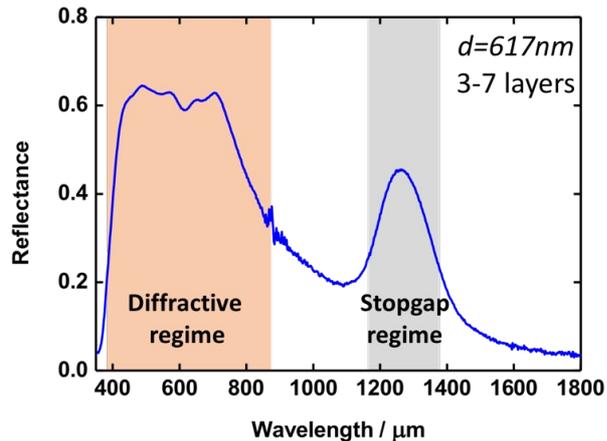


Abb. 2: Spektral aufgelöste Reflexion eines invertierten Opals aus 617 nm Partikeln.

Im Fall von Solarzellen muss dieser rückseitige Opal zusätzlich die Funktion einer Kontaktschicht erfüllen, also elektrisch leitfähig sein, was bei dem verwendeten TCO Aluminium-dotierten Zinkoxid gegeben ist [2].

Neben den gezeigten dreidimensionalen, periodischen Strukturen wird verstärkt auch an unregelmäßigen Strukturen mit gezielter Störung der Periodizität gearbeitet, hier vor allem bei in der Ebene angeordneten Partikeln. Im Allgemeinen lassen sich so die Streueigenschaften breitbandig auf die jeweilige Anwendung optimieren [3].

[1] Bermel, Luo, Zeng, Kimerling, Joannopoulos: *Optics Express*. **15** (2007), 16986

[2] Otto, Kroll, Käsebier, Lee, Putkonen, Salzer, Miclea, Wehrspohn: *Advanced Materials*. **22** (2010), 5035–5038.

[3] Wiesendanger, Zilk, Pertsch, Lederer, Rockstuhl: *Appl. Phys. Lett.* **103** (2013), 131115.

Die Untersuchungen wurden im Rahmen des BMBF-Verbundprojekts StrukturSolar II (03EK3570A) durchgeführt.

Interferenzlithographie – Entwicklungen und Anwendungen

Bodo Fuhrmann

Interdisziplinäres Zentrum für Materialwissenschaften, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, 06099 Halle

Mit dem Aufbau einer Interferenzlithographie am IZM wurde die Möglichkeit geschaffen, schnell und kostengünstig großflächige, regelmäßige Strukturen mit Dimensionen im nm-Bereich herzustellen.

Für die Forschung auf dem Gebiet der Nanotechnologie werden oft großflächig regelmäßige Strukturen mit Dimensionen im nm-Bereich benötigt, wobei oft auch die schnelle Variation der Strukturgrößen erforderlich ist. Auf Grund der mangelnden Auflösung und der für jede Struktur benötigten Photomasken scheidet die Photolithographie dafür aus. Die Elektronenstrahlolithographie als serielles Verfahren ist für solche Anwendungen zu zeitaufwendig und zu teuer. Mit dem Aufbau einer Laser-Interferenzlithographie (LIL) wurde am IZM diese Lücke der verfügbaren Strukturierungstechniken geschlossen und die Zahl der möglichen Anwendungen erweitert.

Abbildung 1 zeigt das Prinzip der Interferenzlithographie. Durch Überlagerung kohärenter Teilwellen erzeugte Interferenzmuster werden zur Belichtung einer Photolackschicht verwendet.

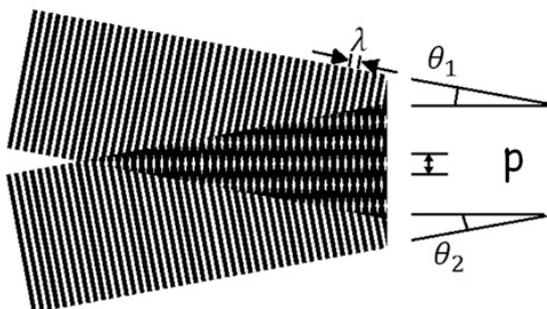


Abb. 1: Überlagerung kohärenter Teilwellen

Die Periode p des sich ergebenden sinusförmigen Intensitätsverlaufes hängt von der verwendeten Lichtwellenlänge sowie den Einfallswinkeln Θ_1 und Θ_2 ab.

$$p = \frac{\lambda}{\sin \Theta_1 + \sin \Theta_2}$$

Abbildung 1 zeigt schematisch den Aufbau. Als Lichtquelle wird ein UV-CW-Laser mit einer Wellenlänge von 266 nm und einer Leistung von 10 mW verwendet, dessen Strahl mit einem Raumfilter (Quarzobjektiv und 10 μm Lochblende) divergent aufgeweitet wird. Die Erzeugung der kohärenten Teilwellen erfolgt mittels Spiegeln wahlweise in einer Lloyd's-Interferometeranordnung [1] für Strukturperioden zwischen 140 nm und 800 nm oder in einer Fresnelspiegelanordnung für Perioden zwischen 1 und 10 μm .

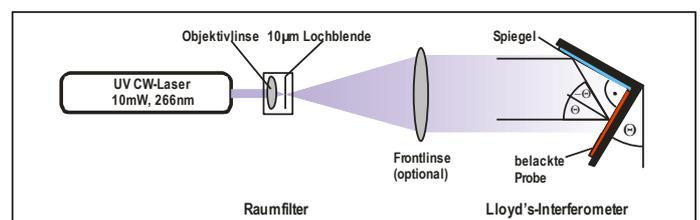


Abb. 2: Schematischer Aufbau mit Lloyd's-Interferometer

Die Breite der bei Einfachbelichtung entstehenden Linienstrukturen kann durch Variation der Belichtungszeit verändert werden (Abb. 3).

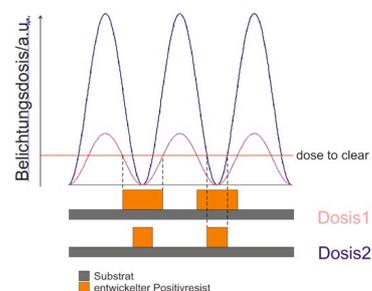


Abb. 3: Der sinusförmige Verlauf der Intensität ermöglicht das Einstellen der Grabenbreite über die Belichtungszeit. Hier gezeigt: Positivresist.

Neben der Herstellung von Linienstrukturen mittels Einfachbelichtung lassen sich durch Doppelbelich-

tung mit Rotation der Probe komplexere 2D-Strukturen erzeugen. Zwischen beiden Belichtungen können sowohl die Periode als auch Belichtungsdosis variiert werden. Abbildung 4 zeigt einige Beispiele.

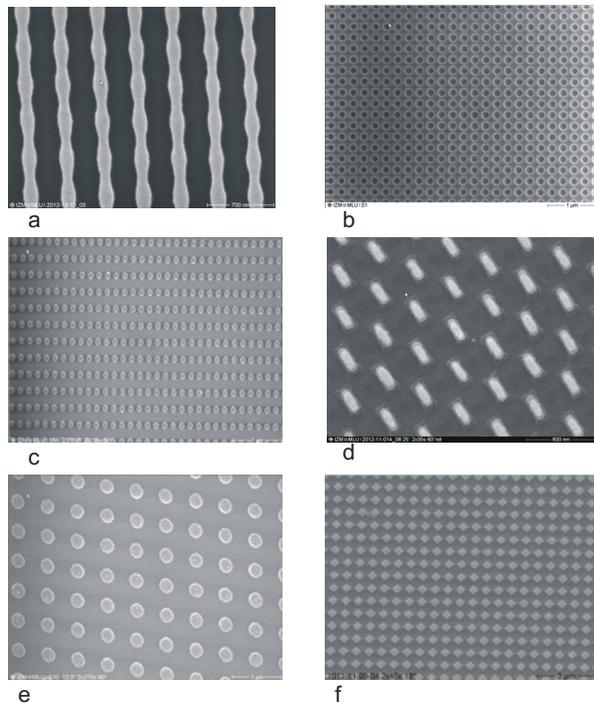


Abb. 4: Beispiele für Strukturen im Photoresist, erzeugt mittels Doppelbelichtung. a: Linien mit Breitenmodulation: Rotation 90° , Periode 388 nm, Belichtung 550 s/120 s, b: Quadratisch angeordnete Löcher: Rotation 90° , Periode 232 nm, c: Dots: Rotation 90° , Perioden 173 nm/340 nm, d: Hexagonal angeordnete Rechtecke: Rotation 60° , Periode 364 nm, e: Dots: Rotation 80° , Periode 614 nm, f: Quadratische Dots: Rotation 90° , Perioden 430 nm.

Für die LIL können sowohl Positiv- als auch Negativresist eingesetzt werden. Die verwendeten Lackdicken liegen auf Grund der geringen Transparenz bei 266 nm Wellenlänge im Bereich von 50–300 nm, weswegen z. B. bei der Strukturierung von Silizium oder Siliziumoxid mittel reaktivem Ionenätzen, einer sehr häufigen Fragestellung, Zwischenschichten, z. B. Chrom als Hartmaske eingesetzt werden. Ein solcher Prozess wurde am IZM entwickelt und optimiert. Es konnten Gräben mit einer Periode von 140 nm hergestellt werden (Abbildung 5), nahe der aus Gl. 1 sich für 266 nm Laserwellenlänge ergebenden, theoretisch kleinstmöglichen Periode von 133 nm. Mit dem gleichen

Prozess lassen sich mittels LIL durch Doppelbelichtung auch Nanodrahtarrays herstellen. Ein Beispiel zeigt Abbildung 6. Solche Arrays wurden u.a. für thermoelektrische Untersuchungen am IZM hergestellt.

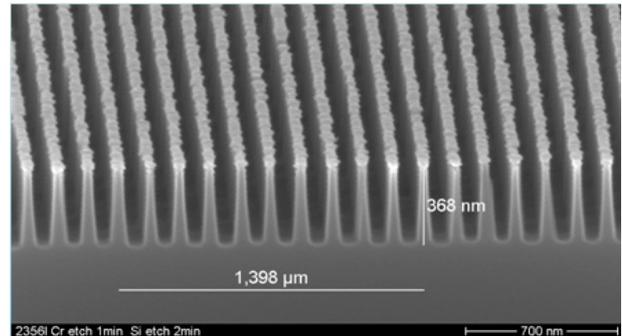


Abb. 5: Mittels LIL und RIE-Ätzen hergestellte Gräben in Silizium. Die Chromhartmaske ist noch nicht entfernt. Periode 140 nm, Hartmaske Chrom ~ 10 nm, Postivresist MR701 1:5, Schichtdicke 80nm, LIL: $\Theta = 72^\circ$ (140 nm Periode) 600 s belichtet, 60 s AR 300-44 entwickelt, RIE-Ätzen: Standard-Chrom- und -Si-Prozess.

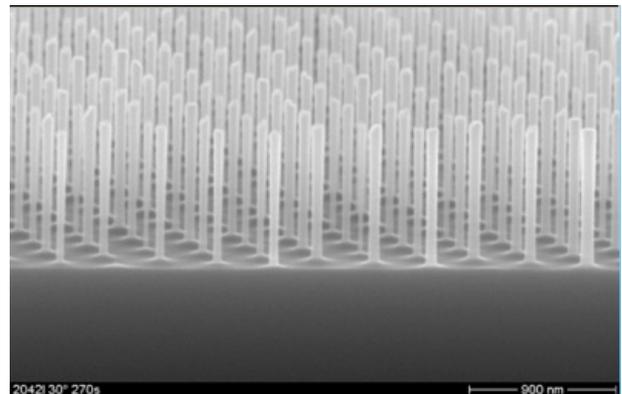


Abb. 6: Silizium-Nanodrähte, hergestellt zur Untersuchung thermoelektrischer Eigenschaften. Durchmesser ca. 50 nm, Länge 800 nm.

Weitere Anwendungen der LIL am IZM durch mehrere Arbeitsgruppen der Universität sind in diesem Bericht zu finden.

[1] Johannes de Boor: Fabrication and Thermoelectric Characterization of Nanostructured Silicon, Dissertation A, Halle (Saale) 2009

Dotierung und Porosität von Siliciumnanodrähten

N Geyer^{1,2,3}, A. Tonkikh³, P. Werner³, Bodo Fuhrmann², M. Jungmann, R. Krause-Rehberg⁴, H. S. Leipner²

¹Carl-Zeiss Jena 06099 Halle

²Interdisziplinäres Zentrum für Materialwissenschaften, Martin-Luther-Universität Halle–Wittenberg

³Max-Planck-Institut für Mikrostrukturphysik Halle

⁴Institut für Physik, Martin-Luther-Universität Halle–Wittenberg

Metallassistiertes Ätzen von Silicium wird zur Herstellung von Nanodrähten angewandt. Eine systematische Untersuchung weist den Zusammenhang zwischen der Porosität der Siliciumnanodrähte und der Dotierkonzentration nach. Aus den experimentellen Daten wird ein Modell der Bildung von porösem Silicium abgeleitet. Aus dem Verständnis des Ätzprozesses ergeben sich Schlussfolgerungen zur Kontrolle der Morphologie der Nanodrähte.

Das Interesse an der Nanostrukturierung von Silicium (Nanodrähte, poröses Si, Si-Nanopartikel) hat in den letzten Jahren mit der potentiellen Anwendung in der Photonik, Elektronik und Thermoelektrik zugenommen. Ein aussichtsreiches Verfahren zur Fabrikation von Nanodrähten ist das metallassistierte Ätzen [1,2]. Die Länge, Dichte, Anordnung der Nanodrähte lassen sich sehr gut kontrollieren. Der Durchmesser ist von einigen μm bis zu einigen 10 nm einstellbar.

Die Präparation der Drähte ist recht simpel. Kein abschließendes Modell zum Verständnis der zu Grunde liegenden physikalischen und chemischen Prozesse existierte bislang, das alle beobachteten Phänomene beschreiben kann. So kann die Morphologie der Nanodrähte zwischen monokristallin und mesoporös variieren.

Eine Serie von Kontrolleexperimenten wurde ange stellt, um den dominierenden Einfluss der Dotierkonzentration des verwendeten Siliciumwafers zu verifizieren. Eine strukturierte Silberschicht von 60 nm Dicke wurde durch eine Maske monodisperser Polystyrolkugeln (*Nanosphere lithography*) abgeschieden. Das so vorstrukturierte Silicium wurde dann in einem HF und H_2O_2 -Gemisch geätzt. Als Prozessparameter dienten die HF- bzw. die H_2O_2 -Konzentration, die Ätztemperatur, der Dotiertyp und die Dotierkonzentration.

