

## Virtuelle Öfen als Werkzeug zur Prozessoptimierung

**Wie die Ausbeute und die Materialqualität bei der Herstellung von multikristallinen Silicium-Wafern für die Photovoltaik durch den Einsatz von Computersimulation und Laborversuchsanlagen gesteigert werden können, zeigen Forscher des Fraunhofer IISB und des Fraunhofer THM.**

Die Photovoltaik ist einer der wenigen Wirtschaftszweige, in dem seit Jahren ein dynamisches Wachstum mit Schaffung neuer Arbeitsplätze stattfindet. Gleichzeitig ist sie langfristig gesehen eine der besten Antworten auf Treibhauseffekt und Klimawandel – eine der größten Bedrohungen für die Menschheit. Gemäß verschiedenen Marktstudien wird sich das rasante Wachstum in der Photovoltaik trotz der heutigen Wirtschaftskrise auch in den nächsten Jahren fortsetzen.

Mehr als 90 % der Absorbermaterialien, die Sonnenenergie in elektrische Energie umwandeln, bestehen aus dem Halbleitermaterial Silicium. Verfahren der gerichteten Erstarrung sind eine dominierende Technologie für die Herstellung von multikristallinem Silicium für die Anwendung als Solarzellengrundmaterial. Durch einen Schmelz- und Kristallisationsprozess werden aus dem granularen Siliciumausgangsmaterial Siliciumblöcke gefertigt. Nach dem Vereinzeln in Siliciumquader können daraus anschließend einzelne Siliciumscheiben („Wafer“) gesägt werden. Die Qualität der Silicium-Wafer wird in großem Maße durch die während der Kristallisation und der Abkühlung auftretenden Wärme- und Stofftransportprozesse beeinflusst. Neben der Prozessoptimierung zur Verbesserung der Materialqualität rücken auch zunehmend kostensenkende Maßnahmen bei vergleichbarem Zellwirkungsgrad in den Fokus. Der Einsatz von kostengünstigem Siliciumrohstoff sowie ein größerer Siliciumdurchsatz pro Zeiteinheit eines Kristallzüchtungsversuchs sind dabei zwei Entwicklungsziele.

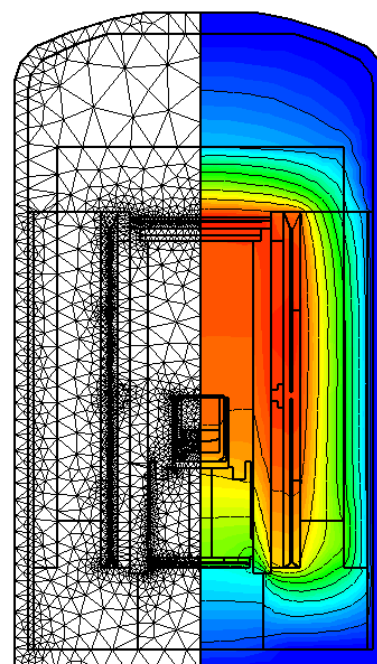
Die Eigenschaften des multikristallinen Siliciums wie die Lebensdauer der Minoritätsladungsträger bzw. deren Diffusionslängen, die letztendlich den Zellwirkungsgrad bestimmen, resultieren aus dem Zusammenspiel von strukturellen Defekten (Versetzungen, Korngrenzen) innerhalb des Siliciumkristalls und auftretenden Verunreinigungen durch Kohlenstoff, Stickstoff, Sauerstoff und Metallen während des Kristallzüchtungsprozesses. Die Optimierung des Kristallzüchtungsprozesses im Hinblick auf eine größere Waferausbeute ist ein aktueller Forschungsschwerpunkt am IISB gemeinsam mit dem Technologiezentrum für Halbleitermaterialien THM. Eine Laborversuchsanlage dient dazu, im Labormaßstab die Kristallisations-

bedingungen in industriellen Öfen nachzubilden, so dass es möglich ist, relativ einfach einzelne Prozessparameter zu variieren und deren Einfluss auf die Materialqualität zu untersuchen.

