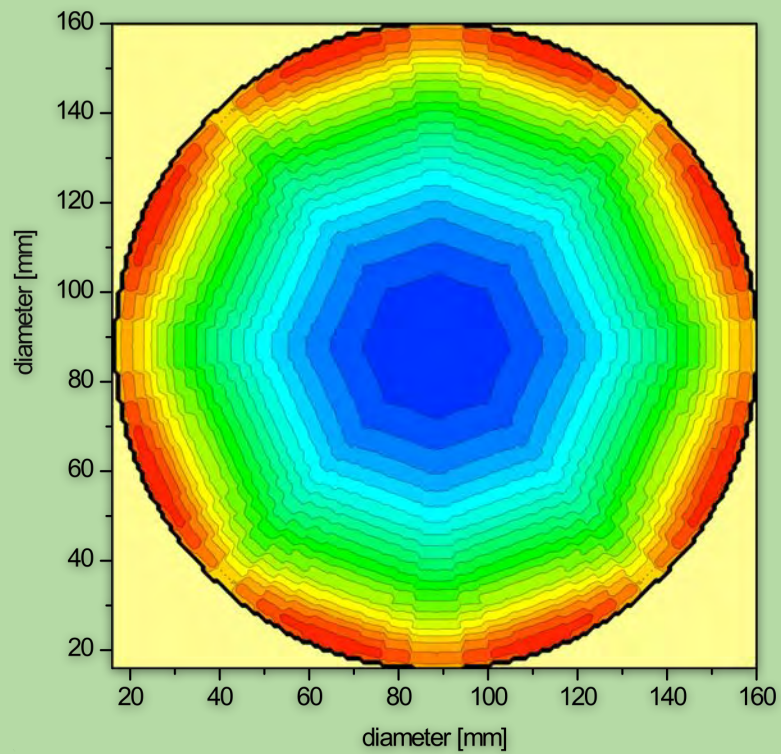


ISSN 2193-3758

Mitteilungsblatt
Nr. 95 / 2012



Deutsche Gesellschaft
für Kristallwachstum und
Kristallzüchtung e.V.

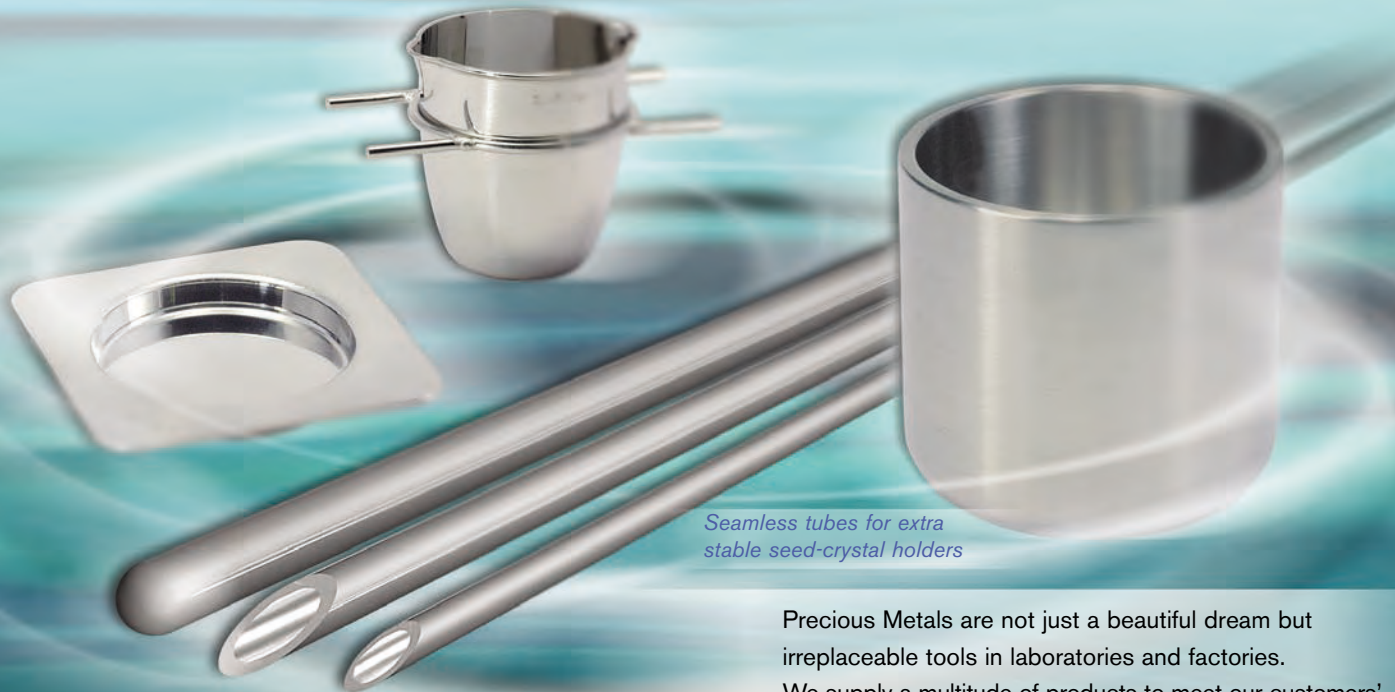


Inhaltsverzeichnis

Der Vorsitzende / Editorial	3
DGKK-intern	5
DGKK-Personen	12
DGKK-Nachrichten	12
DGKK-Fokus	35
DGKK-Forschung	29
DGKK-Nachwuchs	33
Über die DGKK	40
Tagungskalender	41

Heraeus

More than exciting dreams – Precious Metals



*Seamless tubes for extra
stable seed-crystal holders*

Precious Metals are not just a beautiful dream but irreplaceable tools in laboratories and factories. We supply a multitude of products to meet our customers' requirements – seamless tubes in all dimensions, coiled tubes, thermocouple thimbles and tailor-made parts.



**Heraeus: 150 years of
precious metals expertise.**

W. C. Heraeus GmbH & Co. KG

Engineered Materials Division

Business Unit Precious Metals Technology

Heraeusstr. 12 – 14

63450 Hanau, Germany

Phone + 49 (0) 61 81 / 35 - 37 40

Fax + 49 (0) 61 81 / 35 - 86 20

E-mail: precious-metals-technology@heraeus.com

www.wc-heraeus.com/precious-metals-technology

W. C. Heraeus

Der Vorsitzende

Liebe Kolleginnen und Kollegen,

ein ereignisreiches Jahr 2012 neigt sich dem Ende entgegen. Deshalb ist es an dieser Stelle ein guter Augenblick nochmals kurz innezuhalten, um das vergangene Jahr zu resümieren.

Im Zuge der globalen Ereignisse sind im industriellen Umfeld der Kristallzüchtung heftige Stürme aufgezogen. Einzelne Wirbelstürme haben leider dazu geführt, dass im Bereich der Photovoltaik einige deutsche Firmen Schlagseite bekamen. Einige sind bereits wieder auf Kurs gekommen, aber andere auch gekentert. Wir wünschen den betroffenen Kolleginnen und Kollegen alles Gute, damit sie die sich ändernden Lebensumstände meistern werden.

Die heraufziehenden Stürme haben jedoch mittlerweile nicht nur die Photovoltaik, sondern weite Teile der deutschen Wirtschaft erreicht. Dies kann man fast jeden Tag in der Zeitung lesen bzw. ergibt sich aus den diversen persönlichen Gesprächen. Wir müssen uns deshalb auf eine schwierigere, gesamtwirtschaftliche Situation einstellen. Deswegen ist es umso erfreulicher, dass die öffentlichen Förderinstitutionen in den Ländern, im Bund und in der EU gerade jetzt Material- und Technologieentwicklungsthemen explizit in den Fokus ihrer aktuellen Förderprogramme, speziell aus dem Energiebereich, eingestellt haben. Dies sind günstige Rahmenbedingungen sowohl für die Industrie, aber auch für deren Partner aus der Forschung, sich durch Material-, Technologie- und Produktinnovationen für die Zeiten nach dem „Down Turn“ vorzubereiten.