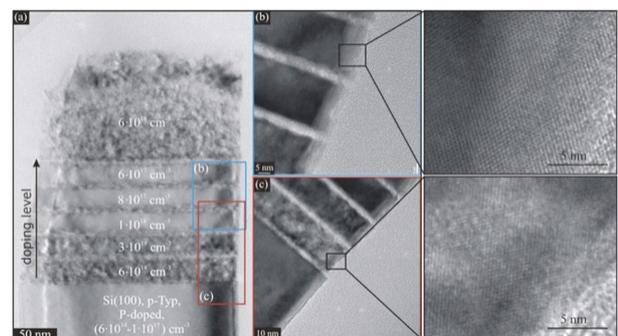


Abb. 1: Transmissionselektronenmikroskopische Abbildung des Querschnitts eines geätzten Si-Nanodrahtes mit unterschiedlichen Dotierbereichen (a). Leicht dotierte Schichten sind kristallin, hoch dotierte porös (b).

Die Porengröße wurde über Positronenlebensdauerspektroskopie mit einem gepulsten monoenergetischen Positronenstrahl an EPOS-Strahlensystem am Helmholtzzentrum Dresden-Rossendorf gemessen. Daraus ließ sich eine Porengröße von $6,9 \pm 2,8$ nm ableiten, was einem mesoporösen Material entspricht.

Das abgeleitete Modell stellt eine Analogie zum anodischen Ätzen her. Anodisch geätztes Silicium ist in Abhängigkeit von der Dotierkonzentration ebenfalls porös. Die Dicke der Raumladungszone eines Metall–Halbleiter-Schottkykontaktes w hängt mit der Konzentration von Donatoren bzw. Akzeptoren $N_{D,A}$ zusammen, $w^2 \sim 1/N_{D,A}$. Für hohe Dotierkonzentration wird w so klein, dass die Ladungsträger tunneln können. Das passiert oberhalb $1 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, wo der gleichrichtende Charakter des Kontaktes verschwindet.

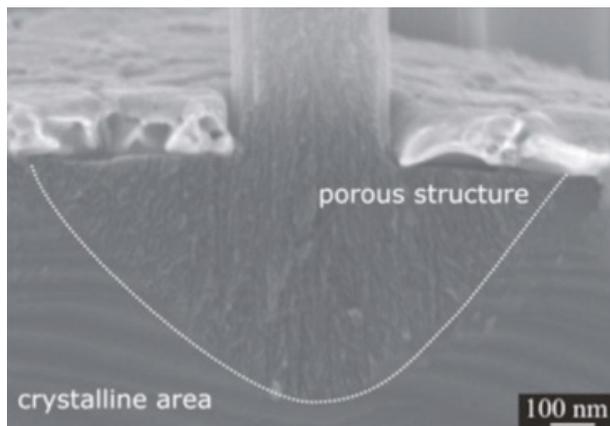


Abb. 1: Hochdotiertes Silicium im rasterelektronenmikroskopischen Querschnittsbild nach metallinduziertem Ätzen.



Bei Silicium mit hoher Dotierkonzentration und damit dünner Raumladungszone ist ein effektiver Transport von elektronischen Löchern im Silicium möglich, was die Bildung einer porösen Schicht damit befördert (Abb. 2).

Die Morphologie von Nanodrähten ist damit gut kontrollierbar über die Höhe der Dotierkonzentration des verwendeten Siliciums. Interessante Anwendungsfelder der so einfach herzustellenden Siliciumnanodrähte ergeben sich für die Photovoltaik, die Sensorik oder Thermoelektrik. Im Bereich der Thermoelektrik stellte sich die Porosität der Nanodrähte als ein entscheidender Faktor zur Kontrolle der Wärmeleitfähigkeit heraus.

[1] Z. Huang *et al.* *Adv. Mater.* **23** (2011) 285.

[2] Z. Huang *et al.* *Nano Lett.* **9** (2009) 2519.

[3] N. Geyer *et al.* *ACS Appl. Mater. Interf.* **5** (2013) 4302.

Die Untersuchungen wurden im Rahmen des BMBF-Verbundprojekts SiGeTE (03SF0342F) durchgeführt. Partner waren das MPI Halle, die BTU Cottbus, das IHP Frankfurt (Oder), das Fraunhofer IWM Freiburg-Halle und das IOM Leipzig.

Relevante Veröffentlichungen 2015 im Rahmen des Projekts/der Zusammenarbeit:

N. Geyer *et al.* *Nanotechnol.* **26** (2015) 245301.

Charakterisierung von Tunnelinjektionsnanostrukturen

V. G. Talalaev^{1,2,3}, J. W. Tomm¹, H. S. Leipner², P. Werner³, Bodo Fuhrmann², B. V. Novikov⁴, G. W. Cirlin⁵

¹Max-Born-Institut für Nichtlineare Optik und Kurzzeitspektroskopie, 12489 Berlin

²Interdisziplinäres Zentrum für Materialwissenschaften, Martin-Luther-Universität Halle–Wittenberg, 06099 Halle

³Max-Planck-Institut für Mikrostrukturphysik Halle

⁴Fock Institute of Physics, St. Petersburg State University, 198504 St. Petersburg

⁵St. Petersburg Academic University, 194021 St. Petersburg

Die Manipulation von InGaAs/GaAs-basierten Tunnelinjektionsnanostrukturen, die bei 1,1 μm emittieren, konnte experimentell gezeigt werden. Bei hohen Strömen in Dioden, die in Vorwärtsrichtung gepolt sind, ergeben sich irreversible Veränderungen. Bei hohen Temperaturen lassen sich Tunnelbarrieren wiederherstellen durch die Zerstörung von Nanobrücken, die sich mit einer Indiumanreicherung während der Deposition gebildet hatten.

Die Entwicklung von lichtemittierenden Bauelementen aus Nanoclustern oder Quantenpunkten hat eine Reihe von Vorteilen wie die einstellbare Emissionswellenlänge und eine hohe thermische Stabilität. Das aktive Gebiet kann auf den Spektralbereich der optischen Informationsübertragung mit InGaAs-Quantenpunkten in einer GaAs-Matrix eingestellt werden. Bislang war jedoch das Hauptproblem die geringe Effizienz des Ladungsträgerereinfangs in diesen Nanostrukturen. Eine Lösung dieses Problems zeichnet sich durch die Kombination Quantenpunkten und Quantengraben ab. Durch die Platzierung von InGaAs-Quantenpunkten in der Nähe eines Quantengraben lässt sich der Ladungsträgertransfer über einen Tunnelprozess vom Quantengraben in die Quantenpunkte effektiv kontrollieren. Diese Kombination von Quantengraben und -punkten ergibt größere Freiheitsgrade für die Kontrolle der Lichtemission. Das Ladungsträgerconfinement und die wohldefinierten Energieniveaus der Ladungsträger sind sehr bedeutsam für Lasereigenschaften [1].

Derart konzipierte Tunnelinjektionsnanostrukturen wurden mittels Molekularstrahlepitaxie hergestellt. Die Charakterisierung erfolgte mittels Photolumineszenz und Transmissionselektronenmikroskopie.

Aus der Schichtfolge wurde eine Mesastruktur präpariert, um eine Diode zur Untersuchung der Elektrolumineszenzeigenschaften zu erhalten.

Mittels Transmissionselektronenmikroskopie wurde die Geometrie und die Zusammensetzung der Nanostrukturen überprüft. Der Indiumgehalt des Quantengraben liegt bei 15 %, während die Quantenpunkte 60 % Indium aufweisen. Die GaAs-Barrierendicke liegt zwischen 2,0 und 9,5 nm. Bei Barrieren unter 3 nm kann es zur Ausbildung von Nanobrücken mit einem erhöhten Indiumgehalt kommen. Diese Brücken haben einen Durchmesser von ca. 2 nm und wirken sich negativ auf das Ladungsträgertunneln aus.

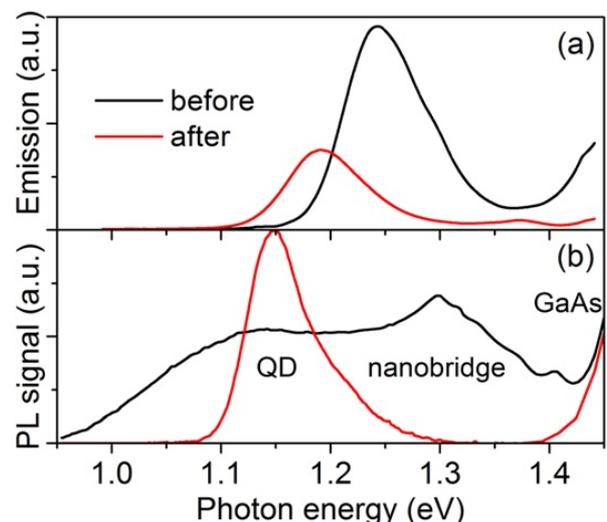


Abb. 1: Elektro- (a) und Photolumineszenz (b) vor und nach thermischer Manipulation von Nanobrücken zwischen Quantengraben und Quantenpunkten.

Abb. 1 zeigt die Elektro- bzw. Photolumineszenz der Tunnelinjektionsnanostrukturen mit und ohne Nanobrücken. Diese führen zur Veränderung der

lokalen Energieniveaus, so dass ein Emissionsband bei 1,25 bzw. 1,3 eV beobachtet wird [2].

Die Abweichungen der Spektren lassen sich auf strukturelle und chemische Veränderungen während des Betriebes der Diode in Durchlassrichtung bei erhöhten Temperaturen zurückführen. Danach lässt sich mit Stromdichten von 5 bis 10 Acm^{-2} bei Temperaturen von 250 °C die Tunnelstruktur irreversibel wiederherstellen. Die Beziehung dieses Verhaltens zu den In-reichen Nanobrücken zeigt die hochauflösende analytische Transmissionselektronenmikroskopie (Abb. 2).

Vor dem Betreiben mit hohen Stromdichten und bei erhöhter Temperatur sind im Massenkontrast die indiumreichen Nanobrücken deutlich zu erkennen. Nach der Behandlung ist der Kontrast deutlich reduziert und lässt sich über das Verschwinden der Nanobrücken erklären. Gleichzeitig ergibt sich wieder ein Lumineszenzspektrum, das den Quantenpunkten entspricht.

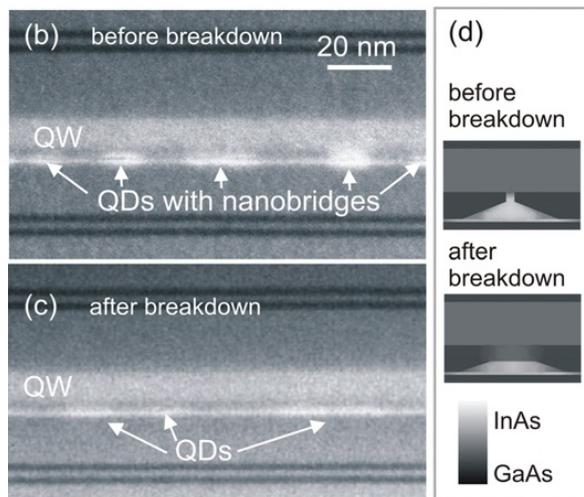


Abb. 2: Strominduzierte Änderungen im Transmissionselektronenmikroskop. Das obere Bild zeigt die Ausgangslage, unten ist die Ausheilung der Nanobrücken zu sehen. Die Situation ist im Querschnitt schematisch auf der rechten Seite dargestellt.

Dieses „positive“ Degradationsverhalten eröffnet gute Aussichten für den kontrollierten Ladungsträgertransport über eine wohldefinierte und stabile Tunnelbarriere zwischen Quantengraben und Quantenpunkten.

[1] V. G. Talalaev *et al.* *Semicond.* **48** (2014) 1178. DOI 10.1134/S1063782614090218

[2] V. G. Talalaev *et al.* *Appl. Phys. Lett.* **93** (2008) 031105. DOI 10.1063/1.2963973

Relevante Veröffentlichungen 2015 im Rahmen des Projekts/der Zusammenarbeit:

V. G. Talalaev *et al.* *Appl. Phys. Lett.* **106** (2015) 013104. DOI: 10.1063/1.4905467

Digitales Positronen-Lebensdauer-Spektrometer für die Untersuchung von Phasenübergängen in Gasen und Flüssigkeiten

Eric Hirschmann, Chris Bluhm, Reinhard Krause-Rehberg

Interdisziplinäres Zentrum für Materialwissenschaften und Fachbereich Physik, Martin-Luther-Universität Halle–Wittenberg, 06099 Halle

Zur Charakterisierung von Phasenübergängen in Porensystemen wird die Positronenannihilationslebensdauer-Spektroskopie (PALS) für kombinierte Gas-/Flüssigkeitsadsorption genutzt. In einem Trägermaterial mit definierter, offener Porenstruktur, z. B. CPG (controlled pore glass), können Gase kondensieren. Das Phasenverhalten des eingelagerten Stoffes kann dann anschließend mit der PALS untersucht werden.

Um eine temperatur- und druckabhängige Messreihe ermöglichen zu können, ist ein spezieller Messaufbau erforderlich der mit dem 4-Röhren Spektrometer kombiniert wird. Der Aufbau besteht aus einem He-Kryostaten, in welchem eine gesonderte Probenkammer integriert ist. Die Probenkammer sitzt auf einem Kaltkopf, welcher mit einem He-Kompressor verbunden ist. Um die Temperatur regeln zu können befindet sich zwischen Kaltkopf und Probenkammer eine Heizung. Weiterhin ist die Probenkammer mit einem Gas-Vorratsbehälter verbunden, in welchem der Gasdruck über zwei elektromagnetische Ventile eingestellt werden kann. An das erste Ventil ist eine Membranpumpe angeschlossen und über das zweite Ventil kann ein beliebiges Gas eingeleitet werden. Somit ist jederzeit ein definiertes Druck- und Temperaturregime an der Probe einstellbar.

Der Kaltkopf und die zugehörigen Aufbauten befinden sich im Hochvakuum, was durch eine Kombination aus Membranvorpumpe und Turbomolekularpumpe, realisiert wird. Das Schutzvakuum liegt im Bereich von 10^{-5} mbar. Die tiefste Temperatur liegt etwa bei 35 K.