Mit Hilfe der selbstentwickelten und weltweit eingesetzten Simulationssoftware CrysMAS ist es möglich, die Wärme- und Stofftransportprozesse der Laborversuchsanlage in Form eines „virtuellen Ofens“ am Computer zu beschreiben. Neben der Berechnung der Schmelzströmung steht die Berechnung des Stofftransports im Vordergrund. Es konnte gezeigt werden, dass die Schmelzkonvektion für die Verteilung von Kohlenstoff-, Stickstoff- und Sauerstoffverunreinigungen in multikristallinem Silicium verantwortlich ist und dass deren Verteilungen quantitativ vorhergesagt werden können. Forscher haben am IISB und THM in Zusammenarbeit mit einem weltweit führenden Hersteller von Silicium-Wafern für die Photovoltaik so einen typischen industriellen Kristallzüchtungsprozess nachgebildet.

Den Wissenschaftlern ist es gelungen, Prozessbedingungen für die Herstellung von multikristallinen Silicium-Wafern zu entwickeln, die zu einer signifikanten Ausbeutesteigerung beim Industriepartner beigetragen haben.

Kontakt: Dr. Jochen Friedrich, [jochen.friedrich@iisb.fraunhofer.de](mailto:jochen.friedrich@iisb.fraunhofer.de)



„Virtueller Ofen“:  
mittels CrysMas  
berechnetes Temperaturfeld der Laborversuchsanlage

## Dr.LiTHO: Simulationswerkzeug für die Mikro- und Nanolithographie

Mit Dr.LiTHO wurde am IISB eine umfassende Simulationsumgebung für die Mikro- und Nanolithographie entwickelt. Aufgrund ihrer flexiblen Architektur ist die Software besonders geeignet für Anwender aus dem Bereich Forschung und Entwicklung.

Dr.LiTHO besteht aus Modellen und Algorithmen zur Simulation, Auswertung, Visualisierung und Optimierung von Projektions- und EUV-Lithographieprozessen. Mit Hilfe der zur Verfügung stehenden Modelle können fortschrittliche Beleuchtungssysteme, das Beugungsverhalten an der Photomaske, die Bilderzeugung in trockenen und immersionsbasierten Projektionsverfahren, die Interaktion von Licht und Photolack und chemische Lackprozesse beschrieben und simuliert werden. Zahlreiche Module unterstützen den Benutzer bei der Bewertung der berechneten Bilder und Photolackprofile, um so beispielsweise Prozessvariationen zu untersuchen. Das flexible Skriptsprachenkonzept von Dr.LiTHO ermöglicht das Erstellen komplexer Simulationsabläufe sowie die Anbindung anderer Softwarepakete, wie die am IISB entwickelten fortschrittlichen Optimierungswerkzeuge oder Module anderer Anbieter.

Obwohl die Simulation fortschrittlicher Projektionslithographieverfahren für die Halbleiterindustrie das Haupteinsatzgebiet von Dr.LiTHO bildet, stehen etliche Zusatzmodule zur Simulation alternativer Belichtungsmethoden und für Anwendungen aus der Mikro- und Nanostrukturierung zur Verfügung. Die offene Architektur erlaubt zudem die Erweiterung und Anpassung von Dr.LiTHO an benutzerdefinierte Anwendungen. Nicht zuletzt deshalb stellt Dr.LiTHO eine ideale Plattform für die Entwicklung und das Testen neuer Modelle dar.

### Module

Neben fortschrittlichen Modellen für die skalare oder vektorielle Luftbildberechnung umfasst Dr.LiTHO alternative Löser für die exakte Bestimmung elektromagnetischer Felder im Nahfeld der Photomaske oder für Wafertopographieeffekte, z.B. für aktuelle Doppelbelichtungstechniken. Zur Beschreibung der chemischen Prozesse im Photolack stehen sowohl kontinuierliche als auch mesoskopische Modelle sowie verschiedene Entwicklungs- und Ausheizmodelle zur Verfügung. Neben zahlreichen Auswerte- und Visualisierungsmodulen verfügt Dr.LiTHO auch über Schnittstellen zu Modellen und Lösern anderer Anbieter, z.B. für Nahfeld- oder interferometrische Belichtungsansätze.