Für die Zukunft gut aufgestellt hat sich die DGKK im Jahr 2012. So wurde – wie bereits berichtet – auf der letzten Mitgliederversammlung die neue Satzung verabschiedet, die in der Zwischenzeit durch den Notar auch im Vereinsregister hinterlegt wurde. Ich darf an dieser Stelle auf die nächste Mitgliederversammlung am 6. März 2013 hinweisen, bei der wir einerseits einen neuen Vorstand wählen, zum anderen auch einen Vorschlag für Firmenmitgliedschaften diskutieren und verabschieden wollen. Satzungsgemäß müssen aus dem Vorstand Peter Rudolph, Peter Gille, Bernhard Freudenberg und Klaus Dupré ausscheiden. Der Vorstand wird auf der Mitgliederversammlung für die Periode 2014 bis 2015 ein schlagkräftiges und aktives Team vorschlagen, welches die verschiedenen Belange der DGKK ausgewogen repräsentieren sollte. Wir würden uns freuen, wenn Sie auf der Mitgliederversammlung unseren Vorschlag unterstützen würden. Trotz der trüben Konjunkturaussichten gab es im Jahr 2012 auch einiges zu feiern. Insbesondere darf ich im Namen aller Mitglieder Dr. Thilo Flade nachträglich ganz, ganz herzlich zum 70. Geburtstag gratulieren. Die besten Glückwünsche gehen außerdem ans Leibniz-Institut für Kristallzüchtung in Berlin, das im

März sein 20-jähriges Bestehen feierte, sowie ans Fraunhofer-Technologiezentrum für Halbleitermaterialien in Freiberg, das im März 2012 sein neues Kristallisations- und Wafertechnikum eröffnete.

Im Jahr 2012 fanden unter der Beteiligung der DGKK viele interessante Veranstaltungen rund um die Kristallzüchtung statt. Ich möchte an dieser Stelle die DGKK-Arbeitskreistreffen, die DKT2012 in Freiberg, die ECCG4 in Glasgow, die Sommerschule in Braşov, aber auch die IWMCG7 in Taipei erwähnen. Herzlichen Dank an alle Organisatoren. Ich würde mich sehr freuen, wenn Sie auch nächstes Jahr die verschiedenen DGKK-Veranstaltungen besuchen, insbesondere darf ich Sie herzlich zur DKT2013 vom 6. bis 8. März nach Erlangen einladen. Auf der DKT2013 wollen wir auch wieder die DGKK-Preise verleihen, und ich bitte Sie deshalb rechtzeitig Vorschläge einzureichen. Auf der DKT2013 wird auch die Initiative der jDGKK verstetigt, die sich im Vorfeld zu einem Austausch mit Vorträgen und Vorlesungen trifft. Die jungen Kristallzüchter haben nächstes Jahr außerdem die Möglichkeit, sich bei der International Summer School on Crystal Growth in Danzig vom 4. bis 10. August aus- und weiterzubilden. Ich möchte die Führungskräfte der jungen Kollegen ermuntern, entsprechende Anfragen wohlwollend zu unterstützen.

Im Jahr 2012 hat sich die DGKK auch verstärkt in die Vorbereitung der International Conference on Crystal Growth vom 11. bis 16. August 2013 in Warschau eingebracht. Unsere Empfehlungen und Vorschläge wurden bei der Auswahl der Themen und eingeladenen Redner angemessen berücksichtigt. Die relativ hohe Anzahl der eingeladenen Redner aus Deutschland mag dabei als ein Beleg für die herausragende Qualität der Forschungsarbeiten auf den verschiedenen Facetten der Kristallzüchtung in Deutschland sein. Ich hoffe, dass Sie zahlreich an der Konferenz teilnehmen werden.

All die genannten Veranstaltungen erreichen Sie nun bequem über unsere neu gestaltete Homepage, die seit kurzem on-line ist. Sie ist nicht nur in einem modernen Design gestaltet, sondern beeindruckt vor allen Dingen durch die vielen neuen und aktuellen Inhalte. Herzlichen Dank an alle, die daran mitgewirkt haben. Sie können die bevorstehenden, ruhigen Tage nutzen, um sich selbst ein Bild von der Homepage zu machen.

Lassen Sie mich Ihnen abschließend ein Frohes Fest und ein Gesundes Neues Jahr wünschen.

Ich wünsche Ihnen nun viel Spaß beim Lesen der neuen Ausgabe des Mitteilungsblattes.

Ihr

Jochen Friedrich

4 Editorial

Mit großen Schritten nähern wir uns dem Jahr 2013. Hundert Jahre zurück, im Jahr 1913, erschien der zwanzigste Jahresband der Mathematisch-Physikalischen Klasse der Königlichen Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen. Das vierte und letzten Heft des Jahres 1913 enthielt einen Artikel, auf dessen dort abgeleitete Formel auch heutzutage in der Kristallzüchtung häufig zurückgegriffen wird. Es handelt sich um Richard von Mises' Veröffentlichung „Mechanik der festen Körper im plastisch-deformierbaren Zustand“ (digital erhältlich unter http://www.digizeitschriften.de/dms/toc/?PPN=PPN252457811_1913). Im zentralen Artikel dieses Mitteilungsblattes beschreibt Klaus Böttcher die Vorgeschichte und das historische Umfeld zu der Veröffentlichung und seinem Verfasser. Darüberhinaus gibt es wieder zahlreiche interessante Berichte über Konferenzen.

Ein Problem unserer Branche, der Kristallzüchtung, ist die geringe öffentliche Wahrnehmung - obwohl viele der täglich benutzten Gerätschaften in ihrem Kern aus Bauelementen mit kristalliner Struktur bestehen. Auch bei einem so aktuellen Material wie Graphen ist die (ungenügende) Kristallinität das Haupthindernis für eine breite Anwendung. Hier ist die Aktivität von uns allen gefragt und wir freuen uns über entsprechende Mitteilungen, Pressemitteilungen und Berichte an die Redaktion des MB. Ein auf seine Weise sehr Aktiver ist Hans Scheel. Im Frühjahr die-

ses Jahres hatte er nach Griechenland eingeladen, um über die Ausbildung von Ingenieuren und Wissenschaftlern in Kristalltechnologie zu diskutieren. Insgesamt 11 Teilnehmer aus Europa, Japan und den USA versuchten zu definieren, welche Inhalte eine solche Ausbildung haben sollte und wie so etwas realisiert werden könnte. Letzteres wird durch das stark reglementierte Ausbildungssystem an den Hochschulen nicht gerade erleichtert. Einen direkten Vorstoß hat dann Hans Scheel in diesem November mit einem Brief an den neuen Rektor der ETH Zürich, Prof. Lino Guzzella, gemacht. Er schlägt eine Ausbildung zum Kristalltechnologien vor, wobei grösstenteils auf bereits vorhandene Kurse zurückgegriffen werden könnte. Es müssten jedoch zwei Professoren für Kristalltechnologie zusammen mit Gastdozenten den spezifischen Teil abdecken.

Gerade auch für die sog. „Energiewende“ werden an vielen Stellen kristalline Materialien benötigt, neuartige oder bisher nur (kosten)aufwendig herzustellende. Auch hier zählt wieder die Sichtbarmachung der Zusammenhänge, für die Verantwortlichen in Wissenschaft und Politik, aber auch für die breite Öffentlichkeit.

Bevor es mit frischem Elan in das neue Jahr geht, wünschen wir Ihnen und Ihren Familien geruhsame Feiertage.

Die Redaktion

Titelbild

Christiane Frank-Rotsch, Leibniz-Institut für Kristallzüchtung (IKZ), Berlin

Das Titelbild zeigt die berechnete radiale Verteilung der maximalen Scherspannung (τ_m) [MPa] für einen 6-Zoll-GaAs-Kristall nahe der fest/flüssigen Phasengrenze aus dem Jahr 2007, welche

auf globalen Berechnungen des Temperatur- und Spannungsfeldes einer Vapour Pressure Controlled Czochralski (VCz)-Anlage basieren, für die das Programm CrysMAS eingesetzt wurde.