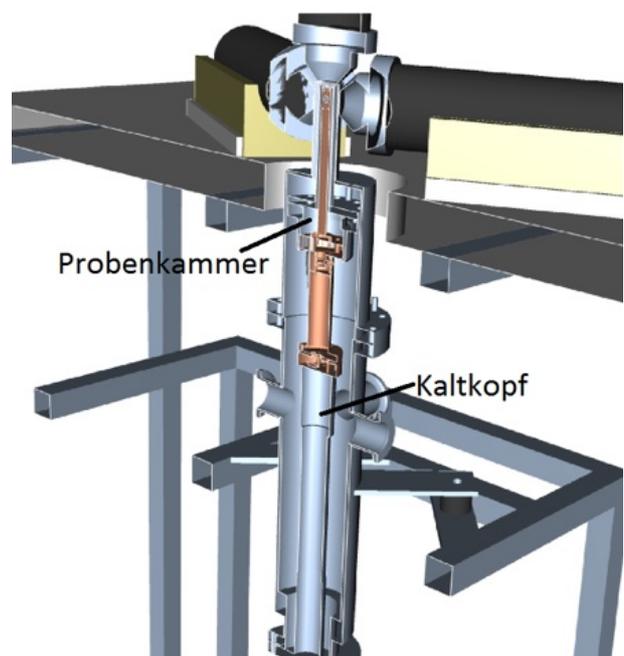


Abb. 1: Schnittmodell des Aufbaus mit Kryostat und Photomultiplier-Röhren (PMT).

Die kupperfarbenen Elemente im Schnittmodell sind die Heizung (unten) und der Probenhalter (oben). Am oberen Ende des Probenhalters wird das Quelle-Proben-Sandwich angebracht; auf derselben Höhe befinden sich auch die Photomultiplier.

Um die Probenkammer gegenüber dem Schutzvakuum abzudichten, werden spezielle Metall C-Ringe mit integrierter Federwirkung aus Inconel® verwendet.



Abb. 2: Experimenteller Aufbau der 4 PMT mit Gasadsorptionskammer im Zentrum

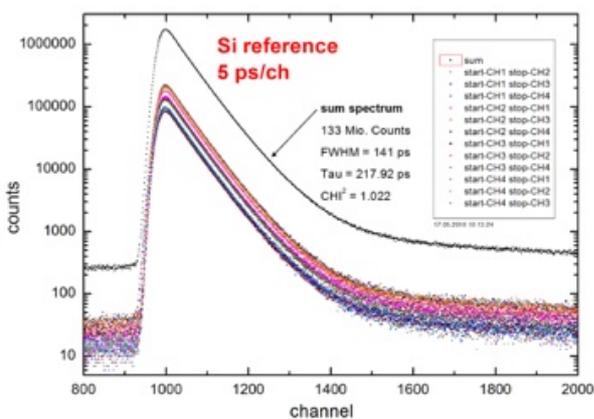


Abb. 3: Aufnahme der 12 Einzelspektren und des Summenspektrums einer Si-Referenz Probe

Die Untersuchung der Phasenübergänge benötigt eine entsprechend große Statistik zur Auswertung. Um die Messgeschwindigkeit zu erhöhen, wurde das digitale Positronen-Lebensdauer-Spektrometer auf vier Photomultiplier aufgerüstet. Dabei werden, wie im normalen Spektrometer, die Start- (1,27 MeV Gamma-Quant) und Stopp- (0,511 MeV Gamma-Quant) Signale von den Photomultipliern erfasst und die Zeitdifferenz digital ausgewertet. Zur Auswertung wird nach einer Cubic-Spline-Interpolation der Anodensignale, die Höhe bestimmt, um anschließend mit Hilfe des Constant-Fraction-Levels die Zeit zwischen den Signalen errechnen zu können. Alle Zeiten werden für jedes Photomultiplier-Paar abgespeichert und parallel nach einer parabolischen Bestimmung des Maximums aufsummiert;

woraus sich 12 Photomultiplier-Paarungen bzw. Spektren ergeben. Durch die erhöhte Anzahl der Photomultiplier ist es möglich einen größeren Bereich um die Probe abzudecken und damit die Wahrscheinlichkeit einer Start-Stopp-Detektion zu erhöhen. Um den großen Raumwinkel bei gleichbleibend naher Distanz zum Probenhalter zu gewährleisten wurden die Photomultiplier mit konischen Szintillatoren ausgestattet und in einem 120° Winkeln angeordnet. Die daraus ergebende Zählratenerhöhung trägt positiv zur Messgeschwindigkeit bei.



Abb. 4: Experimenteller Aufbau von 3 PMT mit Gaskammer im Zentrum und konischen Szintillator-Kappen

Ein weiterer Vorteil, der durch die Digitalisierung des Messplatzes ermöglicht werden konnte, ist die vollautomatische Aufnahme von Lebensdauerspektren bei unterschiedlichen Drücken und Temperaturen. Mit Hilfe der Software ist der Nutzer in der Lage, individuelle Messreihen durchzuführen. Die Steuerung der Temperatur wurde über die beschriebene elektrische Heizung in Kombination mit einem He-Kryostaten umgesetzt. Dabei wird die Leistung des Heizkörpers über einen *Eurotherm*-PID-Regler reguliert, welcher die Soll-Temperatur aus der Software empfängt und die Ist-Temperatur, über ein Thermoelement am Probenhalter, misst. Der Druck wird über zwei Ventile gesteuert, welche über eine Relaiseinheit geschaltet werden können.

Der Aufbau des Spektrometers wurde im Rahmen des DFG Projekts KR 1269/24-1 durchgeführt.

Verbesserte Tiefenauflösung der Positronenstrahltechnik mittels In-situ-Sputterabtrag der Probe

Marco John und Reinhard Krause-Rehberg

Interdisziplinäres Zentrum für Materialwissenschaften und Fachbereich Physik, Martin-Luther-Universität Halle–Wittenberg, 06099 Halle

Im Jahresbericht des IZM von 2014 wurde gezeigt, dass mittels Sputtertechnik eine signifikante Verbesserung der Tiefenauflösung der Positronenannihilations-Spektroskopie erreicht werden konnte. Die Untersuchungen photovoltaischer CIGSe-Schichten wurden weitergeführt.

Nach einer erfolgreichen Inbetriebnahme der Sputter-Anlage wurden weitere Messungen an CIGSe-Solarzellen durchgeführt. Hierbei sollte untersucht werden, welchen Einfluss eine Variation des Selen/Metall-Verhältnisses auf die Defektstruktur der CIGSe-Absorberschicht hat. In Abbildung 1 ist das Ergebnis dieser Untersuchung dargestellt. Es wurde eine Probenserie mit 5 unterschiedlichen Se/Metall-Verhältnissen untersucht. Hierfür wurden Ar^+ -Ionen mit einer Spannung von $U = 400 \text{ V}$ und einem Strahlstrom von $I = 6 \text{ mA}$ auf die Probe geleitet, während die Untersuchung mittels Dopplerverbreiterungsspektroskopie mit einer Positronenenergie von $E = 4 \text{ keV}$ erfolgte. Beim Vergleich der Messungen ist keine signifikante Änderung des S -Parameters innerhalb der Absorberschicht erkennbar. Dies könnte darauf hindeuten, dass sich die Defektkonzentration weder innerhalb einer Absorberschicht noch mit Variation des Selengehaltes ändert. Dieses Ergebnis könnte jedoch auch ein Indiz sein, dass die Defektkonzentration sehr hoch ist. Dies würde bedeuten, dass die Defektsättigung für Positronen erreicht ist, sodass keine Änderungen der Konzentration detektierbar wäre, was einen konstanten S -Parameter zur Folge hat. Des Weiteren ist zur Veranschaulichung der Verbesserung der Tiefenauflösung das Ergebnis einer konventionellen energieabhängigen $S(E)$ Messung dargestellt. Hieraus sind die Grenzen der Tiefenauflösung sehr gut erkennbar.

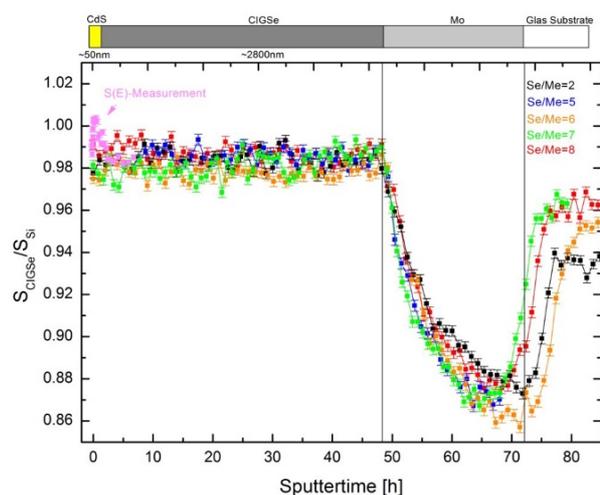


Abb. 1: Ergebnisse der Defektstrukturanalyse mittels DBS für eine Variation des Selengehaltes von CIGSe-Solarzellen

Um auszuschließen, dass die Empfindlichkeit dieser Untersuchungsmethode zu gering ist um eine Veränderung der Defektstrukturen messen zu können, wurde folgendes Schichtsystem untersucht. Das untersuchte Schichtsystem besteht aus einem Substrat aus Silizium. Auf dieses Substrat wurden jeweils 100 nm Chrom und Gold zweimal abgeschieden. Das Ergebnis der Messung sowie der Aufbau der untersuchten Probe sind in Abbildung 2 grafisch dargestellt. Eine signifikante Änderung des S -Parameters für die einzelnen Schichten ist erkennbar. Dies ermöglicht eine relativ klare Interpretation der Lage der Grenzschichten in diesem Schichtsystem mit der tiefenabhängigen Messung. Außerdem zeigt sich, dass sich, bei konstanten Sputterparametern, die Sputterraten von Gold und Chrom erheblich unterscheiden, da die aufgetragenen Schichten die gleiche Schichtdicke ausweisen. Dies hat zur Folge, dass die Tiefenauflösung bei dieser Messung für die Chrom-Schicht größer ist als für die

Gold-Schicht. Bei Betrachtung des S-Parameters in der Chrom-Schicht wird deutlich, dass mit abnehmender Distanz zur tieferliegenden Goldschicht, die Diffusionslänge der Positronen im Chrom einen zunehmenden Einfluss hat. Die kontinuierliche Abnahme des S-Parameters ist auf eine Zunahme an Positronen, welche bis in die Goldschicht diffundieren bevor sie in dieser annihilieren, zurückzuführen. Dieses Untersuchungsergebnis macht deutlich, dass eine ausreichende Empfindlichkeit dieser Messmethode gegeben ist. Des Weiteren wurde an dieser Probe eine herkömmliche $S(E)$ -Messung durchgeführt, um den Vorteil der Sputtermessung erneut zu bestätigen. Man erkennt deutlich, dass bei der konventionellen Messung bereits das zweite Interface in einer Tiefe von 200 nm nicht mehr zu erkennen ist. Bei der neuen Methode lässt sich der gesamte Schichtstapel mit guter und konstanter Tiefenauflösung untersuchen.

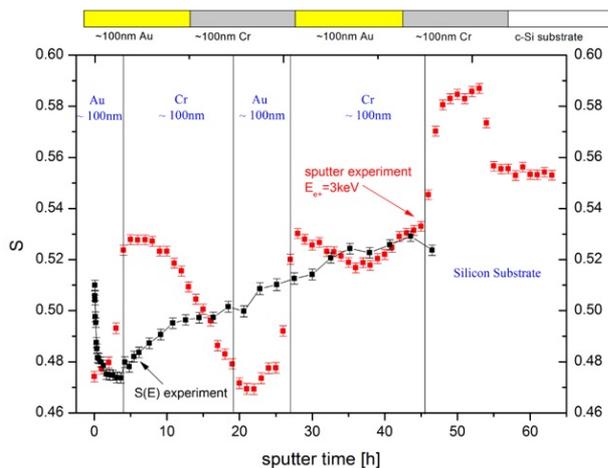


Abb. 2: Darstellung einer tiefenabhängigen Sputter-Messung des S-Parameters eines Schichtsystems aus Chrom und Gold.

Die Untersuchungen wurden im Rahmen des BMBF-Verbundprojekts PosiAnalyse (05K2013) durchgeführt. Projektpartner sind das MLZ München-Garching und das Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf (HZDR).

Optimierung der Elektronenstrahlithographie und des folgenden Ätzschrittes: Herstellung photonischer Kristalle

Frank Heyroth¹, Viktoriia Rutckaia²

¹ Interdisziplinäres Zentrum für Materialwissenschaften, Martin-Luther-Universität Halle–Wittenberg, 06099 Halle

² Zentrum für Innovationskompetenz "Silizium und Licht", Martin-Luther-Universität Halle–Wittenberg, 06099 Halle

Die Elektronenstrahlithographie ermöglicht durch die direkte Belichtung eines Photolacks mit dem Elektronenstrahl die Erzeugung beliebiger planarer Strukturen im Nanometermaßstab. Anschließend dienen diese Strukturen als Maske für einen Ätzprozess des darunterliegenden Substrats oder für nachfolgend aufzubringende Schichten, wobei die Struktur über einen lift-off Prozess entsteht. All dies ist im Reinraum des Nanotechnikums verfügbar. Für die Funktionsfähigkeit der Zielstruktur ist es notwendig, den Photolack, die Belichtungsparameter und den Ätzprozess abgestimmt zu optimieren. Dies soll hier beispielhaft an der Herstellung von Mikroresonatoren dargestellt werden.

In der Optoelektronik stellt die indirekte Bandlücke von Silizium für die Schaffung von hocheffizienten Leuchtquellen eine Herausforderung dar. Selbstorganisierende Quantenpunkten (QD) sind eine der Möglichkeiten für einen aktiven Emitter, der hier am Zentrum für Innovationskompetenz grundlegend untersucht wird. Dabei werden Germanium Quantenpunkte in einer dünnen Siliziumschicht durch MBE auf einem Silicon-on-Insulator Substrat gewachsen. Da die Intensität der Photolumineszenz der Quantenpunkte selbst gering ist, gilt es die Emissionseffizienz zu steigern. Dies kann z. B. durch die Implementierung von Mikroresonatoren wie photonischen Kristallen mit Defekten erreicht werden. Für photonische Kristall-Resonatoren muss hierzu ein regelmäßiges 2D-Array von Löchern in die Siliziumplatte geätzt werden, wobei in der Mitte einige Löcher fehlen. Dieser Kristallfehler ermöglicht es einige lokalisierte

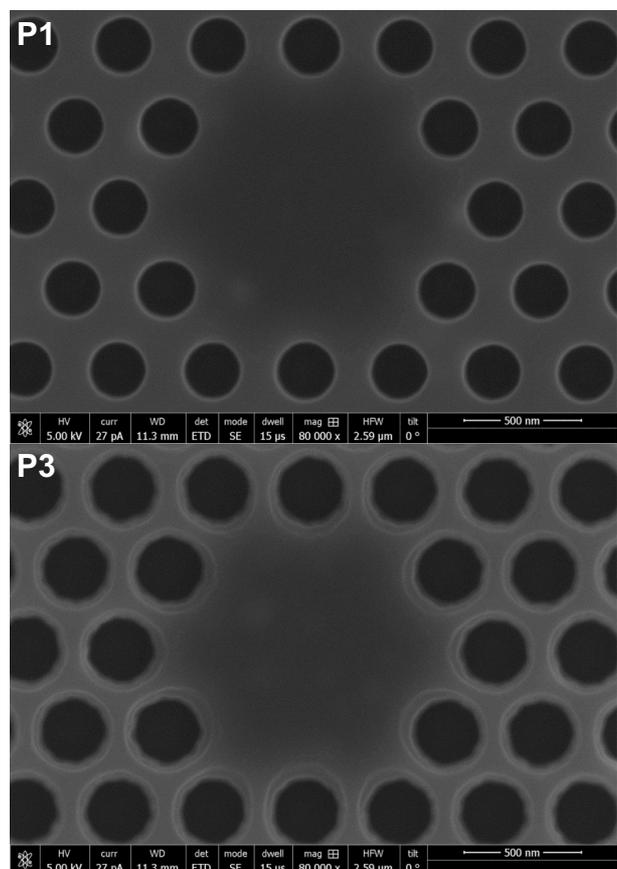


Abb. 1: Rasterelektronenmikroskopische Bilder aus dem Defektbereich von verschiedenen belichteten Porenstrukturen photonischer Kristalle nach dem Ätzprozess. Bei Probe P3 (unten) waren die Poren im Vergleich zu Probe P1 (oben) höher belichtet, was zu einer Überätzung führt.