### Bedienung

Dr.LiTHO ist für Windows und verschiedene Linux-Betriebssysteme verfügbar. Um ein hohes Maß an Flexibilität zu gewährleisten, verwendet Dr.LiTHO die Skriptsprache Python. Zur Bedienung sind allerdings keine großen Programmierkenntnisse erforderlich. Standardaufgaben lassen sich mit wenigen Parametereingaben erledigen. Für komplexere, benutzerdefinierte Abläufe werden zahlreiche Tutorials, Beispiele und Skriptbibliotheken mitgeliefert.

Kontakt: Dipl.-Inf. Tim Fühner, Dr. Andreas Erdmann  
dr.litho@iisb.fraunhofer.de



## „More Moore“ und mehr

Die „International Technology Roadmap for Semiconductors“ ITRS ist das wichtigste industrielle Strategiepapier für die auf dem Gebiet der Halbleitertechnologie erforderliche Forschung. Was sind die grundlegenden Änderungen in ihrer nunmehr zehnjährigen Geschichte?

Im Juli 1998 wurden die vorher auf die USA begrenzten Aktivitäten der damaligen „National Technology Roadmap for Semiconductors“ durch Einbeziehung von Europa, Japan, Korea und Taiwan weltweit erweitert. Der Verbund Mikroelektronik der FhG arbeitet vertreten durch das IISB und das IZM seit 2000 an der ITRS mit. Vertreter des IISB koordinieren als erste Wissenschaftler von außerhalb der USA seit 2002 mit „Modeling and Simulation“ sowie seit 2004 mit „Yield Enhancement“ Untergruppen („International Technology Working Groups“) der ITRS.

### Skalierung – More Moore

Ursprünglich konzentrierte sich die ITRS auf die Vorhersage der weiteren Skalierung von Halbleiterbauelementen für die jeweils nächsten 15 Jahre und der dabei zu erwartenden Bauelementeeigenschaften („More Moore“). Hieraus leitete sie ab, welche Forschungsergebnisse in den verschiedenen Bereichen, vom Design über u.a. die Frontend-Technologien bis hin zur Ausbeuteerhöhung benötigt werden. Die auch hierdurch geförderte internationale Zusammenarbeit und der Wettbewerb zwischen den Halbleiterfirmen führten dazu, dass sich über Jahre hinweg der Abstand zwischen Technologieknoten, der jeweils für eine Verdopplung der Anzahl der Transistoren pro Fläche stand, von drei auf zwei Jahre verkürzte.

Die neuere Entwicklung in der ITRS ist vor allem von zwei Faktoren bestimmt: Zum einen nähern sich bisher verwendete Technologien teilweise physikalischen Grenzen. Beispielsweise ist eine weitere Verringerung der Gateoxiddicke (unter einem Nanometer – nur wenige Atomlagen) nicht mehr möglich. Dieses Problem wird in der Halbleitertechnologie und damit auch in der ITRS durch die Verwendung neuer Bauelementarchitekturen und neuer Materialien gelöst, z.B. von Gatedielektrika mit höherer Dielektrizitätskonstante als Siliciumdioxid. Hierfür wurde in der ITRS der Begriff des „Equivalent Scaling“ eingeführt. Im Ergebnis wird die Entwicklung der Bauelemente hin zu höherer Funktionalität und geringerem Preis pro Funktion auch für die nächsten 15 Jahre ermöglicht.

### Diversifizierung – More than Moore

Der zweite Trend ist die Erweiterung der ITRS über die traditionelle Skalierung von Speicher- und Logikbauelementen hinaus. Die in „More Moore“ für Speicher und Prozessoren entwickelten Technologien werden in einem zweiten Schritt für andere Produkte und Anwendungsfelder nutzbar gemacht, wie Hochfrequenz, Automotive, Leistungselektronik oder Sensoren und Aktoren („More than Moore“). Einerseits sind dies vielfach in viel stärkerem Ausmaß als Speicher und Prozessoren Schlüsselkomponenten für die deutsche Wirtschaft – z.B. ist die Verwendung maßgeschneiderter elektronischer Systeme ein unverzichtbarer Wettbewerbsvorteil für die deutsche Automobilindustrie. Andererseits ist die Entwicklung von „More than Moore“-Technologien ohne profunde Kenntnisse und Fähigkeiten in „More Moore“ nicht möglich. Die weitere Forschung an Halbleitertechnologien für die Höchstintegration hat also eine volkswirtschaftliche Bedeutung, die weit über das zurzeit problematische Speichergeschäft hinausreicht.