Inhaltsverzeichnis

Der Vorsitzende	3
Editorial	4
Titelbild	4
DGKK-intern	5
1. Seminar der Jungen DGKK über aktuelle Forschungsarbeiten auf dem Gebiet Kristallzüchtung und Epitaxie	5
Bericht über den II. Deutsch-Französischen Oxidkristall / Dielektrika / Laserkristall – Workshop in Saint-Louis (F) am 20. und 21. September 2012	7
Einladung zur Jahreshauptversammlung 2013	8
Deutsche Kristallzüchtungstagung DKT-2013	9
Einladung der Jungen DGKK	10
12. Kinetikseminar und 8. Workshop Angewandte Simulation in der Kristallzüchtung	10
DGKK-Personen	12
Glückwunsch zum 70. Geburtstag von Dr. Tilo Flade	12
DGKK-Nachrichten	12
38. IEEE Photovoltaic Specialists Conference	12
European Conference on Silicon Carbide and Related Materials (ECSCRM 2012)	14

Bericht zur ECSCRM 2012 vom 2.9.2012 bis zum 6.9.2012 in St. Petersburg, Russland	15
CSSC 6: 6-th International Workshop on Crystalline Silicon Cells 17	
Neue Mitglieder 2012	21
Summer School on Crystal Growth and Photovoltaic Materials, Brasov, August 2012	22
Grenzen überwinden –	24
Bessere Siliziumkristalle für eine bezahlbare Energiewende	25
Fourth European Conference on Crystal Growth (ECCG-4) in Glasgow	26
The 7th International Workshop on Modeling in Crystal Growth	27
DGKK-Forschung	29
Kristalle – Wunderwerkstoffe für die Industrie	29
DGKK-Nachwuchs	33
Masterarbeit im Rahmen des „European Crystal Growth Network“ an der Universität Linköping, Schweden	33
Modellierung des Massetransports bei homo-epitaktischem Wachstum von Silizium Carbid durch schnelle Sublimations-Epitaxie	34
DGKK-Fokus	35
100 Jahre von Mises-Spannung	35
Über die DGKK	40
Tagungskalender	41

DGKK-intern

1. Seminar der Jungen DGKK über aktuelle Forschungsarbeiten auf dem Gebiet Kristallzüchtung und Epitaxie

Tina Sorgenfrei (Kristallographie, Uni Freiburg)

Im Rahmen des ersten Treffens der Jungen DGKK fand am 14. & 15. Juni 2012 ein Seminar über aktuelle Forschungsarbeiten auf dem Gebiet der Kristallzüchtung und Epitaxie in Freiburg statt. Wie bereits auf der diesjährigen DKT in Freiburg berichtet, handelt es sich bei der Jungen DGKK um eine Initiative, die den wissenschaftlichen Austausch und die Kommunikation zwischen Nachwuchskristallzüchtern in Deutschland fördern möchte. Die Gründung und Idee dieser Initiative wurde auf der DKT 2010 in Freiburg erstmals vorgestellt, und in Freiburg fand nun auch ihr erstes Seminar statt. Mit diesem Treffen wurde die Basis für eine (hoffentlich) erfolgreiche Plattform für Nachwuchswissenschaftler geschaffen, die auch ermutigt werden sollen der DGKK beizutreten, um von den Kontakten und dem wissenschaftlichen Austausch zu profitieren.



Die rege Teilnahme von Studenten und Doktoranden an diesem Seminar aus allen Ecken Deutschlands verdeutlicht das bestehende Interesse an der Bildung eines Netzwerkes zwischen den Nachwuchskristallzüchtern.

Das zweitägige Seminar startete mit 13 Vorträgen zu den unterschiedlichen Arbeitsgebieten der 20 Teilnehmer aus Dresden, Berlin, Aachen, Erlangen, München und Freiburg. Den Beginn machte Jan Zähringer von der Kristallographie Freiburg über die Aktivitäten der angewandten Simulation. Weiter ging es mit Beiträgen über das Wachstum von GaN mittels der Pseudo-HVP-Methode (Krzysztof Kachel, IKZ Berlin), über die Epitaxie von undotierten und Sn-dotierten In_2O_3 -Schichten mittels Molekularstrahlepitaxie und deren Charakterisierung (Cornelia Haas und Christian Ehlers, Freiburger Materialforschungszentrum), und Michael Hahne von der LMU München präsentierte einen spannenden Überblick über seine Arbeiten zur Einkristallzüchtung intermetallischer Verbindungen für die heterogene Katalyse. Nach einem Einblick in die Aktivitäten der Abteilung Kristallzüchtung des Fraunhofer IISB in Erlangen (Ludwig Stockmaier) berichteten Markus Gellesch, Franziska Seifert und Hannes Stummer in ihren Vorträgen über heuslersche Legierungen, ihre Herstellung und die Vielfalt der Einsatzmöglichkeiten. Die dritte und letzte Session über die aktuellen Forschungsarbeiten eröffnete Sebastian Schütt vom Freiburger Materialforschungszentrum mit einem Einblick in die Fragestellung zur direkten Abscheidung polykristalliner CdTe-Schichten auf dem MediPix-Pixeldetektorchip für den Einsatz in der medizinischen Röntgendiagnostik und den Einsatz von CdTe als Absorbermaterial in Solarzellen. Franziska Schlich von der RWTH Aachen stellte ihre Ergebnisse der Impedanzspektroskopie an amorphen Phasenwechselmaterialien vor. Den Abschluss der Session machten zwei Vorträge aus dem Fraunhofer ISE, zum einen berichtete Mark Schumann über seine Untersuchungen zum Benetzungsverhalten von Si-Schmelze an der Si_3N_4 -Tiegelbeschichtung für das VGF-Verfahren und Martin Keller über die Entwicklung einer kontinuierlichen CVD-Anlage für die PV-Industrie. Die hier

vorgestellten Anlagen, sowohl die VGF- als auch die beiden CVD-Anlagen, konnten am nächsten Morgen im Rahmen eines Besuchs des SIMTEC (Fraunhofer ISE) besichtigt werden, was im Hinblick darauf, dass die meisten Studenten und Doktoranden hauptsächlich mit kleineren Laborgeräten Umgang haben, sehr beeindruckend war.

Im Anschluss an die einzelnen Vorträge der Seminarteilnehmer fand am Donnerstagabend ein Vortrag von Prof. Peter Rudolph statt, der unter dem Titel „Eine Vita für Kristallzüchtungstechnologien“ einen wunderbaren Einblick in die teils aufwändige und schwierige Entwicklung und Umsetzung vieler uns heute geläufiger Methoden geben konnte. Einige Fotos aus den „guten, alten Zeiten“ sorgten für Erheiterung, da hier verschiedene bekannte Personen - auch aus dem heutigen DGKK-Vorstand - z.B. im Karnevalskostüm zu sehen waren.



Prof. Peter Rudolph während seines Vortrages „Eine Vita für Kristallzüchtungstechnologien“

6 Prof. Rudolph zeigte, dass die Kristallzüchtung elementare und nicht wegzudenkende Grundlage für viele alltägliche Dinge ist, aber immer die Zusammenarbeit mit anderen Arbeitsfeldern wie z.B. den Konstrukteuren, Ingenieuren und Numerikern benötigt. Dies zielt in eine ähnliche Richtung wie auch der Wunsch der Jungen DGKK, den Kontakt mit Gesellschaften anderer Fachrichtungen zu intensivieren. Der Abend klang dann bei gemeinschaftlichem Grillen und vielen Gesprächen im Institutsinnenhof der Kristallographie aus.

Am nächsten Morgen fand dann die Besichtigung der Labore des SIMTEC statt, deren Anlagen im industriellen Maßstab sehr beeindruckend waren. An dieser Stelle vielen Dank an Claudia Schmid, Martin Keller und Mark Schumann für die tolle Führung durch ihr „Reich“.

Nach der Mittagspause stellte Thomas Jauß von der Kristallographie Freiburg das Institut und die Ausstattung vor, die dann anschließend in einer Führung durch die Labore des KI und des FMF gezeigt wurden.