Zustände in die photonische Bandlücke einzuführen. Die systematische Untersuchung dieser Effekte erfordert Proben mit möglichst perfekten Lochstrukturen mit definierten Baufehlern.

Die Herstellung der photonischen Kristalle erfolgte mittels Elektronenstrahlithographie. Dabei wird die

gewünschte Struktur durch den frei steuerbaren Elektronenstrahl des verwendeten RAITH PIONEER Systems auf das zuvor via Spincoating mit einem PMMA-Resist beschichtete Substrat belichtet. Bei der folgenden Entwicklung (mit Isopropanol) wird der belichtete Photolack aufgelöst. Zur Übertragung der Maske auf die darunter liegende Siliziumschicht mit den Quantenpunkten wurde reaktives Ionenätzen mit induktiv gekoppeltem Plasma (ICP RIE; OXFORD PLASMALAB 100) eingesetzt. Ein Gemisch von der reaktiven Ätzgase SF_6 und C_4F_8 (Verhältnis 10:50) ermöglicht dabei ein anisotropes Ätzen von Silizium. Das C_4F_8 reagiert dabei mit Silizium und schützt insbesondere die Seitenwände mit einem Polymerfilm während die Radikale aus dem SF_6 in Richtung der Oberflächennormale beschleunigt werden, hier der Schutzschichtbildung entgegenwirken und so bevorzugt eine Tiefenätzung eintritt. Wir haben gute Ergebnisse mit einer HF-Leistung von 40 W, ICP-Leistung von 1200 W bei einem Kammerdruck von 5,5 mTorr und einer Bias-Spannung von 90 V erzielt. Der verbleibende Resist wird mit einem Sauerstoffplasma entfernt.

Die Resonanzen der Mikrokavitäten sind empfindlich gegenüber Variationen der geometrischen Parameter der Resonatoren. Abbildung 1 zeigt ein elektronenmikroskopisches Bild von zwei unterschiedlich belichteten Porenstrukturen senkrecht

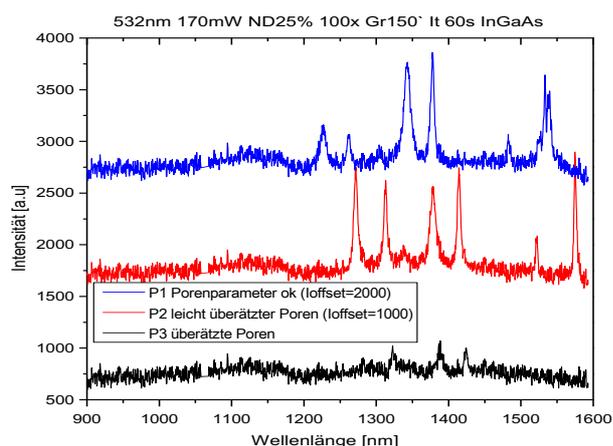


Abb. 2: Photolumineszenz der in Abb. 1 ausschnittsweise dargestellten Kavitäten in einem photonischen Kristall bei Anregung mit einem Laser mit 532nm Wellenlänge. P2 ist eine weitere Probe, belichtet mit einer Dosis zwischen P1 und P3.

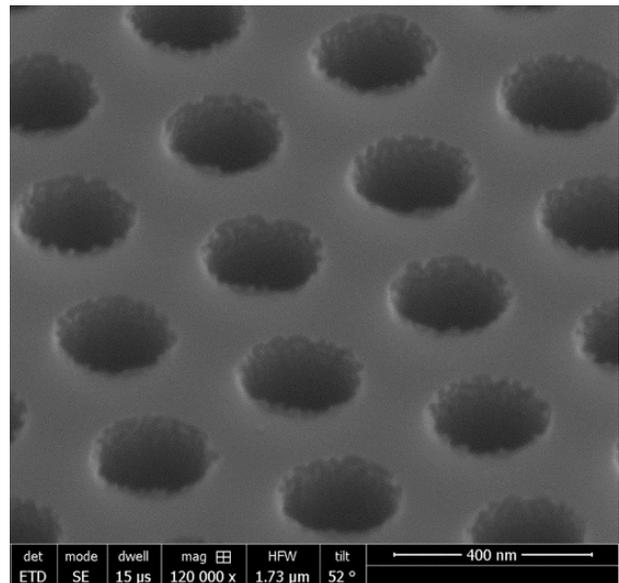


Abb. 3: Rasterelektronenmikroskopische Bilder eines photonischen Kristalls bei dem die gewählten Belichtungs- und Lackparameter nach der Ätzung zu rauen Seitenwänden der Poren führten

von oben nach der Ätzung. Die zugehörigen Lumineszenzspektren in Abbildung 2 zeigen diesen Einfluss deutlich.

Bereits eine Änderung von 10 nm in Größe und Position der nominal 250 nm großen Löcher in der Umgebung des Defektes führt zu merklichen Änderungen der Resonanz. Zudem gilt es auch die Zylinderförmigkeit zu optimieren und die Rauigkeit der Porenwände zu minimieren. Ein Negativbeispiel dazu zeigt Abbildung 3.

Untersuchung gebundenen Wasserstoffs in a-SiN Passivierungsschichten vor und nach der Hochtemperaturaktivierung

Sahar Jafari, Marcus Gläser, Dominik Lausch

Fraunhofer Institut CSP, Center für Siliziumphotovoltaik, Halle

Der Wirkungsgrad der Solarzellen wird durch die licht-induzierte Degradation (LID) während der ersten Betriebsstunden stark reduziert. Die Bildung sog. BO-Komplexe induziert rekombinationsaktive Energieniveaus in der Bandlücke, welche zu einer Steigerung der SRH-Rekombination und damit zu einer Reduzierung der Ladungsträgerlebensdauer in Si-Solarzellen [1]. Diese Defekte können mittels Wasserstoff passiviert werden. Der Prozess wird Regeneration genannt [2]. Die Kinetik des Regenerationsprozesses ist dabei stark abhängig von der H-Konzentration [3], der Temperatur und der Injektion (Lichtintensität). Am Fraunhofer CSP wurde die Wasserstoffkonzentration in Abhängigkeit der a-SiN Komposition variiert und als Funktion des Hochtemperaturschritts der PV untersucht.

Unterschiedliche a-SiN-Schichten wurden mittels plasmaunterstützte chemischer Gasphasen (PECVD) abgeschieden. Zur Variation der Schichtzusammensetzung wurden die Prozessgas-Verhältnisse von NH_3/SiH_4 in Kombination mit zwei verschiedenen Trägergasen (Ar, N_2) variiert. Alle weiteren Abscheidungsparameter wie Temperatur des Substrats, Kammerdruck und Plasmaleistung wurden konstant gehalten.

Während der Solarzellenherstellung werden im letzten Prozessschritt die Kontakte mit ~ 850 °C

eingefeuert. Hierbei kann Wasserstoff in den Siliziumwafer eindiffundieren. Zur Eindiffusion des im SiN enthaltenen Wasserstoffs wurde im Rahmen der Arbeit ein industriell standardisierter Firing-Prozess eines Industriepartners angewandt.

Die quantitativen Bindungsverhältnisse des Wasserstoffs wurden vor und nach der Feuerung mittels FTIR (Fourier Transform Infrarot) Spektroskopie untersucht. Basierend auf der Methode von Lanford und Rand [4] wurde die Bindungskonzentration von Si-H und N-H durch Integration der Fläche des jeweiligen Absorptionspeaks bestimmt. Die Ergebnisse der Schichtzusammensetzung vor der Feuerung unter Verwendung von Argon und Stickstoff als Trägergas sind in Abbildung 1 dargestellt.

Aus Abbildung 1 kann entnommen werden, dass es eine direkte Proportionalität der N-H-Bindungen mit steigendem Ammoniak/Silan-Verhältnis insbesondere in Verbindung mit dem Trägergas Stickstoff gibt. Im Gegensatz dazu konnten hohe Si-H-Konzentrationen durch einen verringerten Ammoniakgasstrom mit Ar als Trägergas erhalten werden. Es konnte gezeigt werden, dass eine Variation der Schichtzusammensetzung insbesondere eine Variation der Wasserstoffkonzentration durch Änderung des Gas-Ratio in Verbindung mit der Wahl des Trägergases realisierbar ist.

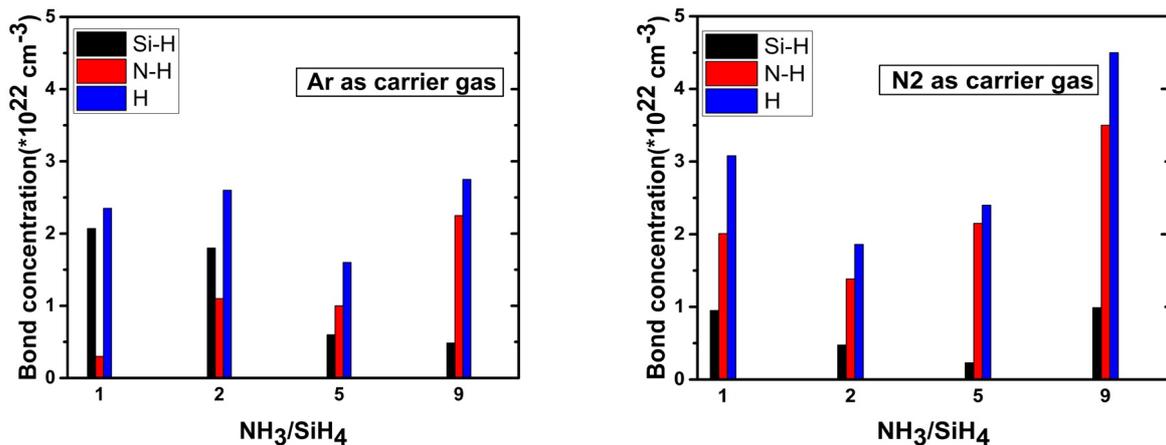


Abb. 1: Bindungskonzentration von Wasserstoff in a-SiN vor der Hochtemperatur Feuerung in Abhängigkeit von Gasprozess Verhältnisse (NH_3/SiH_4) und verschiedene Trägergasen (Ar und N_2) gemessen mittels FTIR.

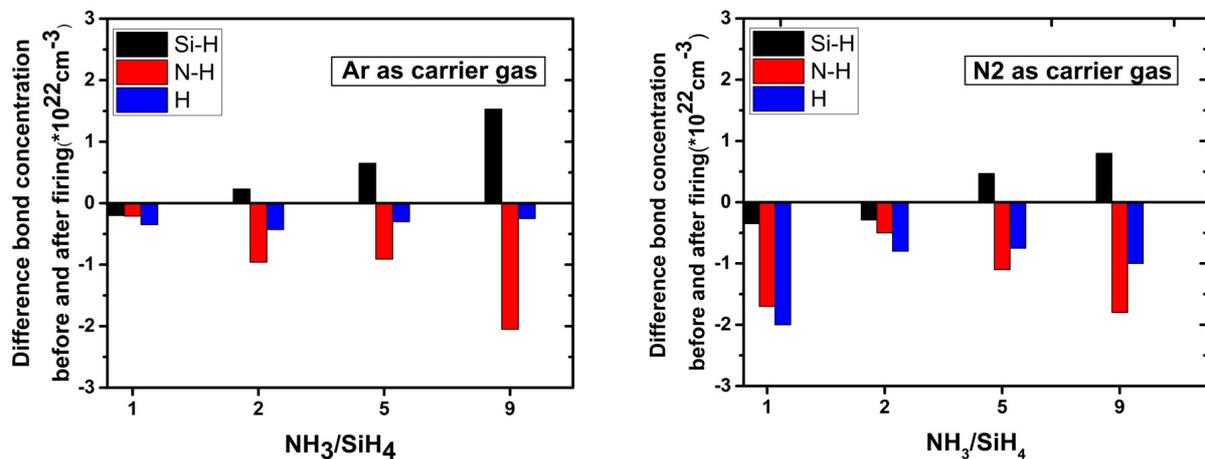


Abb. 2: Differenz der Bindungskonzentration von Wasserstoff in a-SiN zwischen vor und nach Hochtemperatur Feuerung in Abhängigkeit von Gasprozess Verhältnisse (NH_3/SiH_4) und verschiedene Trägergasen (Ar und N_2)

Vergleichend zu den Ergebnissen vor der Feuerung in Abbildung 1 zeigt die Schichtanalyse nach der Feuerung in Abbildung 2 eine Rekonstruktion der einzelnen Bindungen. In allen Proben konnte eine Reduktion des Wasserstoffanteils beobachtet werden, welches sowohl zum Teil in das Si-Bulk diffundiert und dort für den Passivierungsprozess

zur Verfügung steht jedoch hauptsächlich aus der SiN Schicht in die Luft effundiert. Weiterhin kommt es zur Umformung der Bindungen im SiN selbst. Die Eindiffusion von Wasserstoff ist offensichtlich dabei stark abhängig von den Bindungsanteilen als auch von der Dichte der SiN-Schicht [5].

- [1] J. Schmidt: 26th PVSC, IEEE, (1997)13-18.
- [2] A. Herguth, Prog. Photovolt **16** (2008) 135.
- [3] S. Wilking, A. Herguth, G. Hahn, En. Proc. **38** (2013) 642.
- [4] A. Lanford, M. J. Rand, J. Appl. Phys. **49** (1978) 2473.
- [5] Benoit, Science Direct, Microelectr. Eng. **84** (2007) 2169.