Kontakt: Dr. Jürgen Lorenz, juergen.lorenz@iisb.fraunhofer.de

# Siliciumcarbid-Leistungsbaulemente auf dem Vormarsch

**Durch den Einsatz von effizienten elektronischen Bauelementen aus Siliciumcarbid (SiC) besteht im Bereich der Steuerung und Umformung elektrischer Energie ein erhebliches Potential der Energieeinsparung. Seit 2001 werden deshalb Schottkydioden erfolgreich in High-End-Netzteilen eingesetzt. Dagegen ist die Kommerzialisierung bipolarer Hochvolt-Schaltelemente auf Grund von Stabilitätsproblemen, welche auf Kristalldefekte zurückgeführt werden, bislang schwierig. Ein Forschungsprojekt unter Beteiligung des IISB nimmt sich dieser Herausforderung an.**

Ziel des Projekts KoSiC ist es unter anderem, die Wechselwirkung zwischen Defekten in der Kristallstruktur und Eigenschaften von bipolaren SiC-Bauelementen zu untersuchen, dadurch ihre Langzeitstabilität zu verbessern und ihre Kommerzialisierung zu ermöglichen.

Die Projektpartner SiCrystal, SiCED Electronics Development, Infineon Technologies, der Lehrstuhl für Angewandte Physik der Universität Erlangen-Nürnberg und das IISB arbeiten im Rahmen von KoSiC eng zusammen. Gemeinsam decken die Partner alle Stufen der Wertschöpfungskette bei der Herstellung elektronischer Bauelemente auf so genanntem 4H-SiC ab. Angefangen bei der Kristallzüchtung über die Herstellung epitaktischer Schichten und verschiedener Bauelementtypen, wie z.B. unipolarer Schottkydioden oder bipolarer Dioden, bis hin zu Applikationstests reichen die Beiträge der Projektpartner.

Die Kristallqualität und Scheibengröße von 4H-SiC konnten durch umfangreiche Entwicklungstätigkeiten in den vergangenen Jahren nachhaltig verbessert werden. Zum einen konnten die so genannten Mikroröhren (micropipes), eine besonders schädliche Art von Kristallbaufehlern, vollständig vermieden werden, zum anderen sind seit 2007 100-mm-Scheiben kommerziell erhältlich. Beide Errungenschaften steigern die Bauelementausbeute und damit die Attraktivität des Halbleitermaterials 4H-SiC.

Die Gesamtdichte anderer Kristalldefekte, so genannter Versetzungen liegt bei 4H-SiC-Wafern aber immer noch typischerweise in der Größenordnung von  $10^4 \text{ cm}^{-2}$ . Hier wird zwischen *Threading Dislocations* und Basalflächen-Versetzungen (BPDs) unterschieden, welche sich durch ihre Lage im Kristall und ihre Eigenschaften unterscheiden.

In Hinblick auf die seit 2001 verfügbaren unipolaren Dioden werden beide Versetzungstypen als unproblematisch erachtet. Die unipolaren Bauelemente sind langzeitstabil.