Den Abschluss des Seminars machte der Vortrag von Dr. Ulrike Wunderwald vom Fraunhofer THM in Freiberg, die über die Aktivitäten des Institutes berichtete.

Insgesamt war das Seminar eine bunte Mischung an Themen

aus den Bereichen Volumenkristallzüchtung, Epitaxie, Werkstoffwissenschaften, Photovoltaik und Physik und war aufgrund der schönen und didaktisch sehr guten Vorträge und der anschließenden Diskussionen sehr interessant. Mit diesem gegenseitigen Kennenlernen und dem Überblick über einerseits die Arbeitsgebiete der einzelnen Teilnehmer und andererseits die prinzipiellen Möglichkeiten zur Kristallzüchtung und Charakterisierung an den einzelnen Instituten konnten eine Basis für künftige Zusammenarbeit und Anlaufstellen für spezielle Fragen geschaffen werden. Die Kaffeepausen wurden rege für Gespräche zwischen den Teilnehmern genutzt, um thematische Überschneidungen zu finden und mögliche gegenseitige Hilfestellung anzubieten. Genau dies ist die Grundidee der Jungen DGKK, und von diesem Standpunkt aus war dieses Seminar ein voller Erfolg!

Ganz besonderer Dank gilt dem aktuellen und dem vorangegangenen Vorstand der DGKK, die beide immer die Idee der Jungen DGKK befürwortet und unterstützt haben. Herzlichen Dank auch für die finanzielle Unterstützung des Seminars seitens der DGKK, die die Veranstaltung dieses Treffens und einigen Teilnehmern in Form von Reisekostenzuschüssen die Reise nach Freiburg überhaupt ermöglicht haben.

GERO

30-3000°C



KZV Kristallziehvorrichtung mit Leistungsregelung für Fluoride nach dem Stockbarger- oder Bridgman-Verfahren bis 1800°C

- Rohröfen bis 1800°C
- Aufklappbare Rohröfen bis 1700°C
- Vielzonenrohröfen bis 1800°C
- Kammeröfen bis 3000°C
- Bottom Loader bis 2500°C
- Laboröfen bis 3000°C
- Retortenöfen
- Pyrolyseöfen
- Silizieröfen
- Öfen für MIM-Verfahren
- Sonderanlagen
- Reichhaltiges Zubehör

mehr auf www.gero-gmbh.com

GERO Hochtemperaturöfen GmbH & Co. KG
 Hesselbachstr. 15
 D-75242 Neuhausen
 Telefon: 07234/9522-0 Fax: 07234/9522-99
 E-Mail: Info@gero-gmbh.com

Bericht über den II. Deutsch-Französischen Oxidkristall / Dielektrika / Laserkristall – Workshop in Saint-Louis (F) am 20. und 21. September 2012

Nach dem sehr erfolgreichen I. Deutsch-Französischen Oxidkristall/ Dielektrika/ Laserkristall- Workshop in 2011 am FEE in Idar-Oberstein fand auf Einladung des Deutsch-Französischen Forschungsinstitut Saint-Louis (ISL) nunmehr die zweite Veranstaltung statt. Auch sie war wieder ein großer Erfolg – der

Einladung folgten 25 Doktoranden und „gestandene“ Wissenschaftler aus Frankreich (6), Deutschland (16), Italien (1), Japan (1) und der Schweiz (1). Die Tagungsleitung lag in den Händen von Dr. Marc Eichhorn (ISL), unterstützt von Frau Feuermann, Frau Frischknecht und Frau Kaufmann.

Folgende Vorträge wurden innerhalb des Workshops gehalten:

Autor	Institution	Vortragstitel
Dr. Abdou-Ahmed	IFSW Stuttgart	Current progresses in thin-disk laser technology
Dr. Eichhorn	ISL	High-efficiency 2 μm thin-disk laser
Prof. Camy	CIMAP / University of Caen	Liquid-phase epitaxial growth and realization of a wave-guide YLF:Tm laser at 1.9 μm
Prof. Tonelli	University of Pisa	Fluoride crystals: exotic materials for laser application
Dr. Kraenkel	Universität Hamburg	Oxide host materials for visible lasers
Dr. Rytz	FEE Idar-Oberstein	$\text{KTa}_{1-x}\text{Nb}_x\text{O}_3$ (KTN) crystals revisited: “giant” electro-optic effect and material changes
Prof. Dr. Becker-Bohatý	University of Cologne	Spontaneous parametric fluorescence in optically biaxial crystals of BiB_3O_6
Dr. Kühnemann	Fraunhofer IPM, Freiburg	Analysis of residual absorption in optical materials using OPO-based pulsed photo acoustic spectroscopy
G. Stoeppler	ISL	ZGP RISTRA OPO operating at 6.45 μm and application in surgery
Dr. Petrov	MBI Berlin	Non-oxide Nonlinear Materials and Direct Frequency Conversion to the mid-IR above 4 μm with near 1 μm Pump Lasers
Dr. Voß	IFSW Stuttgart	Multicrystal SHG assembly - idea, challenges and preparatory Work
Dr. Ikesue	World Lab. Co. Nagoya, Japan	Technological Innovation in Optical Ceramics
C. Marlot	ISL	Development of YAG Transparent Ceramics: Coprecipitation Synthesis and Densification by Spark Plasma Sintering
A. Jaffres	Laboratoire de chimie de la matière condensée, Paris	Yb:CaGdAlO_4 : 1 μm laser material
Prof. Dr.-Ing. Scheel	Pfäffikon, Switzerland	Reduced Convection or Forced Convection for Striation-Free Crystals
M. Woll	University of Cologne	Crystal Growth and Characterization of $(\text{Bi}_{0.5}\text{Na}_{0.5})_{1-x}\text{Ba}_x\text{TiO}_3$
Dr. Veber	French National Center of Scientific Research, Institut of Condensed Matter Chemistry of Bordeaux	Crystal Growth and Characterization of Yb^{3+} -doped Gd_2O_3

Alle Teilnehmer danken den Organisatoren des ISL für die Ausrichtung des Workshops. Es ist geplant, diese Form des Work-

shops auch in 2013 weiter zu führen. Ein Ort und ein genaues Datum werden noch bekannt gegeben.

Dr. Marc Eichhorn (ISL)
marc.eichhorn@isl.eu

Prof. Dr. Manfred Mühlberg (Universität zu Köln)
manfred.muehlberg@uni-koeln.de

8 Einladung zur Jahreshauptversammlung 2013

An alle Mitglieder

Schriftführerin
Dr. Christiane Frank-Rotsch
Leibniz Institut für Kristallzüchtung
Max-Born-Str.2
D-12489 Berlin
Telefon (030) 6392 3031
Telefax (030) 6392 3003
E-Mail christiane.frank-rotsch@ikz-berlin.de
24.10.2012

Jahreshauptversammlung 2013 in Erlangen

Liebe Mitglieder,

der Vorstand lädt Sie herzlich zur Jahreshauptversammlung 2013 ein, die anlässlich der Deutschen Kristallzüchtungstagung 2013 in Erlangen stattfindet.

Ort: Department Werkstoffwissenschaften
Hörsaal H14,
Martensstr. 5-7
91058 Erlangen

Zeit: Mittwoch, 06.03.2013, 19:30 Uhr

Weitere Informationen: <http://www.crystals.techfak.uni-erlangen.de/dkt2013.shtml>

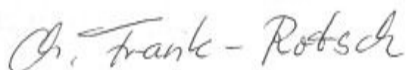
Vorläufige Tagesordnung:

1. Begrüßung und Feststellung der Beschlussfähigkeit
2. Bericht des Vorsitzenden
3. Bericht des Schriftführers
4. Bericht des Schatzmeisters und der Kassenprüfer
5. Entlastung des Vorstandes
6. Beschluss – Beitrag für Firmenmitglieder
7. Wahl des Vorstandes für die Zeit vom 1.1.2014 - 31.12.2015
8. Wahl der Kassenprüfer für die Zeit vom 1.1.2014 - 31.12.2015
9. Diskussionen über Tagungen und Symposien:
 - Deutsche Kristallzüchtungstagung 2014
 - Deutsche Kristallzüchtungstagung 2015
 - Abschließende Diskussion und Beschluss über die Deutsche Kristallzüchtungstagung 2014
10. Berichte zu den DGKK – Arbeitskreisen
11. Verschiedenes

Anträge auf Erweiterung der Tagesordnung sind dem Vorstand gemäß § 9 (2) der Satzung rechtzeitig mitzuteilen.