GLAD auf mittels Laserinterferenzlithographie und RIE-Ätzen vorstrukturierten Si-Substraten

Uta Rahn¹, Bodo Fuhrmann², Georg Schmidt¹, Susann Liedtke³

¹Fachbereich Physik, Martin-Luther-Universität Halle–Wittenberg, 06099 Halle

²Interdisziplinäres Zentrum für Materialwissenschaften, Martin-Luther-Universität Halle–Wittenberg, 06099 Halle

³Leibniz-Institut für Oberflächenmodifizierung e.V., 04318 Leipzig

Dünne nanostrukturierte Filme sind zurzeit von großem wissenschaftlichen aber auch technologischen Interesse. So finden diese beispielsweise Anwendung in katalytischen Oberflächen, Mikrosensoren oder optischen Filtern. Zur Herstellung von großflächig nanostrukturierten Oberflächen eignet sich die Glanzwinkeldeposition – kurz GLAD besonders gut.

Zur Herstellung der nanostrukturierten Oberflächen wurde eine Ionenstrahl-Sputteranlage genutzt, mit der Titan im streifenden Einfall auf das Siliziumsubstrat geleitet wird. Dort kondensiert das Titan aufgrund von Oberflächendiffusion und des Abschattungseffektes in Form von säulenartigen Nanostrukturen. Abhängig von dem Einfallswinkel des Teilchenflusses und der Substratrotation während des Depositionsvorganges können verschiedene Strukturen hergestellt werden, die sich sowohl in ihrer Form als auch in ihren optischen, mechanischen und elektrischen Eigenschaften unterscheiden. So lassen sich beispielsweise aufrechte oder geneigte Nanosäulen, schraubenförmige Nanosäulen oder Zickzackstrukturen erzeugen, deren räumliche Verteilung allerdings von der statistischen Keimbildung abhängig ist. Da viele Anwendungen eine genauere Positionierung der Nanostrukturen über große Flächen voraussetzen, wurden die Siliziumsubstrate mittels Laserinterferenzlithographie (LIL) und RIE-Ätzen vorstrukturiert.

Der verwendete Positivlack AZ MiR 701 (Microchemicals) wurde mittels Spincoating auf das Silizium-Substrat gebracht. Um bei der Laserinterferenzlithographie bessere Auflösungen zu erzielen wurde eine Verdünnung von 1:2 verwendet. Für eine bessere Haftung des Photolackes auf dem Substrat wurde vorab eine Haftvermittlerschicht (R 300-80, All Resist) von ca. 15 nm Dicke aufgebracht.

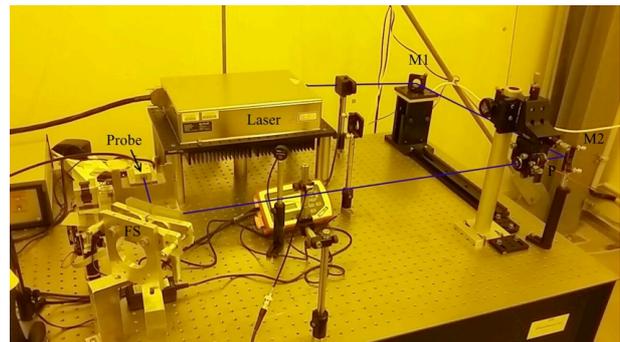


Abb. 1: Strahlengang im LIL-Aufbau mit Fresnel-Doppelspiegelkonstruktion

Der gesamte LIL-Aufbau steht auf einem „High performance laminar flow isolator“ (Stabilizer), um auch kleinste Vibrationen zu kompensieren. Der verwendete Laser besitzt eine Wellenlänge von 266 nm und eine Leistung von 10 mW. Die in dieser Arbeit verwendete Konstruktion zur Erzeugung von hexagonalen Strukturen besteht aus zwei Spiegeln, die in einem Winkel von 120° fest aufeinander stehen. Die Spiegelkonstruktion selbst steht im rechten Winkel zum Substrat, sodass sowohl die beiden Spiegel, als auch das Substrat gleichzeitig ausgeleuchtet werden können. Über den Einfallswinkel des aufgeweiteten Laserstrahls kann die Periode des erzeugten Interferenzmusters stufenlos eingestellt werden. Durch die Verwendung dieser Spiegelkonstruktion können hexagonale Punkt- oder Lochmuster im entsprechendem Positiv- oder Negativlack bei einmaliger Belichtung erzeugt werden. Um Proben mit beispielsweise kubischem Gitter oder über 500 nm Periode zu erzeugen, muss die Fresnel-Doppelspiegelkonstruktion verwendet werden. Hierbei fällt der aufgeweitete Laserstrahl auf zwei um wenige Winkelminuten zueinander geneigte Spiegel. Die Probe wird in einiger Entfernung zu der Spiegelkonstruktion so positioniert, dass die beiden reflektierten Teilstrahlen sich auf der Probe überlagern. Die

Periode des so erzeugten Interferenzmusters kann über die Neigung der beiden Spiegel zueinander ebenfalls stufenlos eingestellt werden.

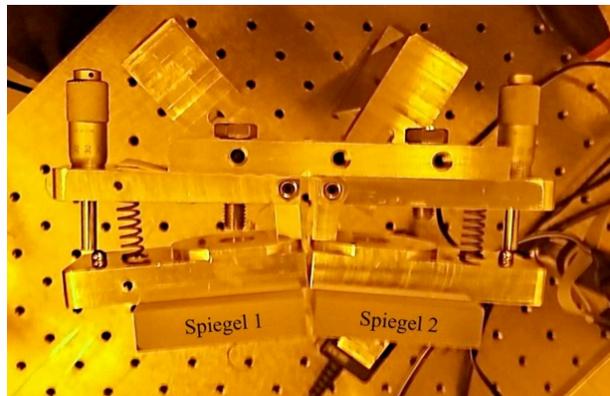


Abb. 2: Fresnel-Doppelspiegelkonstruktion in der Draufsicht

Nach entsprechender Belichtungszeit und dem Post Exposure Bake von 5 min bei 110 °C wurden die Proben für 40 s mit AZ 300-44 (Microchemicals) entwickelt und anschließend mit CHF_3/O_2 im Verhältnis von 75 % zu 25 % RIE-geätzt. Es wurden Substrate mit hexagonalem und kubischem Punktgitter mit Perioden von je 500 nm und 1000 nm und einem Aspektverhältnis von ca. 1:3 hergestellt. Abbildung 3 zeigt eine SEM-Aufnahme eines hexagonal strukturierten Substrates nach dem RIE-Ätzen.

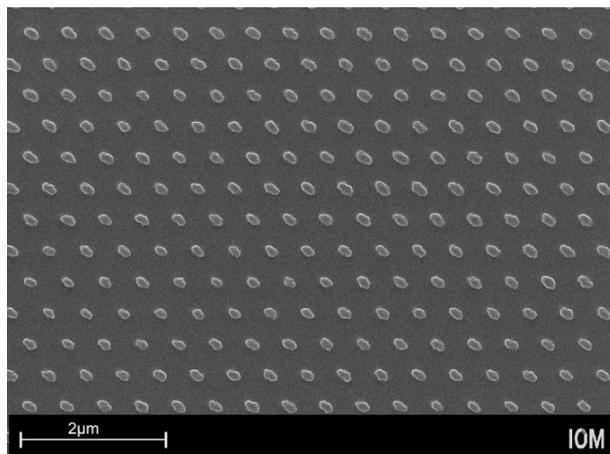


Abb. 3: Mittels LIL hergestelltes hexagonal vorstrukturiertes Siliziumsubstrat mit einer Periode von 500 nm

Anschließend wurden die mittels LIL und RIE-Ätzen vorstrukturierten Proben für GLAD verwendet. Abbildung 4 zeigt eine SEM-Aufnahme von um 56° gegen die Oberflächennormale geneigten Titansäulen auf einem hexagonal vorstrukturierten Siliziumsubstrat.

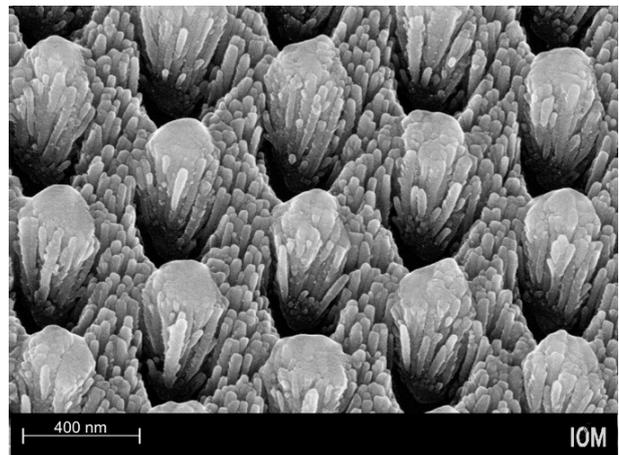


Abb. 4: Mittels GLAD hergestellte geneigte Titansäulen auf einem mittels LIL hergestellten hexagonal vorstrukturierten Silizium-Substrat

Solche Substrate können beispielsweise für Wachstumsuntersuchungen von Fibroblasten genutzt werden. Vorstrukturierte Substrate sind eine einfache Möglichkeit wohldefinierte Abstände zwischen den, in diesem Falle, Titansäulen vorzugeben. Voruntersuchungen [1] zeigen, dass der Abstand der durch die Titansäulen vorgegebenen Berührungspunkte einen Einfluss auf das Überleben der Fibroblasten auf derartigen Substraten hat. Dies soll im weiteren Verlauf der Arbeit näher untersucht werden.

[1] Y. Motemani, C. Greulich, C. Khare: Appl. Surf. Sci. **292** (2014) 626.

Publikationen des IZM 2010–2015

- 10th International workshop Beam injection assessment of microstructures in semiconductors.** O. Breitenstein, H. S. Leipner, P. Werner (Hrg.) Weinheim: VCH-Wiley 2011.
- N. Yu. Arutyunov, M. Elsayed, R. Krause-Rehberg, V. V. Emtsev, G. A. Oganessian, V. V. Kozlovski:
Positron probing of point radiation defects in proton-irradiated FZ-silicon single crystals. Sol. State Phen. **178-179** (2011) 313.
- N. Yu. Arutyunov, M. Elsayed, R. Krause-Rehberg, V. V. Emtsev, G. A. Oganessian, V. V. Kozlovski:
Positron lifetime at deep donors of radiation origin in proton-irradiated FZ-silicon single crystals. Mater. Sci. Forum **733** (2013) 224. DOI 10.4028/www.scientific.net/MSF.733.224
- N. Yu. Arutyunov, M. Elsayed, R. Krause-Rehberg, V. V. Emtsev, G. A. Oganessian, V. V. Kozlovski:
Positron annihilation on defects in silicon irradiated with 15 MeV protons. J. Phys. Cond. Mat. **25** (2013) 035801. DOI 10.1088/0953-8984/25/3/035801
- N. Yu. Arutyunov, M. Elsayed, R. Krause-Rehberg, V. V. Emtsev, G. A. Oganessian, V. V. Kozlovski:
Similarity of atomic configurations of thermally stable positron-sensitive complexes produced with 0.9-MeV electrons and 15-MeV protons in n-FZ-Si:P crystals. Solid State Phenom. **242** (2015) 296.
- N. Yu. Arutyunov, V.V. Emtsev, R. Krause-Rehberg:
Point defects in gamma-irradiated germanium: High- and low-momentum positron annihilation study before and after n-p-conversion. Sol. State Phenom. **156-158** (2010) 455.
- N. Y. Arutyunov, V. V. Emtsev, R. Krause-Rehberg, C. Kessler, M. Elsayed, G. A. Oganessian, V. V. Kozlovski:
Cascade phonon-assisted trapping of positrons by divacancies in n-FZ-Si (P) single crystals irradiated with 15 MeV protons. AIP Conf. Proc. **1583** (2014) 41. DOI 10.1063/1.4865601
- T. Bähr, H. Behn. M. Lohan, M. Hollatz, D. Oriwol:
Residual stresses in multicrystalline silicon: Test of different measurement techniques and comparison with simulation. EU PVSEC Proc. (2012) 642.
- J. Banhart, M. Liu, Y. Yong, Z. Liang, C. S .T. Chang, M. Elsayed, M. D. H. Lay:
Study of ageing in Al–Mg–Si alloys by positron annihilation spectroscopy. Physica B: Cond. Mat. **407** (2012) 2689.
- J. Bartoš, H. Švajdlenková, M. Lukešová, Y. Yu, R. Krause-Rehberg:
Molecular dynamics and free volume in organic glass-formers: A series of oligomer and polymer 1,4-poly(isoprene). Chem. Phys. Lett. **602** (2014) 28. DOI 10.1016/j.cplett.2014.04.006
- J. Bauer, M. Weise, B. Rauschenbach, N. Geyer, B. Fuhrmann:
Shape evolution in glancing angle deposition of arranged germanium nanocolumns. J. App. Phys. **111** (2012) 104309.
- W. Beichel, Y. Yu, G. Dlubek, R. Krause-Rehberg, J. Pionteck, D. Pfefferkorn, S. Bulut, D. Bejan, C. Friedrich, I. Krossing:
Free volume in ionic liquids: A connection of experimentally accessible observables from positron annihilation lifetime spectroscopy and pressure-volume-temperature experiments with the molecular structure from X-ray diffraction data. Phys. Chem. Chem. Phys. **15** (2013) 8821. DOI 10.1039/c3cp43306d
- M. Butterling, W. Anwand, G. Brauer, T. E. Cowan, A. Hartmann, M. Jungmann, K. Kosev, R. Krause-Rehberg, A. Krille, R. Schwengner, A. Wagner:

- Positron annihilation spectroscopy using high-energy photons.** *phys. stat. sol. (a)* **207** (2010) 334.
- M. Butterling, W. Anwand, T. E. Cowan, A. Hartmann, M. Jungmann, R. Krause-Rehberg, A. Krille, A. Wagner:
Gamma-induced positron spectroscopy (GiPS) at a superconducting electron linear accelerator. *Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. B* **269** (2011) 2623.
- J. Čížek, M. Vlček, F. Lukáč, O. Melikhova, I. Procházka, W. Anwand, A. Wagner, M. Butterling, R. Krause-Rehberg:
Positron annihilation in flight: experiment with slow and fast positrons.
J. Phys. Conf. Ser. **505** (2014) 012043. DOI 10.1088/1742-6596/505/1/012043
- J. de Boor, N. Geyer, J. V. Wittemann, U. Gösele, V. Schmidt:
Sub-100 nm silicon nanowires by laser interference lithography and metal-assisted etching.
Nanotechnol. **21** (2010) 095302.
- K. Drogowska, M. Elsayed, R. Krause-Rehberg, A. G. Balogh:
About the defect structure in differently doped PZT ceramics: A temperature dependent positron lifetime study. *Cer. Intern.* **40** (2014) 9127. DOI 10.1016/j.ceramint.2014.01.127
- S. G. Ebbinghaus, H. Krause, F. Syrowatka:
Floating zone growth of large and defect-free $\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14}\text{O}_{33}$ single crystals.
Crystal Growth Design **13** (2013) 2990. DOI 10.1021/cg400406t
- C. Ehrhardt, C. Fettkenhauer, J. Glenneberg, W. Münchgesang, H. S. Leipner, M. Diestelhorst, S. Lemm, H. Beige, S. G. Ebbinghaus:
A solution-based approach to composite dielectric films of surface functionalized $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ and P(VDF-HFP). *J. Mater. Chem. A* **2** (2013) 2266. DOI 10.1039/C3TA14379A
- C. Ehrhardt, C. Fettkenhauer, J. Glenneberg, W. Münchgesang, H. S. Leipner, G. Wagner, M. Diestelhorst, C. Pientschke, H. Beige, S. G. Ebbinghaus:
Enhanced dielectric properties of sol-gel- $\text{BaTiO}_3/\text{P(VDF-HFP)}$ composite films without surface functionalization. *RSC Adv.* **4** (2014) 40321. DOI 10.1039/c4ra03715d
- C. Ehrhardt, C. Fettkenhauer, J. Glenneberg, W. Münchgesang, C. Pientschke, T. Großmann, M. Zenkner, G. Wagner, H. S. Leipner, A. Buchsteiner, M. Diestelhorst, S. Lemm, H. Beige, S. G. Ebbinghaus:
 $\text{BaTiO}_3\text{-P(VDF-HFP)}$ nanocomposite dielectrics – Influence of surface modification and dispersion additives. *Mater. Sci. Eng. B* **178** (2013) 881. DOI 10.1016/j.mseb.2013.04.013
- C. Ehrhardt, B. Fuhrmann, M. Diestelhorst, S. G. Ebbinghaus:
 $\text{BaTiO}_3\text{-polymer}$ composites. *Z. anorg. allg. Chem.* **636** (2010) 2114.
- M. Elsayed, N. Yu. Arutyunov, R. Krause-Rehberg, V. V. Emtsev, G. A. Oganessian, V.V. Kozlovski:
Monovacancy-As complexes in proton-irradiated Ge studied by positron lifetime spectroscopy.
Acta Mater. (2015) 473.
- M. Elsayed, N. Yu. Arutyunov, R. Krause-Rehberg, G. A. Oganessian, V. V. Kozlovski:
Formation and annealing of vacancy-P complexes in proton-irradiated germanium.
Acta Mater. **100** (2015) 1.
- M. Elsayed, V. Bondarenko, K. Petters and R. Krause-Rehberg:
Detection of vacancy-like defects during Cu diffusion in GaAs by positron annihilation. *J. Phys. Conf. Ser.* **265** (2011) 012005.
- M. Elsayed, R. Krause-Rehberg, B. Korff, I. Ratschinski, H. S. Leipner:
Divacancy complexes induced by Cu diffusion in Zn-doped GaAs. *Eur. Phys. J. B* **86** (2013) 358. DOI 10.1140/epjb/e2013-40414-7

- M. Elsayed, R. Krause-Rehberg, W. Anwand, M. Butterling, B. Korff:
Identification of defect properties by positron annihilation in Te-doped GaAs after Cu in-diffusion. Phys. Rev. B **84** (2011) 195208.
- M. Elsayed, R. Krause-Rehberg, B. Korff, S. Richter, H. S. Leipner:
Identification of As-vacancy complexes in Zn-diffused GaAs. J. Appl. Phys. **113** (2013) 094902. DOI 10.1063/1.4793791
- M. Elsayed, R. Krause-Rehberg, O. Moutanabbir, W. Anwand, S. Richter, C. Hagendorf, P. Huang, N. Geyer, L. F. Li, M. Y. Li, P. Zhong:
Cu diffusion-induced vacancy-like defects in freestanding GaN. New J. Phys. **13** (2011) 013029.
- N. Geyer, B. Fuhrmann, Z. Huang, J. de Boor, H. S. Leipner, P. Werner:
Model for the mass transport during metal-assisted chemical etching with contiguous metal films as catalysts. J. Phys. Chem. C **116** (2012) 13446.
- N. Geyer, B. Fuhrmann, H. S. Leipner, P. Werner:
Ag-Mediated charge transport during metal-assisted chemical etching of silicon nanowires. ACS Appl. Mater. Interfaces **5** (2013) 4302. DOI 10.1021/am400510f
- N. Geyer, N. Wollschläger, B. Fuhrmann, A. Tonkikh, A. Berger, P. Werner, M. Jungmann, R. Krause-Rehberg, S. Leipner:
Influence of the doping level on the porosity of silicon nanowires prepared by metal-assisted chemical etching. Nanotechnol. **26** (2015) 245301. DOI 10.1088/0957-4484/26/24/245301
- J. Glenneberg, M. Zenkner, G. Wagner, S. Lemm, C. Ehrhardt, W. Münchgesang, A. Buchsteiner, M. Diestelhorst, H. Beige, S. G. Ebbinghaus, H. S. Leipner:
Morphological and microstructural investigations of composite dielectrics for energy storage. RSC Adv. **4** (2014) 61268. DOI 10.1039/C4RA07354A
- R. Göckeritz, N. Homonnay, A. Müller, T. Richter, B. Fuhrmann, G. Schmidt:
Nanosized perpendicular organic spin-valves. Appl. Phys. Lett. **116** (2015) 102403. DOI 10.1063/1.4914830
- C. Günther, H. Richter, I. Voigt, A. Michaelis, H. Tzscheuschler, R. Krause-Rehberg, J. M. Serra:
Synthesis and characterization of a sulfur containing hydroxy sodalite without sulfur radicals. Microporous Mesoporous Mater. **214** (2015) 1.
- M. Grünewald, N. Homonnay, J. Kleinlein, G. Schmidt:
Voltage-controlled oxide barriers in organic/hybrid spin valves based on tunneling anisotropic magnetoresistance. Phys. Rev. B **90** (2014) 205208. DOI 10.1103/PhysRevB.90.205208
- M. Grünewald, J. Kleinlein, F. Syrowatka, F. Würthner, L. W. Molenkamp, G. Schmidt:
Large room-temperature magnetoresistance in lateral organic spin valves fabricated by in situ shadow evaporation. Org. Electron. **14** (2013) 2083. DOI 10.1016/j.orgel.2013.04.049
- S. Hartnauer, L. A. Wägele, F. Syrowatka, G. Kaune, R. Scheer:
Co-evaporation process study of Cu₂ZnSnSe₄ thin films by in situ light scattering and in situ X-ray diffraction. phys. stat. sol. (a) **212** (2014) 356. DOI 10.1021/bm501286
- M. Hempel, J. W. Tomm, F. La Mattina, I. Ratschinski, M. Schade, I. Shorubalko, M. Stiefel, H. S. Leipner, F. M. Kießling, T. Elsaesser:
Microscopic origins of catastrophic optical damage in diode lasers. IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. **19** (2013) 1500508. DOI 10.1109/JSTQE.2012.2236303
- I. Höger, T. Schmidt, A. Landgraf, M. Schade, A. Gawlik, G. Andrä, H. S. Leipner, F. Falk:
In situ excimer laser irradiation as cleaning tool for solid phase epitaxy of laser crystallized polycrystalline silicon thin films. phys. stat. sol. (a) **210** (2013) 2729. DOI 10.1002/pssa.201330056
- S. Hollstein, E. Hoffmann, J. Vogel, F. Heyroth, N. Prochnow, P. Maurer:

- Micromorphometrical analyses of five different ultrasonic osteotomy devices at the rabbit skull.** Clin. Oral Implants Res. **22** (2011) 5.
- N. Hommonnay, N. Geyer, B. Fuhrmann, H. S. Leipner:
Advanced colloidal lithography for sub-100 nm lift-off structures. Vacuum **86** (2012) 1232.
- Z. P. Huang, N. Geyer, L. F. Li, M. Y. Li, P. Zhong:
Metal-assisted electrochemical etching of silicon. Nanotechnol. **21** (2010) 465301.
- Z. Huang, N. Geyer, P. Werner, J. de Boor, U. Gösele:
Metal-assisted chemical etching of silicon: A review. Adv. Mater. **23** (2011) 285.
- Z. Huang, T. Shimizu, S. Senz, Z. Zhang, N. Geyer, U. Gösele:
Oxidation rate effect on the direction of metal-assisted chemical and electrochemical etching of silicon. J. Phys. Chem. C **114** (2010) 10683.
- E. Jarzembowski, F. Syrowatka, K. Kaufmann, W. Fränzel, T. Hölscher, R. Scheer:
The influence of sodium on the molybdenum/Cu(In,Ga)Se₂ interface recombination velocity, determined by time resolved photoluminescence. Appl. Phys. Lett. **107** (2015) 051601.
- M. Jungmann, J. Haeberle, R. Krause-Rehberg, W. Anwand, M. Butterling, A. Wagner, J. M. Johnson, T. E. Cowan:
First Experiments with MePS.
J. Phys. Conf. Ser. **443** (2013) 012088. DOI 10.1088/1742-6596/443/1/012088
- C. Khare, B. Fuhrmann, H. S. Leipner, J. Bauer, B. Rauschenbach:
Optimized growth of Ge nanorod arrays on Si patterns. J. Vac. Sci. Technol. A **29** (2011) 051501.
- C. Khare, J. W. Gerlach, T. Höche, B. Fuhrmann, H. S. Leipner, B. Rauschenbach:
Effects of annealing on arrays of Ge nanocolumns formed by glancing angle deposition. Appl. Surf. Sci. **258** (2012) 9762.
- C. Khare, C. Patzig, J. W. Gerlach, B. Rauschenbach, B. Fuhrmann:
Influence of substrate temperature on glancing angle deposited Ag nanorods. J. Vac. Sci. Technol. A **28** (2010) 1002.
- W. K. Kipnusu, M. Elsayed, W. Kossack, S. Pawlus, K. Adrjanowicz, M. Tress, E. U. Mapesa, R. Krause-Rehberg, K. Kaminski, F. Kremer:
Confinement for more space: A larger free volume and enhanced glassy dynamics of 2-ethyl-1-hexanol in nanopores. J. Phys. Chem. Lett. **6** (2015) 3708.
- J. Kleinlein, B. Ocker, G. Schmidt:
Using giant magneto resistance stripes to efficiently generate direct voltage signals from alternating current excitations. Appl. Phys. Lett. **104** (2014) 153507. DOI 10.1063/1.4871383
- K. Kosev, M. Butterling, W. Anwand, T. Cowan, A. Hartmann, K. Heidel, M. Jungmann, R. Krause-Rehberg, R. Massarczyk, K.D. Schilling, R. Schwengner, A. Wagner:
Evaluation of a microchannel-plate PMT as a potential timing detector suitable for positron lifetime measurements. Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A **624** (2010) 641.
- A. Krille, W. Anwand, R. Krause-Rehberg:
Digital positron lifetime: the influence of noise. J. Phys. Conf. Ser. **265** (2011) 012026.
- A. Krille, M. Nagl, U. Vetter, H. Hofsäss, R. Krause-Rehberg:
First results of ab-initio simulations of scintillation detector characteristics. J. Phys. Conf. Ser. **262** (2011) 012033.
- J. Kullmann, D. Enke, S. Thraenert, R. Krause-Rehberg, M. Beiner:
Characterization of pore filling of mesoporous host systems by means of positronium annihilation lifetime spectroscopy (PALS). Optica Applicata **XLII** (2012) 281.

- J. Kullmann, D. Enke, S. Thraenert, R. Krause-Rehberg, A. Inayat:
Characterization of nanoporous monoliths using nitrogen adsorption and positronium annihilation lifetime spectroscopy. Coll. Surf. A **357** (2010) 17.
- C. Kutza, H. Metz, J. Kutza, F. Syrowatka, K. Mäder:
Toward a detailed characterization of oil adsorbates as "solid liquids".
Eur. J. Pharm. Biopharm. **84** (2013) 172. DOI 10.1016/j.ejpb.2012.12.008
- H. S. Leipner:
Nicht technologieneutral. Phys. J. **13** (2014) 13.
- H. S. Leipner, N. Geyer, F. Syrowatka, H. Cheng, B. Fuhrmann:
Fabrication of complex structures with an array of nanopinhole cameras. SPIE Proc. **8102** (2011) 0W.Z.
- A. Li, G. Köwitsch, G. Zhou, T. Groth, B. Fuhrmann, M. Niepel, E. Amado, J. Kressler:
Enantiopure chiral poly(glycerol methacrylate) self-assembled monolayers knock down protein adsorption and cell adhesion. Adv. Healthcare Mater. **2** (2013) 1377. DOI 10.1002/adhm.201200402
- R. Morsy, M. Elsayed, R. Krause-Rehberg, G. Dlubek, T. Elnimr:
Positron annihilation spectroscopic study of hydrothermally synthesized fine nanoporous hydroxyapatite agglomerates. J. Eur. Cer. Soc. **30** (2010) 1897.
- O. Moutanabbir, R. Scholz, U. Gösele, A. Guittoum, M. Jungmann, M. Butterling, R. Krause-Rehberg, W. Anwand, W. Egger, P. Sperr:
Experimental elucidation of vacancy complexes associated with hydrogen ion-induced splitting of bulk GaN. Phys. Rev. B **81** (2010) 115205.
- M. S. Niepel, B. Fuhrmann, H. S. Leipner, T. Groth:
Combined topographical and chemical cues on planar surfaces alter the performance of human fibroblasts. Bionanomater. **15** (2014) S157.
- M. S. Niepel, B. Fuhrmann, H. S. Leipner, T. Groth:
Multischichten aus synthetischen und Biopolymeren steuern die Zelladhäsion auf nanostrukturierten Oberflächen. Biomater. **12** (2011) 143.
- M. S. Niepel, B. Fuhrmann, H. S. Leipner, T. Groth:
Nanoscaled surface patterns influence adhesion and growth of human dermal fibroblasts.
Langmuir **29** (2013) 13278. DOI 10.1021/la402705r
- D. Oriwol, E.-R. Carl, A. N. Danilewsky, L. Sylla, W. Seifert, M. Kittler, H. S. Leipner:
Small-angle subgrain boundaries emanating from dislocation pile-ups in multicrystalline silicon studied with synchrotron white-beam X-ray topography.
Acta Mater. **61** (2013) 6903. DOI 10.1016/j.actamat.2013.08.002
- D. Oriwol, M. Hollatz, M. Reinecke:
Control of dislocation cluster formation and development in silicon block casting.
En. Proc. **27** (2012) 66.
- X. Ou, N. Geyer, R. Kögler, P. Werner, W. Skorupa:
Acceptor deactivation in individual silicon nano-wires: From thick to ultrathin. Appl. Phys. Lett. **98** (2011) 253103.
- C. Patzig, C. Khare, B. Fuhrmann, B. Rauschenbach:
Periodically arranged Si nanostructures by glancing angle deposition on patterned substrates.
phys. stat. sol. (b) **247** (2010) 1322.