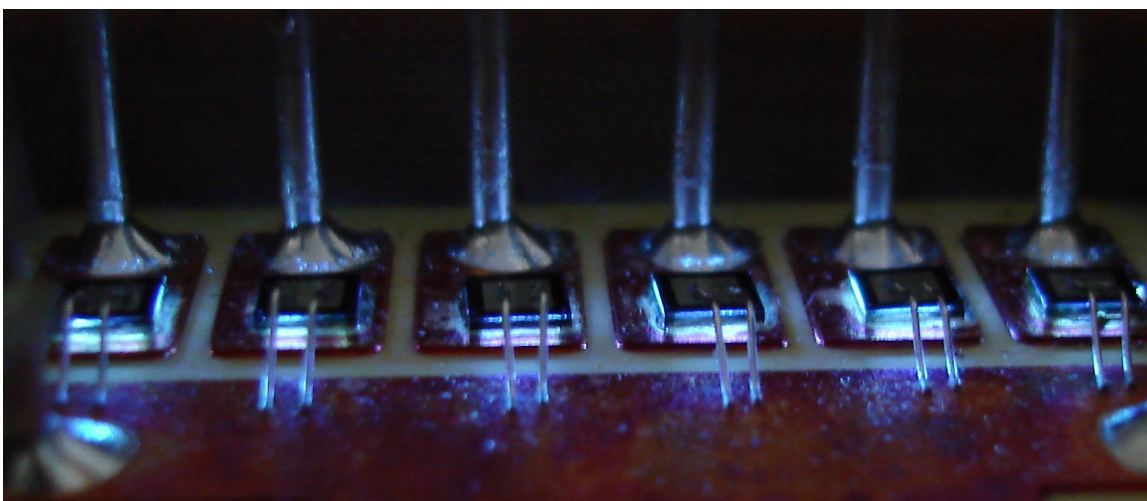
Hinsichtlich der Kommerzialisierung bipolarer Dioden für Sperrspannungen größer als 2000 V gelten jedoch speziell die Basalflächenversetzungen als kritische Defekte, da diese während des Bauelementbetriebs als Ausgangspunkt für ausgedehnte Materialschäden fungieren und die Bauelementfunktionalität herabsetzen können – bis hin zum Versagen des bipolareren Bauelements.

Die Basalflächenversetzungen spielen folglich im Forschungsprojekt und für die Kommerzialisierung der 4H-SiC-Bauelemente eine zentrale Rolle. Sie entstehen bereits bei der Kristallzüchtung und liegen in der Scheibe vor. Es gilt, bei der anschließenden Bauelementprozessierung die BPDs von den kritischen Bereichen des Bauelements fernzuhalten. Mittels Synchrotron-Weißlicht-Röntgentopographie (SXRT) an der Ängströmquelle Karlsruhe (ANKA) konnte nachgewiesen werden, dass die BPDs aus dem Substrat unter günstigen Bedingungen während der anschließenden Bauelement-Epitaxie in andere Versetzungen umgewandelt werden, welche die Langzeitstabilität bipolarer Bauelemente nicht beeinflussen. Die vollständige Umwandlung aller BPDs bei der Epitaxie wird deshalb angestrebt. Durch gezielte Parametervariationen bei der Epitaxie der Bauelement-Schichten konnte erreicht werden, dass eine BPD-Umwandlungsquote größer als 99 % und folglich BPD-Dichten kleiner als  $3/\text{cm}^2$  in den Epitaxieschichten erzielt werden können. Diese hervorragenden Werte bieten die besten Voraussetzungen für die Herstellung langzeitstabiler bipolarer Bauelemente. Ein entsprechendes Patentverfahren ist im Gange.

Im Moment läuft die Herstellung von Bipolardioden auf ausgewählten Scheiben und Epitaxieschichten mit speziellem Defekthaushalt. Damit soll die Langzeitstabilität der nahezu BPD-freien Bipolardioden überprüft werden. Es ist zu erwarten, dass die Erfolge des KoSiC-Projekts einen wichtigen Schritt bei der Kommerzialisierung dieser neuen Technologie darstellen werden.

Das KoSiC-Projekt wird von der Bayerischen Forschungsförderung (AZ-720-06) finanziell gefördert.

Kontakt: Dipl.-Ing. Birgit Kallinger, [birgit.kallinger@iisb.fraunhofer.de](mailto:birgit.kallinger@iisb.fraunhofer.de)



Bipolardioden im Vorwärtsbetrieb während elektrischer Messungen (Foto: SiCED)



## Mit Mikrotechnologie in die Erfolgsspur

**Linda Martin, ehemalige Auszubildende am IISB, wurde von der IHK Nürnberg für Mittelfranken als beste Auszubildende im Beruf „Mikrotechnologie/in“ des Prüfungsjahrgangs 2007/2008 geehrt.**

Die Jahrgangsbesten unter den Auszubildenden standen bei einer Feierstunde in der IHK Akademie Mittelfranken am 11. November 2008 im Mittelpunkt. IHK-Präsident Prof. Klaus L. Wübbenhorst zeichnete zusammen mit der Landtagsabgeordneten Helga Schmitt-Bussinger 141 junge Kaufleute und Facharbeiter aus, die in ihren Ausbildungsberufen Spitzenleistungen erzielt hatten. Insgesamt hatten 9035 Prüflinge an den IHK-Abschlussprüfungen im Winter 2007/2008 und im Sommer 2008 teilgenommen.