Wir möchten Sie bitten, Ihre Teilnahme an der Jahreshauptversammlung 2013 möglich zu machen.

Mit freundlichen Grüßen



Christiane Frank-Rotsch
Schriftführerin DGKK

Deutsche Kristallzüchtungstagung DKT-2013

6. bis 8. März 2013 in Erlangen

Wir möchten Sie herzlich zur Deutschen Kristallzüchtungstagung DKT-2013 vom 6. bis 8. März 2013 auf dem Campus der Technischen Fakultät der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU) nach Erlangen einladen.

Erlangen und sein fränkisches Umland sind eng mit der Halbleiter- und Kristallzüchtungstechnologie verbunden. In den Siemenslaboratorien wurde vor 60 Jahren ganz wesentlich die Siliziumtechnologie vorangetrieben. In die gleiche Zeit fällt auch die „Erfindung“ der III-V Verbindungshalbleiter durch Welker. Darüber hinaus zelebrieren wir im Jahr 2013 den 60. Todestag von Prof. Jan Czochralski, den Erfinder des heute bedeutendsten Kristallzüchtungsverfahrens. In drei Plenarvorträgen wird auf diese wegweisenden Entwicklungen eingegangen.

Thematisch bietet die Deutsche Kristallzüchtungstagung 2013 eine Plattform für die fachliche Diskussion in den Themenfelder der Arbeitskreise der Deutschen Gesellschaft für Kristallwachstum und Kristallzüchtung (DGKK):

- Epitaxie von III/V-Halbleitern
- Herstellung und Charakterisierung von massiven Halbleitern
- Intermetallische Verbindung mit Spin- und Ladungskorrelation
- Kinetik und Angewandte Simulation in der Kristallzüchtung
- Kristalle für Laser und Nichtlineare Optik

Wir freuen uns auf Ihre Beiträge und hoffen, Sie in Erlangen begrüßen zu dürfen.

Peter Wellmann und Christian Reimann

Programm

jDGKK Nachwuchstreffen (keine Tagungsgebühr)

- Beginn: 05.03.2013, 13:00 Uhr
- Ende: 06.03.2013, 12:00 Uhr
- für Studierende, Doktoranden & Jung-Postdoc
- mit Vorlesung, Fachdiskussion der eigenen Forschung und Firmenbesichtigung

DKT-2013

- Beginn: 06.03.2013, 13:00 Uhr
- Ende: 08.03.2013, 13:00 Uhr
- mit Plenar- und Fachvorträgen aus den Arbeitskreisen
- Postersitzung

DGKK-Mitgliederversammlung (mit Wahlen)

- Beginn: 06.03.2013, 19:30 Uhr

DKT-2013 Abendveranstaltung

- Beginn: 07.03.2013, 19:30 Uhr

Tagungsgebühr

	vor dem 31.01.2013	danach
DGKK-Mitglied	65,- EUR	100,- EUR
Nicht-Mitglied	90,- EUR	125,- EUR
Studierende	40,- EUR	50,- EUR

In der Gebühr sind das Tagungsprogramm, die Kaffee-Pausen und die Abendveranstaltung am Donnerstagabend (07.03.2013) enthalten.

Anmeldung von Personen

- Anmeldung zur DKT-2013 vom 06.-08.3.2013 per Email an peter.wellmann@ww.uni-erlangen.de (formlos) oder Fax 09131-85-28495 (Anmeldeformular siehe Flyer)
- Anmeldung zum Treffen der jDGKK am 05.-06.3.2013 per Email an ludwig.stockmeier@iisb.fraunhofer.de (formlos) oder Fax 09131-761-280 (Anmeldeformular siehe Flyer)

Anmeldung eines wissenschaftlichen Beitrags

- Vortrag (15 min + 5 min Diskussion) oder Poster
- Anmeldung bitte formlos per Email an peter.wellmann@ww.uni-erlangen.de oder Fax 09131-85-28495 unter Nennung des Titels, aller Autoren, sowie einem **Abstract von max. 1500 Zeichen** (ca. 350 Wörter).
- **Deadline für Abstracts: 31.1.2013**

Informationen für Industrieaussteller

Für Informationen über die Buchung von Ausstellungsflächen und Sponsoring-Möglichkeiten der Tagung kontaktieren Sie bitte das Tagungsbüro.

Tagungsbüro (Fragen jeglicher Art)

Elisabeth Henneberger
 (Department Werkstoffwissenschaften 6,
 Universität Erlangen-Nürnberg)
 elisabeth.henneberger@ww.uni-erlangen.de
 Tel.:09131/85-27729 (Mo. bis Do., vormittags)

Weitere Informationen, einschließlich Tagungs-Flyer, können auf der Homepage der DGKK (www.dgkk.de) eingesehen werden.

10 Einladung der Jungen DGKK

Einladung zum

2. Seminar der „Jungen DGKK“ über aktuelle Forschungsarbeiten auf dem Gebiet der Kristallzüchtung und Epitaxie am 5. & 6. März 2013 in Erlangen

Nach dem Erfolg des 1. Seminars der Jungen DGKK im Juni diesen Jahres in Freiburg (siehe Bericht zum Seminar ebenfalls in diesem MB) möchten wir hiermit alle interessierten StudentInnen, DiplomandInnen, MasterandInnen und DoktorandInnen herzlich zu unserem 2. Treffen in Erlangen im Vorfeld der kommenden DKT einladen. Das *2. Seminar über aktuelle Forschungsarbeiten auf dem Gebiet der Kristallzüchtung und*

Epitaxie startet am 5. März um 13 Uhr und endet zum Beginn der DGKK-Jahrestagung am 6. März.

Im Vordergrund dieses Seminars steht die Vernetzung der NachwuchswissenschaftlerInnen der verschiedenen kristallzüchtenden und materialforschenden Institutionen in Deutschland. Dabei ist es uns vorrangig wichtig, den fachlichen Austausch anzukurbeln und zu erleichtern und die Zusammenarbeit zu fördern.

Programm des Seminars:

Di, 05. März 2013:

- Vorlesung Dr. B. Kallinger (Fraunhofer IISB Erlangen) zum Thema „Epitaxie“
- Postersession
- Vorlesung Dr. A. Danilewsky (Kristallographie Uni Freiburg) zum Thema „Wachstumskinetik und Wachstumsstörungen“

Mi, 06. März 2013:

- Firmenbesichtigung SEMIKRON (Nürnberg)
- Start DKT 2013

Die Teilnahme an diesem Seminar ist erfreulicherweise wieder kostenfrei, an dieser Stelle vielen Dank an den Vorstand der

DGKK, der durch seine finanzielle Unterstützung die Durchführung dieses Seminars erst ermöglicht.

Die Anmeldung mit Postertitel (Abstracts werden nicht benötigt) kann bis zum 15. Februar 2013 unter jugend@dgkk.de oder ludwig.stockmeier@iisb.fraunhofer.de erfolgen. Eine DGKK-Mitgliedschaft ist keine Teilnahmevoraussetzung. Es steht ein begrenztes Kontingent für Reisekostenzuschüsse zur Verfügung.

An dieser Stelle noch eine Bitte an Alle: Bitten leiten Sie diese Einladung an Ihre MitarbeiterInnen, StudentInnen, DoktorandInnen und vor allem an all jene weiter, die Interesse an einem Seminar dieser Art haben könnten und die keine DGKK-Mitglieder sind, da wir diese Personen nicht selbst erreichen können. Vielen Dank für Ihre Hilfe!