C. Pientschke, R. Steinhausen, S. Kern, H. Beige:

Modelling of the measured longitudinal piezoelectric coefficient of single ceramic fibres with annular electrodes. Smart Mater. Struct. **20** (2011) 2011.

A. D. Pogrebnjak, G. Abadias, P. Chartier, O. V. Bondar, I. V. Yakushchenko, Y. Takeda, R. Krause-Rehberg, D. A. Kolesnikov, V. M. Beresnev, J. Partyka:

Influence of deposition parameters and thermal annealing on the structure and properties of ni-tride coatings (TiHfZrVNb)N. Acta Phys. Pol. A **125** (2014) 1296.

A. D. Pogrebnjak, I. V. Yakushchenko, A. A. Bagdasaryan, O. V. Bondar, R. Krause-Rehberg, G. Abadias, P. Chartier, K. Oyoshi, Y. Takeda, V. M. Beresnev, O. V. Sobol:

Microstructure, physical and chemical properties of nanostructured (Ti-Hf-Zr-V-Nb)N coatings under different deposition conditions.

Mater. Chem. Phys. **147** (2014) 1079. DOI 10.1016/j.matchemphys.2014.06.062

I. Ratschinski, H. S. Leipner, F. Heyroth, W. Fränzel, R. Hammer, M. Jurisch:

Dislocations and cracks at Vickers indentations in (0001) GaN single crystals. Phil. Mag. Lett. **90** (2010) 565. [Among top 10 downloaded papers of Phil. Mag. Lett.](#)

I. Ratschinski, H. S. Leipner, F. Heyroth, W. Fränzel, R. Hammer, M. Jurisch:

Dislocations and cracks at Vickers indentations in GaN and GaAs bulk crystals. phys. stat. sol. (c) **8** (2011) 1325.

I. Ratschinski, H. S. Leipner, F. Heyroth, W. Fränzel, G. Leibiger, F. Habel:

The effect of the indenter orientation on the formation of dislocations and cracks in (0001) GaN bulk crystals.

Mater. Sci. Forum **725** (2012) 67.

I. Ratschinski, H. S. Leipner, F. Heyroth, W. Fränzel, O. Moutanabbir, R. Hammer, M. Jurisch:

Indentation-induced dislocations and cracks in (0001) freestanding and epitaxial GaN.

J. Phys. Conf. Ser. **281** (2011) 012007.

I. Ratschinski, H. S. Leipner, F. Heyroth, W. Mook, J. Michler, W. Fränzel, G. Leibiger, F. Habel:

Cracks and dislocations at Vickers, Berkovich and cube corner indentations in (0001) GaN single crystals. phys. stat. sol. (c) **10** (2013) 76. DOI 10.1002/pssc.201200388

J. Reif, O. Varlamova, M. Bounhalli, T. Arguirov, M. Schade, H. S. Leipner:

Long-time feedback in self-organized nanostructures formation upon multi-pulse femtosecond laser ablation. Proc SPIE **7586** (2010) 75860.

J. Reif, O. Varlamova, M. Ratzke, M. Schade, H. S. Leipner, T. Arguirov:

Multipulse feedback in self-organized ripples formation upon femtosecond laser ablation from silicon. Appl. Phys. A **101** (2010) 361.

M. Roczen, A. Laades, M. Schade, T. Barthel, J. Ordeñez, J. A. Töfflinger, E. Malguth, F. Ruske, C. Leendertz, L. Korte, H. S. Leipner, B. Rech:

Structural properties of Si/SiO₂ nanostructures grown by decomposition of substoichiometric SiO_xN_y layers for photovoltaic applications.

phys. stat. sol. (a) **210** (2013) 676. DOI 10.1002/pssa.201200803

M. Roczen, E. Malguth, M. Schade, A. Schöpke, A. Laades, M. Blech, O. Gref, T. Barthel, J. A. Töfflinger, M. Schmidt, H. S. Leipner, L. Korte, B. Rech:

Comparison of growth methods for Si/SiO₂ nanostructures as nanodot hetero-emitters for photovoltaic applications. J. Non-Cryst. Sol. **358** (2012) 2253. 10.1016/j.jnoncrysol.2011.11.024.

M. Roczen, M. Schade, E. Malguth, G. Callsen, T. Barthel, O. Gref, J. A. Töfflinger, A. Schöpke, M. Schmidt, H. S. Leipner, F. Ruske, M. R. Phillips, A. Hoffmann, L. Korte, B. Rech:

Structural investigations of silicon nanostructures grown by self-organized island formation for photovoltaic applications. Appl. Phys. A **108** (2012) 719.

- H. Roggendorf, F. Syrowatka, J. Trempler:
Corrosion of sodium silicate glasses in aqueous solutions – influence of pH. Phys. Chem. Glasses **51** (2010) 318.
- K. Rothe, M. Stordeur, F. Heyroth, F. Syrowatka, H. S. Leipner:
Electrical and structural real-time changes in thin thermoelectric $(\text{Bi}_{0.15}\text{Sb}_{0.85})_2\text{Te}_3$ films by dynamic thermal treatment. J. Electron. Mater. **39** (2010) 1408.
- K. Rothe, M. Stordeur, H. S. Leipner:
Power factor anisotropy of p-type and n-type conductive thermoelectric Bi-Sb-Te thin films. J. Electron. Mater. **39** (2010) 1395.
- T. Rublack, S. Hartnauer, M. Mergner, M. Muchow, M. Schade, H. S. Leipner, G. Seifert:
Mechanism of selective removal of transparent layers on semiconductors using ultrashort laser pulses. Proc. SPIE **8247** (2012) 82470Z.
- T. Rublack, M. Schade, M. Muchow, H. S. Leipner, G. Seifert:
Proof of damage-free selective removal of thin dielectric coatings on silicon wafers by irradiation with femtosecond laser pulses. J. Appl. Phys. **112** (2012) 023521.
- N. Sardana, T. Birr, S. Schlenker, C. Reinhardt, J. Schilling:
Surface plasmons on ordered and bi-continuous spongy nanoporous gold. New J. Phys. **16** (2014) 063053. DOI 10.1088/1367-2630/16/6/063053
- M. Schade, H. S. Leipner, W. Fränzel:
Spectroscopic investigation of silicon polymorphs formed by indentation. Mater. Sci. Forum **725** (2012) 199.
- M. Schade, B. Fuhrmann, C. Bohley, S. Schlenker, N. Sardana, J. Schilling, H. S. Leipner:
Regular arrays of Al nanoparticles for plasmonic applications. J. Appl. Phys. **115** (2014) 084309. DOI 10.1063/1.4867369
- M. Schade, B. Fuhrmann, A. Chassé, F. Heyroth, M. Roczen, H. S. Leipner:
Distinction between amorphous and crystalline silicon by means of electron energy-loss spectroscopy. Appl. Phys. A (2015). DOI 10.1007/s00339-015-9201-5
- M. Schade, T. Mchedlidze, M. Kittler, H. S. Leipner:
Light induced crystallization of an amorphous silicon film embedded between silicon oxide layers. phys. stat. sol. (b) **251** (2014) 439. DOI 10.1002/pssb.201349143
- M. Schade, O. Varlamova, J. Reif, H. Blumtritt, W. Erfurth, H. S. Leipner:
High-resolution investigations of ripple structures formed by femtosecond laser irradiation of silicon. Anal. Bioanal. Chem. **396** (2010) 1905.
- J. Schilling, V. Talalaev, A. Tonkikh, B. Fuhrmann, F. Heyroth, M. Otto:
Enhanced non-radiative recombination in the vicinity of plasma-etched side walls of luminescing Si/Ge-quantum dot structures. J. Appl. Phys. **103** (2013) 161106. DOI 10.1063/1.4825149
- C. Schriever, F. Bianco, M. Cazzanelli, M. Ghulinyan, C. Eisenschmidt, J. de Boor, A. Schmid, J. Heitmann, L. Pavesi, J. Schilling:
Second order optical nonlinearity in silicon waveguides - inhomogeneous stress and interfaces. Adv. Opt. Mater **3** (2015) 129.
- L. Stockmeier, M. Elsayed, R. Krause-Rehberg, M. Zschorsch, L. Lehmann, J. Friedrich:
Electrically inactive dopants in heavily doped As-grown Czochralski silicon. Solid State Phenom. **242** (2015) 10.
- A. Szeghalmi, M. Helgert, R. Brunner, F. Heyroth, U. Gösele, M. Knez:
Tunable guided-mode resonance Grating Filter. Adv. Funct. Mater. **20** (2010) 2053.

- V. G. Talalaev, G. E. Cirlin, L. I. Goray, B. V. Novikov, M. E. Labzovskaya, J. W. Tomm, P. Werner, B. Fuhrmann, J. Schilling, P. N. Racec:
Effect of nanobridges on the emission spectra of a quantum dot-quantum well tunneling pair. Semicond. **48** (2014) 1178. DOI 10.1134/S1063782614090218
- V. G. Talalaev, G. E. Cirlin, B. V. Novikov, B. Fuhrmann, P. Werner, J. W. Tomm:
Ex post manipulation of barriers in InGaAs tunnel injection devices. J. Appl. Phys. **106** (2015) 013104.
- В. Г. Талалаев, Г. Э. Цырлин, Л. И. Горай, Б. В. Новиков, М. Э. Лабзовская, J. W. Tomm, P. Werner, B. Fuhrmann, J. Schilling, P. N. Racec:
Влияние наномостиков на спектр излучения туннельной пары квантовая точка–квантовая яма. Физ. Тех. Полупров. **48** (2014) 1209.
- V. G. Talalaev, B. V. Novikov, G. E. Cirlin, H. S. Leipner:
Temperature quenching of spontaneous emission in tunnel-injection nanostructures. Semicond. **49** (2015) 1483.
- V. G. Talalaev, B. V. Novikov, G. E. Cirlin, H. S. Leipner.
Spontaneous emission in tunnel injection nanostructures. Fiz. Techn. Poluprov. **49** (2015) 1531.
- В. Г. Талалаев, А. А. Тонких, Н. Д. Захаров, А. В. Сеничев, J. W. Tomm, P. Werner, Б. В. Новиков, L. V. Asryan, B. Fuhrmann, J. Schilling, H. S. Leipner, А. Д. Буравлев, Ю. Б. Самсоненко, А. И. Хребтов, И. П. Сошников, Г. Э. Цырлин:
Светоизлучающие туннельные наноструктуры на основе квантовых точек в матрице кремния и арсенида галлия. Физ. Тех. Полупров. **46** (2012) 1492.
- V. G. Talalaev, A. A. Tonkikh, N. D. Zakharov, A. V. Senichev, J. W. Tomm, P. Werner, B. V. Novikov, L. V. Asryan, B. Fuhrmann, J. Schilling, H. S. Leipner, A. D. Bouraulev, Yu. B. Samsonenko, A. I. Khrebtov, I. P. Soshnikov, G. E. Cirlin:
Light-emitting tunneling nanostructures based on quantum dots in a Si and GaAs Matrix. Semicond. **46** (2012) 1460.
- A. A. Tonkikh, N. Geyer, B. Fuhrmann, H. S. Leipner, P. Werner:
Pathway of porous silicon formation inside Si nanowires throughout metal assisted etching. MRS Proc. **1408** (2012) mrsf11. DOI 10.1557/opl.2012.727.
- A. A. Tonkikh, N. D. Zakharov, C. Eisenschmidt, H. S. Leipner, P. Werner:
Aperiodic SiSn/Si multilayers for thermoelectric applications. J. Cryst. Growth **392** (2014) 49. DOI 10.1016/j.jcrysgro.2014.01.047
- A. A. Tonkikh, N. D. Zakharov, A.V. Novikov, K. E. Kudryavtsev, V. G. Talalaev, B. Fuhrmann, H. S. Leipner, P. Werner:
Sb Mediated Formation of Ge/Si Quantum Dots: Growth and Properties. Thin. Sol. Films. **520** (2012) 3322. DOI 10.1016/j.tsf.2011.10.049
- M. Trempa, C. Reimann, J. Friedrich, G. Müller, D. Oriwol:
Mono-crystalline growth in directional solidification of silicon with different orientation and splitting of seed crystals. J. Cryst. Growth **351** (2012) 131.
- A. A. Vinokurov, V. P. Zlomanov, M. Elsayed, R. Krause-Rehberg:
Defects in PbTe doped with telluride VTe₂: Positron spectroscopy study. Mater. Lett. **64** (2010) 661.
- A. Wagner, W. Anwand, M. Butterling, T. E. Cowan, F. Fiedler, F. Fritz, M. Kempe, R. Krause-Rehberg:
Positron-annihilation lifetime spectroscopy using electron bremsstrahlung. J. Phys. Conf. Ser. **618** (2015) 012042.