Das IISB bildet seit 1999 äußerst erfolgreich und in enger Zusammenarbeit mit der Universität Erlangen-Nürnberg Mikrotechnologen aus. Dabei ist rund die Hälfte der Auszubildenden am IISB weiblich.

Linda Martin arbeitet indes weiter erfolgreich an ihrer Karriere: Mittlerweile studiert sie Elektrotechnik an der Fachhochschule Nürnberg und ist dabei dem IISB in Form einer Hiwi-Tätigkeit auf dem Gebiet der leistungselektronischen Systeme weiter verbunden.



*IHK-Präsident Prof. Klaus L. Wübbenhorst, Linda Martin und Mdl Helga Schmitt-Bussinger (v.l.) bei der Auszeichnung der Prüfungsbesten (Foto: IHK Nürnberg für Mittelfranken / Kurt Fuchs)*

*Kontakt: Dr. Bernd Fischer, bernd.fischer@iisb.fraunhofer.de*

## Ingenieure gestalten Zukunft

**Das IISB im Dialog mit Jugendlichen auf der „realize your visions 2009“.**

In den Zeiten eines beschleunigten technologischen Wandels gewinnt die ingenieurwissenschaftliche Nachwuchsförderung immer mehr an Bedeutung. Unter dem Motto „realize your visions – Ingenieure gestalten Zukunft“ hatte der Förderkreis für das Ingenieurstudium e.V. am 11. Februar 2009 zu einer Informationsmesse im Flughafen Nürnberg eingeladen. Die Veranstaltung richtete sich an Schüler oberer Klassenstufen, Eltern und Lehrer und fand bereits zum 10. Mal statt. Regionale Aussteller aus Industrie, Hochschullehre sowie Forschung und Entwicklung zeigten an ihren Messeständen und in ver-

schiedenen Fachvorträgen ein breit gefächertes Informationsangebot zum Ingenieurberuf und spendeten Gewinne für ein Preisausschreiben.

Das IISB präsentierte sich dem Publikum als attraktive Forschungseinrichtung mit vielseitigen Betätigungsfeldern im Bereich der Halbleitertechnologie, der Leistungselektronik und der Mechatronik. In zahlreichen Gesprächen mit den zukünftigen Studierenden nutzten Mitarbeiter des IISB und des Lehrstuhls für Elektronische Bauelemente der Universität Erlangen-Nürnberg die Gelegenheit, die ausgezeichneten Perspektiven eines ingenieurwissenschaftlichen Studiums hervorzuheben und über die interessanten Möglichkeiten einer studentischen oder beruflichen Tätigkeit in der anwendungsnahen Forschung aus eigener Erfahrung zu berichten. Bei der abschließenden Bekanntgabe der Gewinner des Preisausschreibens trat das IISB mit einem der Hauptpreise – einer Institutsführung mit Labor- und Reinraumbesichtigung für eine Schulklasse mit Klassenlehrer – in Erscheinung. Insgesamt stimmen das rege Interesse und die positive Resonanz seitens der Schüler zuversichtlich, auch in den kommenden Jahren qualifizierten wissenschaftlichen Nachwuchs zu gewinnen.



*Moderatorin Franziska Niedermeier von Hitradio N1 überreicht die Urkunde mit einer Einladung zur Institutsbesichtigung am IISB an Lehrer Gerhard Spörlein vom Clavius-Gymnasium in Bamberg*

*Kontakt: Thomas Richter, M.A., thomas.richter@iisb.fraunhofer.de*

## Weitere Informationen

Fraunhofer IISB  
Schottkystraße 10  
91058 Erlangen  
Telefon 09131 761-0, Fax -390  
info@iisb.fraunhofer.de  
www.iisb.fraunhofer.de

## Impressum

Herausgeber:  
Fraunhofer-Institut für Integrierte Systeme  
und Bauelementetechnologie (IISB)  
Schottkystraße 10, 91058 Erlangen

Redaktion:  
Dr. Eberhard Bär  
eberhard.baer@iisb.fraunhofer.de  
Prof. Dr. Lothar Frey  
lothar.frey@iisb.fraunhofer.de