Ansprechpartnerin: Dr. Tina Sorgenfrei (jugend@dgkk.de)

12. Kinetikseminar und 8. Workshop Angewandte Simulation in der Kristallzüchtung

19.-21. November 2012 am Griebnitzsee bei Berlin

Albrecht Seidl, Schott AG, Jena

Bericht und Fazit

Zum zweiten Mal nach 2009 trafen sich beide Arbeitskreise zu einer gemeinsamen Veranstaltung am Griebnitzsee nahe Berlin. Mit 32 Teilnehmern und 16 Beiträgen war zwar eine durchaus anspruchsvolle Tagung mit vielseitigen Themen möglich, jedoch, ganz klar, die Beteiligung war nicht annähernd so wie erwartet. Vertreter von Industrie und Softwarefirmen fehlten fast ganz. Davon später.

Allein 4 Beiträge kamen von der starken Delegation aus Rigas unter Führung von Andris Muiznieks. Diese Arbeitsgruppe mit traditionell sehr guten Kontakten nach Deutschland (Uni Hannover, IKZ Berlin, Siltronic) berichtete über verschiedene Aspekte der 2D und 3D Simulation von Cz- und FZ-Prozessen. Das für FZ schon bekannte transiente Wachstumsmodell gibt es jetzt auch für Cz. Bemerkenswert auch die Simulation der Gaskonvektion bei der FZ-Züchtung bei den dort herrschenden extremen Temperaturgradienten im Umfeld des Induktors.

Ebenfalls transiente 3D Simulationen der Morphologie von mit dem Czochralski-Verfahren wachsenden, stark facettierten Kris-

tallen präsentierte Oleg Weinstein (Technion, Haifa), allerdings für Oxidkristalle und unter Berücksichtigung der Anisotropie von Wachstumswinkel und Kinetik. Die simulierten Kristalle sind fast so schön wie echte, insbesondere in der gelungenen Visualisierung!

Bei der VGF-Züchtung großer Silicium-Ingots für die Photovoltaik ist der Einsatz instationärer Magnetfelder nach wie vor aktuell. Die Beiträge vom IKZ (Natasha Dropka) und vom IISB in Erlangen (Jan Seebeck) zeigten die vielfältigen Möglichkeiten der Beeinflussung der Schmelzkonvektion und der Schmelzdurchmischung, je nach Art und Stärke des B-Felds, der Phasenverschiebung und der Frequenz. Dagegen ging es beim Beitrag von Kirsten Stiebler (Schott Jena) um die Schadensbegrenzung im Fall des Unfalls: was tun, wenn der Heizer ausfällt und die kristallisierende, sich ausdehnende Schmelze im Inneren eines unkontrolliert erstarrenden Ingots diesen zu zerreißen droht? Die Simulationen prüften die Möglichkeit, mittels Laser einen Kanal zur Oberfläche offenzuhalten.

Das Programm am zweiten Tag war gemischter. Die beiden

ersten Vorträge hatten mit Silizium zu tun, allerdings auf atomarer Ebene - es wurden Ergebnisse von Molecular-Dynamics-Berechnungen präsentiert. Detlef Stock (Innovent, Jena) zeigte, das am Rand von $\Sigma 9$ - und $\Sigma 27$ -Korngrenzen Eisenatome in stabilen Positionen sitzen. Noch interessanter aus Züchtungssicht ist das Ergebnis, dass entlang dieser Korngrenzen auch bei niedrigen Temperaturen (500°C) eine relevante Diffusion von Eisenatomen zu erwarten ist. Eine weiterer Vortrag aus Riga zeigte MD-Rechnungen zur Gleichgewichtsstruktur von Si-Nanokristallen. Daraus lässt sich die relative Änderung der Oberflächenenergie als Funktion der Kristallorientierung ableiten.

Ein ganz anderes Thema stellte Jan Zähringer aus Freiburg vor: Simulationen zur Kristallzüchtung unter μg -Bedingungen. Wie groß ist die Auftriebskonvektion unter dem Einfluss der Restgravitation?

Anschließend ging es um die Fragestellung, welche Kristallstruktur sich bei verschiedenen Übersättigungen in der Lösungszüchtung von Pharmazeutika einstellen wird. Energetische Berechnungen geben einen Einblick, was die kritische Keimgröße für die jeweilige Struktur ist.

Zum Schluss gab es zwei Vorträge zur Epitaxie, die hier, wie übrigens auch bei dem Internationalen Workshop on Modelling in Crystal Growth in Taipeh, deutlich unterrepräsentiert war. Einen Anlagen-orientierten Vortrag gab David Pócsa vom Fraunhofer ISE in Freiburg über Simulationen zu einem Hochdurchsatzreaktor.

Der Vortrag von Petar Petrov (IKZ Berlin) beschäftigte sich mit der Kinetik im atomaren Maßstab (kinetische Monte-Carlo-Rechnungen). Eventuell gibt es beim System ein $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$ auf GaAs eine neue Erklärung für die Benetzungsschichten: die durch die Zusammensetzung bestimmte lokale Oberflächenenergie der Quantendots ändert das Wachstumsverhalten.

Trotz all dieser schönen Beiträge muss an dieser Stelle kritisch hinterfragt werden, ob die Veranstaltung ihr Ziel erreicht hat, bzw. ob die Ziele der beteiligten Arbeitskreise überhaupt noch aktuell und zeitgemäß sind. Das gilt insbesondere für den Arbeitskreis "Angewandte Simulation in der Kristallzüchtung", auch wenn Vertreter dieses AKs die gemeinsame Veranstaltung sogar bei weitem dominiert haben.

Hier lohnt ein Blick zurück. Der Arbeitskreis Simulation wurde Ende 2000 gegründet, der erste Workshop fand dann im Frühjahr 2001 statt. Vom Start weg fand der Arbeitskreis großen Anklang. Über 40 Teilnehmer waren es bereits beim ersten Workshop, bei den nachfolgenden Workshops waren es dann immer 50 bis 60. Sie verteilten sich immer auf ca. 20 bis 30 verschiedene, wenn auch wechselnde Institutionen, davon immer ca. 10 Firmen, wechselnder Ausrichtung. Insbesondere bei den ersten Workshops waren fast alle bekannten Firmen aus dem Bereich der deutschen Kristallzüchtung vertreten, entsprechend breit waren die Materialklassen und Verfahren, die simuliert wurden. Und gleichzeitig waren alle Gruppen, Firmen und Institute da, welche Simulationssoftware entwickelten und/oder ihre Dienste anboten.



Ein aufmerksames Auditorium folgte den Vorträgen.

Foto: Klaus Böttcher

Damit gelang dem Arbeitskreis, was er von Anfang an als zentrales Ziel nannte: "Der Workshop soll Kristallzüchter zu einem Erfahrungsaustausch zusammenbringen, welche die Ergebnisse numerischer Simulation zu nutzen versuchen. Weiter sollen Anbieter bzw. Entwickler von Simulationsprogrammen mit den realen Anwenderproblemen bzw. -wünschen konfrontiert werden."

So war es in der Einladung zum ersten Workshop 2001 formuliert, und das blieb Ziel bis heute. Aber die Randbedingungen haben sich geändert, und das war ja auch Ziel des Arbeitskreises. Die Numerische Simulation ist heute fester Bestandteil jeder Verfahrensentwicklung. So gut wie alle großen und kleinen Firmen und Institute im Bereich der Kristallzüchtung nutzen sie, pflegen Kontakte zu den einschlägigen Anbietern und Entwicklern von Software, oder wenden kommerzielle multifunktionelle oder auch spezifische Programmpakete selbst an. Umgekehrt haben sich aus einer vielschichtigen Landschaft kleinerer und größerer Softwareentwickler wenige etabliert, die ihrerseits gute und direkte Kontakte zur weltweiten Kristallzüchtungslandschaft haben.

Es zeichnete sich schon bei den letzten Workshops ab, dass Anbieter von Software nicht mehr in dieser Breite kamen, und auch etliche Firmen aus dem Anwenderbereich wurden durch neue, vorwiegend aus der PV-Branche abgelöst. Jetzt, beim 8. Workshop, war es nun so, dass kommerzielle Anbieter von Simulationssoftware ganz fehlten, und ebenso fast alle Anwenderfirmen.