- M. Wahler, B. Büttner, H. H. Blaschek, N. Homonnay, O. Wid, K. J. O'Shea, D. McGrouther, D. A. MacLaren, G. Schmidt:
Controlling magnetic anisotropy in $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ nanostructures.
Appl. Phys. Lett. 104 (5) (2014) 052408. DOI 10.1063/1.4863978
- J. V. Wittemann, A. Kipke, E. Pippel, S. Senz, A. T. Vogel, J. de Boor, D. S. Kim, T. Hyeon, V. Schmidt:
Citrate-stabilized palladium nanoparticles as catalysts for sub-20 nm epitaxial silicon nanowires. Appl. Phys. Lett. 97 (2010) 023105.
- K.-B. Yeap, M. Kopycinska-Mueller, L. Chen, Y. Chen, M. Jungmann, R. Krause-Rehberg, S. Mahajan, J. Vlassak, M. Gall, E. Zschech:
The effect of the pore topology on the elastic modulus of organosilicate glasses.
J. Mater. Res. 28 (2013) 1262. DOI 10.1557/jmr.2013.79
- K. Yildiz, U. Akgul, H. S. Leipner, Y. Atici:
Electron microscopy study of thermoelectric n-type $\text{Bi}_2(\text{Te}_{0.9}\text{Se}_{0.1})_3$ film deposited by dc sputtering. Superlatt. Microstruct. 6 (2013) 60. DOI 10.1016/j.spmi.2013.02.013
- K. Yildiz, U. Akgul, H. S. Leipner, Y. Atici:
Microstructure of thermoelectric $(\text{Bi}_{0.15}\text{Sb}_{0.85})_2\text{Te}_3$ film.
Appl. Phys. A 117 (2014) 1387. DOI 10.1007/s00339-014-8560-7
- Y. Yu, D. Bejan, R. Krause-Rehberg:
Free volume investigation of imidazolium ionic liquids from positron lifetime spectroscopy.
Fluid Phase Equilibria 363 (2014) 48.
- Y. Yu, G. Dlubeck, R. Krause-Rehberg, M. Beiner, E. Hempel:
Phase transition in polymers containing long self-assembled CH_2 sequences in the side chain: A positron lifetime study. Mat. Sci. Forum 666 (2011) 71.
- Z. Zeng, X. Ma, J. Chen, D. Yang, I. Ratschinski, F. Hevroth, H. S. Leipner:
Effect of oxygen precipitates on dislocation motion in Czochralski silicon. J. Cryst. Growth 312 (2010) 169.
- M. Zhao, L. Li, C. Zhou, F. Heyroth, B. Fuhrmann, K. Maeder, T. Groth:
Improved stability and cell response by intrinsic cross-linking of multilayers from collagen I and oxidized glycosaminoglycans.
Biomacromolecules 15 (2014) 4272. DOI 10.1021/bm501286f
- D. Zvezhinskiy, M. Butterling, A. Wagner, R. Krause-Rehberg, S. V. Stepanov:
The evidence of quasi-free positronium state in GIPS-AMOC spectra of glycerol.
Acta Phys. Pol. A 125 (2014) 821.
- D. S. Zvezhinskiy, M. Butterling, A. Wagner, R. Krause-Rehberg, S. V. Stepanov:
Account of the intratrack radiolytic processes for interpretation of the AMOC spectrum of liquid water. J. Phys. Conf. Ser. 443 (2013) 012057. DOI 10.1088/1742-6596/443/1/012057

Qualifizierungsarbeiten am IZM 2010–2015

M. Albrecht:

Methoden zur Strukturierung von Mo-Elektroden mittels Laserinterferenz- und Nanoimprintlithographie. Bachelorarbeit (2013).

J.-S. Baudler: **Messungen zur Defektdichte an FeCr-Legierungen.** Bachelorarbeit (2011).

M. Below: **Untersuchung an neuartigen Kondensatoren zur Energiespeicherung von 0–3-Kompositen.** Bachelorarbeit (2012).

C. Bluhm: **Positronen-Lebensdauermessungen an Silikagelen.** Bachelorarbeit (2014).

T. Cudrig: **Defektstudien an photovoltaischen CIGS-Schichten mittels Positronenannihilation.** Bachelorarbeit (2014).

P. Das Kanungo: **On the doping of silicon nanowires grown by molecular beam epitaxy.** Dissertation (2010).

J. de Boor: **Fabrication and thermoelectric characterization of nanostructured silicon.** Dissertation (2011).

T. Burwig: **Justierung des Scansystems eines Rastertransmissionselektronenmikroskops.** Bachelorarbeit (2014).

L. Doege: **Thermoelektrische Eigenschaften von nc-Si in einer Aluminiumoxidmatrix.** Bachelorarbeit (2012).

M. Elsayed: **The appearance of vacancies during Cu and Zn diffusion in III–V compound semiconductors.** Dissertation (2011).

P.: **Untersuchung photovoltaischer Schichten mittels Positronenannihilation.** Masterarbeit (2015).

L. Fröhlich: **Untersuchung von Nanoporen in dielektrischen low-k Schichten.** Bachelorarbeit (2014).

N. Geyer: **Nanostrukturierung von Silizium durch metallinduziertes Nassätzen.** Dissertation (2011).

J. Haeberle: **Defektstudie an Fe–Cr-Legierungen.** Diplomarbeit (2012).

E. Hirschmann: **Konzept für einen digitalen Positronen-Lebensdauer-Messplatz auf der Basis von internationalen Forschungsergebnissen.** Bachelorarbeit (2014).

N. Hommonay: **Oberflächenplasmonenresonanz an planen und strukturierten Metalloberflächen.** Diplomarbeit (2010).

M. Jungmann: **Konzeption und Aufbau des Positronenstrahlsystems MePS, PAS-Messungen an porösen low- κ -Schichten.** Dissertation (2015).

C. Koppka: **Nasschemisches KOH-Ätzen von Si-Substraten.** Masterarbeit (2012).

S. Kretschmer: **Thermische Leitfähigkeit nanostrukturierter Dünnschichten.** Diplomarbeit (2011).

M. Muchow: **Defektuntersuchungen an CIGS-Schichten mit Hilfe der Positronenannihilation.** Masterarbeit (2012).

D. Oriwol: **Die Versetzungsstruktur von multikristallinem Silicium aus der industriellen VGF-Blockkristallisation.** Dissertation, Brandenburgische Technische Universität Cottbus (2014).

C. Pientschke: **Numerische Untersuchungen zur Verteilung von Feldgrößen in piezoelektrischen Fasern und inhomogenen Dielektrika.** Dissertation (2013).

A. Pohl: **Simulationen und erste Messungen am Positronenstrahlsystem EPOS.** Diplomarbeit (2010).

Ingmar Ratschinski: **Versetzungsaktivität und Rissbildung in Galliumarsenid und Galliumnitrid.** Dissertation (2015).

M. Schade: **Analytische Transmissionselektronenmikroskopie an polymorphen Siliziumnanostrukturen.** Dissertation (2013).

F. Süßkraut: **Positronenannihilation als Methode zur Charakterisierung von low-k Materialien.** Diplomarbeit (2010).

T. Teschner: **Untersuchung der Elektronenbeugung an nanokristallinen Strukturen mit der Rastertransmissionselektronenmikroskopie.** Bachelorarbeit (2012).

- M. Trutschel: **Thermoelektrische Eigenschaften von Si/Ge-Nanostrukturen**. Diplomarbeit (2010).
- H. Tzscheuschler: **Positronen-Lebensdauerspektroskopie von Schwefelsodalith**. Bachelorarbeit (2013).
- A. Wolfsteller: **Comparison of the top-down and bottom-up approach to fabricate axial nanowire-based silicon/germanium heterostructures**. Dissertation (2010).
- N. Wüst: **Untersuchung der Bewegung von Versetzungen in (0001) Galliumnitrid mittels Kathodolumineszenz**. Bachelorarbeit (2013).
- Y. Yu: **Positron annihilation lifetime spectroscopy: Studies of amorphous and crystalline molecular materials**. Dissertation (2011).
- E. M. Zollner: **Modifikation der optischen Eigenschaften von metallischen Nanopartikeln für photovoltaische Anwendungen**. Bachelorarbeit (2012).

Eingeladene Vorträge 2010–2015

- R. Krause-Rehberg: **Nano-scale porosimetry by means of positron annihilation**. Summer school IRTG 2012 „Advanced interconnects“ Zeuthen, 23.07.2012.
- R. Krause-Rehberg: **Probing defects in silicon with positrons**. University of Bristol 19.08.2012.
- R. Krause-Rehberg, M. Jungmann, W. Anwand, M. Butterling, A. Wagner, G. Staats, A. Müller, T. Cowan: **Begin of user operation at MePS in Rossendorf**. SLOPOS-13 conference, 20.09.2013 München.
- R. Krause-Rehberg, A. Wagner: **The EPOS System (ELBE Positron Source) at Helmholtz Centre Dresden-Rossendorf and first experiments at photovoltaic CIGS layers**. AIST and University of Tsukuba, September 2014.
- R. Krause-Rehberg, A. Wagner: **The EPOS System (ELBE Positron Source) at Helmholtz Centre Dresden-Rossendorf**. PSD-14, Kyoto, Japan, 14.–19.09.2014.
- H. S. Leipner: **Dislocations and point defects: Defect patterning**. 4th European conference on Crystal growth Glasgow, Juni 2012.
- H. S. Leipner: **Dislocation generation and dynamics**. 3. Photovoltaik-Klausurtagung, 18.03.2013 Radebeul.
- H. S. Leipner: **Dünnschichtmaterialien für thermoelektrische Anwendungen**. Eingeladener VDI-Vortrag am ISIS, Universität Bremen 21.04.2010.
- H. S. Leipner: **Ökologische stopa/Ökologischer Fußabdruck**. Workshop BTU Cottbus 04.07.2015.
- H. S. Leipner: **Energy storage**. 4th International summer university of Environmental sciences Halle, 03.09.2012.
- H. S. Leipner: **Energy storage with supercapacitors**. Vth International summer school of Environmental Sciences (ISU Eco 2013) 03.09.2013 Budapest–Halle.
- H. S. Leipner: **Erneuerbare Energien und Nanotechnologien**. Expertentreffen Neue Materialien Halle, 12.03.2012.
- H. S. Leipner: **Erneuerbare Energien und Werkstofftechnologien von morgen**. Akademikerforum Cottbus e. V., 16.10.2011.
- H. S. Leipner: **Experimental study of dislocation dynamics**. Spezialistentreffen Versetzungsdynamik, 30.04.2013, CSP Halle.
- H. S. Leipner: **Interaction of point defects with dislocations**. Workshop on Dislocations in multicrystalline silicon Freiberg, 27.–28.03.2012.
- H. S. Leipner: **Materials for renewable energy**. Meeting: The German energy transition: Smart Solutions & Market Potential in Saxony-Anhalt, 01.10.2013 Halle.
- H. S. Leipner: **Nanostrukturierung und erneuerbare Energien**. IHP Frankfurt (Oder), 14.06.2011.

- H. S. Leipner: **Neue Superkondensatoren für die Energiespeicherung**. 18th VDI symposium „Die Energiewende stirbt ohne geeignete Speichersysteme“, 21.11.2013 Gardelegen.
- H. S. Leipner: **New developments in the field of energy storage**. REGEN-Seminar, 06.05.2013 BTU Cottbus.
- H. S. Leipner: **Silicon-based thermoelectric thin films and devices**. 4th Sino–German symposium „The silicon age“. Berlin 18.–23.09.2012.
- H. S. Leipner: **Smarte Energienutzung**. BTU Cottbus, 2014-05-17.
- H. S. Leipner: **Speicherforschung mit Superkondensatoren**. Dialogforum „Speichermöglichkeiten schaffen“, 08.05.2013 IFF Magdeburg.
- H. S. Leipner: **Thermoelektrik mit siliciumbasierten Dünnschichten**. Statusseminar Thermopower Frankfurt/Main 16.–17.10.2012.
- H. S. Leipner, K. Bertram: **Thermoelectric characterization of Si–Ge superlattices**. IFW Dresden, 01.02.2011.
- H. S. Leipner, K. Bertram, M. Trutschel, B. Fuhrmann, A. Tonkikh, P. Werner: **Thermoelectricity of silicon nanostructures**. 5th Sino–German meeting „The silicon age“. September 2015 Hangzhou.
- H. S. Leipner, I. Ratschinski: **Motion of dislocations at indentations in GaN**. GaN-Workshop Charakterisierung, Weigmansdorf 01.–02.07.2015.
- H. S. Leipner, P. Werner, N. Geyer, K. Bertram, M. Trutschel, B. Fuhrmann, A. Tonkikh: **Nanostructured silicon for thermoelectric applications**. 1st International conference on Emerging advanced nanomaterials Brisbane, 22.–25. Oktober 2012.
- D. Oriwol, H. S. Leipner, A. N. Danilewsky, L. Sylla, W. Seifert, M. Kittler, J. Bauer: **Formation of dislocation pile ups and subgrain boundaries in multicrystalline silicon**. 12th International workshop on Beam injection assessment of microstructures in semiconductors, Tsukuba, Japan, June 2014.

Mitveranstalter von Tagungen 2010–2015

- Frühjahrstagung des Fachverbandes Mikrosonden „Microscopy and microanalysis“ zur 75. DPG-Frühjahrstagung, Dresden 13.–18.03.2010. Organisatoren H. S. Leipner, E. Langer.
- 10th International workshop on Beam injection assessment of microstructures in semiconductors (BIAMS 2010) Halle 04.07.2010–08.07.2010. Chairmen O. Breitenstein, H. S. Leipner.
- Innovationsworkshop „Energiespeicherung und deren zukünftige Anwendungen“ Halle 18.01.2010–19.01.2010. Veranstalter H. Beige, H. S. Leipner, S. Ebbinghaus.
- Frühjahrstagung des Fachverbandes Mikrosonden „Microscopy and microanalysis“ zur 76. DPG-Frühjahrstagung, Berlin 13.–15.03.2011. Organisatoren H. S. Leipner, E. Langer.
2. Innovationsworkshop „Energiespeicherung und deren zukünftige Anwendungen“, Halle 23.–24.05.2011. Organisator: H. S. Leipner, A. Buchsteiner.
- Frühjahrstagung des Fachverbandes Mikrosonden „Microscopy and microanalysis“ zur 77. DPG-Frühjahrstagung Dresden, März 2012. Organisatoren H. S. Leipner, E. Langer.
3. Innovationsworkshop Energiespeicher und deren zukünftige Applikationen: Physikalische Speichertechnologien Wittenberg, 04.–05.06.2012. Organisatoren: H. S. Leipner, A. Buchsteiner.
- Tagung des Fachverbandes MI: Mikrosonden+Mikroskopie zur 78. DPG-Frühjahrstagung Regensburg, März 2013. Organisatoren H. S. Leipner, E. Langer.
- 13th International workshop on Slow positron beam techniques and applications (SLOPOS-13). 15.–20.09.2013 München. Mitglied des International Advisory Committees: R. Krause-Rehberg.

Tagung des Fachverbandes MI: Mikrosonden+Mikroskopie zur DPG-Frühjahrstagung der Sektion Kondensierte Materie, 30.03.2014. Organisatoren E. Langer, H. S. Leipner.

International workshop on Positron studies of defects 2014 (PSD-14) 14.–19.09.2014 Kyoto, Japan. Mitglied des International Advisory Committees: R. Krause-Rehberg.

18. Arbeitstagung Angewandte Oberflächenanalytik, 29.09.–01.10.2014 Kaiserslautern. Mitglied des wissenschaftlichen Komitees H. S. Leipner.

12th International Workshop on Beam Injection Assessment of Microstructures in Semiconductors (BIAMS XII) Tsukuba/Japan, 22.–26.06.2014. Mitglied des International Advisory Committees: H. S. Leipner.

Tagung des Fachverbandes MI: Mikrosonden+Mikroskopie zur DPG-Frühjahrstagung der Sektion Kondensierte Materie, 16.–20.03.2015. Organisatoren E. Langer, H. S. Leipner.

Methods of porosimetry and applications. HZDR Dresden-Rossendorf 21.–23.10.2015. Koorganisator R. Krause-Rehberg.

5th Sino–German symposium „The silicon age“ Hangzhou (China) 30.09.–05.10.2015. Organisatoren: D. Yang, H. S. Leipner.