Der Arbeitskreis hat also seine ehemalige Bedeutung verloren. Und das ist gut so! Die vor über 10 Jahren gesteckten Ziele wurden erreicht, und ein klein bisschen dürfen alle seine ehemaligen und aktuellen Mitglieder stolz darauf sein, dass sie daran mitwirken durften. Der Arbeitskreis Angewandte Simulation in der Kristallzüchtung wird in dieser Form vom aktuellen Leitungsteam nicht weitergeführt werden. Simulation findet in allen anderen Arbeitskreisveranstaltungen und bei der DKT reichlich Platz.

Wir wünschen allen an der Simulation von Kristallzüchtungsprozessen Interessierten und Beteiligten gute Konvergenz sowie den Mut, komplizierte Sachverhalte soweit zu vereinfachen, dass die Computer und ihre Bediener sie verstehen!

Lev Kadinski, Wolfram Miller, Albrecht Seidl

12 DGKK-Personen

Glückwunsch zum 70. Geburtstag von Dr. Tilo Flade

S. Eichler, B. Weinert, FCM GmbH Freiberg

Dr. Tilo Flade hat am 20. August 2012 seinen 70. Geburtstag gefeiert. Aus diesem Anlass haben sich bei der Freiburger Compound Materials GmbH (FCM), wo er bis 2007 Geschäftsführer war, viele Gratulanten eingefunden, darunter auch zahlreiche „alte“ Wegbegleiter. Eine gute Gelegenheit, um auf Tilo Flades bewegtes und erfolgreiches Berufsleben in der Halbleiterindustrie zurückzublicken und sich über aktuelle Themen auszutauschen.

Nach Studium der Werkstoffwissenschaften an der Bergakademie Freiberg übernahm er leitende Positionen im Bereich Forschung und Entwicklung des VEB Spurenmetalle Freiberg. In diese Zeit fiel die Entwicklung der Produktions- und Verarbeitungstechnologien von Verbindungshalbleitern wie z.B. GaP oder GaAs. Tilo Flade verstand sehr gut, dass eine effiziente Materialforschung eine tiefe Einsicht in die grundlegenden physikalischen und chemischen Zusammenhänge erfordert. Aus dieser Erkenntnis heraus pflegte er den Kontakt zur akademischen Forschung und bestimmte in vielen Gremien wie z.B. der DGKK und insbesondere dem III-V-Arbeitskreis sowie dem Forschungsverbund Berlin die Ausrichtung von Forschungsprogrammen und Kooperationsprojekten aktiv mit. Nach der politischen Wende im Osten Deutschlands sorgte Tilo Flade mit Beharrlichkeit und Umsicht für den Erhalt des Halbleiterstandortes Freiberg und formte die Freiburger Compound Materials GmbH zur einem weltweit führenden GaAs-Substrathersteller.

Auch im Ruhestand ist Tilo Flade weiter eng mit FCM verbunden. Sein Rat ist nach wie vor gefragt, so nimmt er an allen Aufsichtsratssitzungen aktiv teil und unterstützt FCM in anderen Gremien. Er engagiert sich als aktiver Bürger der Stadt Freiberg und gibt ein Beispiel für private Initiative zugunsten sozialer und kultureller Projekte. Es bleibt aber auch mehr Zeit für andere Dinge, wie die Gartenpflege und Reisen in nahe und ferne Regionen. Mit großer Freude widmet er sich seinen beiden Enkelkindern.



Tilo Flade nimmt Glückwünsche entgegen

Foto: FCM GmbH

DGKK-Nachrichten

In diesem Jahr konnten einige junge Kristallzüchter eine Förderung der DGKK zu Konferenzreisen in Anspruch nehmen. Es gibt in dieser Rubrik vier Berichte - von Herrn Heimburger, dem Preisträger des Nachwuchspreises der DGKK 2011, von der diesjährigen Preisträgerin, Frau Kallinger, sowie von zwei weiteren Geförderten. Da Herr Hupfer wie Frau Kallinger in St. Petersburg war, gibt es zur ECSCRM 2012 zwei Berichte. Ein weiterer Bericht ist über die IWMCG-7 in Taipeh, die Herr Wünscher besucht hat.

38. IEEE Photovoltaic Specialists Conference

Robert Heimburger, Leibniz-Institut für Kristallzüchtung (IKZ), Berlin

Vom 3. bis zum 8. Juni 2012 fand in Austin, Texas, die 38. IEEE Photovoltaic Specialists Conference statt. Als eine der wichtigsten jährlichen internationalen Tagungen zum Thema Photovoltaik richtet sich die Konferenz gleichermaßen an Wissenschaftler, Technologen sowie Vertreter der Solarindustrie. Dabei werden Themen der „grundlegenden Materialwissenschaft bis hin zur Güte installierter Systeme“ [1] behandelt.

I. Tutorials

Besonderes Augenmerk liegt außerdem auf der Förderung des wissenschaftlichen Nachwuchses. Dieser wird durch die Verleihung der „Student Awards“ für herausragende wissenschaftliche Beiträge von Studenten Rechnung getragen. In zahlreichen und gut besuchten einleitenden Tutorials wurden am Sonntag ausgehend von den physikalisch-chemischen Grundlagen der Photovoltaik aktuelle Forschungsthemen im Detail erläutert. Im Modul „Thin Film Solar Cells“ sprachen Professor Tim Anderson,

Brian McCandless und Steve Hegadus über Entwicklungen im Bereich CIGS, CdTe sowie über Dünnschichtsysteme auf Basis von Silicium [2]. Diese so genannten „micromorphen“ Tandemzellen bestehen aus einem Schichtpaket aus mikrokristallinem und amorphem Silicium und werden in einem Plasmadepositionsprozess hergestellt. Durch Vorgabe der Prozessparameter kann zwischen amorpher und mikrokristalliner Abscheidung gewechselt werden. Es werden stabile Wirkungsgrade von etwa 10% erreicht. Diese Technologie ist inzwischen bis zur Marktreife entwickelt, und erste Firmen stellen Module zum Verkauf. Vor kurzen sah sich allerdings die Berliner Firma Inventux gezwungen, ein Insolvenzverfahren zu eröffnen [3]. Dies wurde am Schluss des Tutorials auch thematisiert.

So unterliegt die Photovoltaikbranche derzeit grundlegenden Veränderungen. Dies schließt Übernahmen, Werksschließungen sowie Insolvenzverfahren mit ein. Als Beispiele seien CSG

Solar, Solon, Solteure, Oderson, Inventux und FirstSolar genannt. Als Grund werden häufig die starke Konkurrenz aus Asien sowie der Wegfall von Subventionen genannt [4].

II. Plenarvorträge

Umso wichtiger erscheint der Einsatz in Forschung und Entwicklung konkurrenzfähiger Herstellungsverfahren. Dabei spielen Ansätze der so genannten zweiten und dritten Generation eine wesentliche Rolle. Aber auch die Si-Wafer basierte Technologie verspricht noch einiges an Potential, wie Prof. Eicke Weber in seinem Plenarsitzungsvortrag mit dem Titel „The Future of Crystalline Silicon Photovoltaic Technology“ verdeutlichte. So könne beispielsweise die den Wirkungsgrad von Solarzellen limitierende Bildung von Bor-Sauerstoff-Komplexen in p-leitenden Absorberschichten durch Einsatz von n-leitenden Absorbieren umgangen werden. Alternativ werde die Dotierung mit Gallium anstelle von Bor untersucht. Bis 2050 rechnet Prof. Weber mit einer weltweit installierten PV-Leistung von 30 Terawatt.

Ähnlich optimistisch sieht Samuel Baldwin, US Department of Energy, die Zukunft der erneuerbaren Energien: So könnte laut der Studie im Jahre 2050 bereits bis zu 80 % des Energiebedarfs der Vereinigten Staaten aus den Erneuerbaren gedeckt werden.

Weitere Plenarvorträge beschäftigten sich u.a. mit Konzepten der Energiespeicherung und dem Ausbau der Netze zu sog. „Smart Grids“.



Plenarvortrag im Hauptsitzungssaal (Foto: John Meakin, mit freundlicher Genehmigung des Organisationskomitees Öffentlichkeitsarbeit)

III. Sitzungen der Fachgebiete

Einzelne wissenschaftliche Forschungsbeiträge wurden in 10 Vortrags- sowie 4 Postersitzungen vorgestellt. Aufgrund der Fülle an Beiträgen wurden jeweils bis zu 7 parallele Sessions angeboten, die allesamt gut besucht waren.

Im Fachgebiet Thin Film Silicon wurden neueste Entwicklungen zur plasmagestützten Abscheidung von Solarzellenstrukturen auf Fremdsubstraten vorgestellt. Dabei wurde eine Vielzahl von Ansätzen zur Erzeugung der für das epitaktische Aufwachsen der Absorberschicht benötigten Saatschicht diskutiert. So könne diese beispielsweise von einem kristallinen Ausgangswafer in einem Abspaltungsprozess (Exfoliation) direkt auf Glas transferiert werden [5]. Die kristalline Absorberschicht wird anschließend ebenso wie die amorphe Emitterschicht mit Hilfe der Hot-Wire CVD abgeschieden. Nach Kontaktierung konnte ein Wirkungsgrad von bis zu 4 % erreicht werden. Einen ähnlichen Ansatz verfolgt die Gruppe um Kris Van Nieuwenhuysen [6]. Hier wird die für den Schichttransfer vorgesehene Siliciumfolie in einem Epitaxieprozess auf porösem Silicium hergestellt. Durch den im

Vortrag erläuterten Prozess soll es ermöglicht werden, die Frontseitenstruktur der Solarzelle herzustellen, noch während die Siliciumfolie auf dem Trägerwafer aufgebracht ist. Erst danach erfolgt der Transfer auf das kostengünstige Glassubstrat. Im Anschluss soll die Rückseitenkontaktierung realisiert werden. Dazu konnte ein Machbarkeitsnachweis anhand von waferbasierten Teststrukturen erbracht werden. Im Ausblick soll die Übertragung des Prozesses auf transferierte Siliciumfolien untersucht werden.

Als weitere Methoden der Saatschichtherstellung wurden metall-induzierte Kristallisationsprozesse anhand von Posterbeiträgen vorgestellt. Neben Forschungen zur Ni-induzierten Kristallisation [7] wurden Verbesserungen bezüglich des Al-induzierten Schichtaustausches gezeigt [8]. Hierbei wird traditionellerweise ein auf das Trägersubstrat abgeschiedenes Schichtpaket aus Al/Al₂O₃/a-Si durch einen Tempersschritt in die Schichtfolge $\mu\text{c-Si/Al}_2\text{O}_3/\text{Al}$ überführt. Nach nasschemischer Entfernung des Aluminiums muss die Oberfläche vor dem nachfolgendem Hot-Wire CVD Epitaxieschritt poliert werden. Bei Umkehrung der Ausgangsschichtfolge könne nach Shumate et al. dieser Polierschritt nunmehr entfallen. Eine spezielle Form der metall-induzierten Kristallisation wurde im Beitrag des Leibniz-Instituts für Kristallzüchtung vorgestellt [9]. Hierbei wird ein bei tiefer Temperatur schmelzendes Metall auf eine Schicht amorphen Siliciums aufgedampft. Dieses bildet zunächst Nanotröpfchen. Der anschließende Kristallisationsvorgang wird durch eine laterale Bewegung der Metalltröpfchen begleitet. Dadurch wird in kurzer Zeit eine große Fläche des amorphen Siliciums in kristallines Material umgewandelt. Dieses wurde anschließend mit Hilfe der stationären Lösungszüchtung zu mehrere 10 μm großen Kristalliten ausgewachsen. Allerdings bestehen Limitierungen bezüglich deren Flächendichte.

Interessante Neuentwicklungen wurden auch innerhalb der Themensessions zum Lichteinfang und Konzentratorodesign vorgestellt. Grandidier et al. zeigten neue Ansätze zur resonanten Lichteinkopplung [10]. Dazu werden Nanokugeln eines Dielektrikums (unter anderem SiO₂ und TiO₂) auf der Solarzellenstruktur in dichter Kugelpackung (hcp) angeordnet. Mit Hilfe von Simulationsrechnungen konnte gezeigt werden, dass die Einkopplung der Sonnenstrahlung in das Absorbermaterial durch Ausbildung so genannter Whispering Gallery Modes um bis zu 20 % gegenüber üblichen Antireflexschichten erhöht werden kann. Einen Ansatz zur Verbesserung der Transmissionseigenschaften der Glasabdeckung der Solarmodule stellten Welsch et al. vor [11]. Durch Abscheidung von schräg stehenden SiO₂-Nanosäulen auf das Trägerglas ist eine gezielte Reduzierung des Brechungsindex in Abhängigkeit vom Neigungswinkel der Säulen möglich. Durch schrittweise Änderung des Neigungswinkels kann ein quasi-gradueller Übergang zwischen Luft und Glas realisiert werden. Damit konnte der Transmissionsgrad der Glasscheiben auf 98,6 % erhöht werden.

IV. Resümee

Die 38. IEEE PVSC bot einen umfassenden Überblick über den derzeitigen Status und die Zukunft der Photovoltaik. Neben den Plenarvorträgen boten insbesondere die Fachbeiträge in Form von Vorträgen und Postern Raum zur Diskussion und Anregung. Hervorzuheben ist auch das Engagement für den wissenschaftlichen Nachwuchs.

Die 39. IEEE PVSC findet vom 16.06.2013 bis zum 21.06.2013 in Tampa, Florida statt.

Nachweise

- [1] <http://www.ieee-pvsc.org/PVSC38/>, Stand: 29.06.12
- [2] Tutorial AM2: Thin Film Solar Cells
- [3] Pressemeldung vom 22.05.12 auf www.inventux.de
- [4] http://www.rbb-online.de/stadt_land/dossiers/energie/solarbranche/beitraege/first_solar_5fragen.html, Stand: 29.06.12
- [5] D. L. Young et al.: Characterization of Epitaxial Film Silicon Solar Cells Grown on Seeded Display Glass, 38. IEEE PVSC Proceedings Abstract 545
- [6] K. van Nieuwenhysen et al.: High-Quality Epitaxial Foils, Obtained by a Layer Transfer Process, for Integration in Back Contacted Solar Cells Processed on Glass, 38. IEEE PVSC Proceedings Abstract 541
- [7] Y. Kuo et al.: Crystallization of a-Si Thin-Film Using an Ultrathin n+ Poly-Si Seed Layer for Solar Cell Applications, 38. IEEE PVSC Proceedings Abstract 106
- [8] S. D. Shumate et al.: Large-Grain Polysilicon Seed Layers on Glass for Epitaxial Silicon Solar Cells, 38. IEEE PVSC Proceedings Abstract 113
- [9] R. Heimbürger et al.: Solvent-Induced Growth of Crystalline Silicon on Glass, 38. IEEE PVSC Proceedings Abstract 103
- [10] J. Grandidier et al.: Configuration Optimization of a Nanosphere Array on Top of a Thin-Film Solar Cell, 38. IEEE PVSC Proceedings Abstract 972
- [11] R. Welsler et al.: Broadband Nanostructured Antireflection Coating on Glass for Photovoltaic Applications, 38. IEEE PVSC Proceedings Abstract 975

European Conference on Silicon Carbide and Related Materials (ECSCRM 2012)

Birgit Kallinger, Fraunhofer IISB, Erlangen

Vom 02.-06. September 2012 fand die europäische Siliziumkarbid-Konferenz ECSCRM in St. Petersburg, Russland, statt. An der Konferenz nahmen etwa 550 Vertreter aus Forschung und Industrie teil. Insgesamt 40 Vorträge wurden in 11 Sessions und etwa 300 Posterbeiträge in 3 Postersessions präsentiert, die die Themenbereiche von der Materialherstellung (Bulk Growth und Epitaxie) über Charakterisierung bis hin zu Bauelementen abdecken. Nachfolgend wird der Stand der Wissenschaft und Technik in diesen drei Themengebieten vorgestellt.

Siliziumkarbid (SiC) ist bekannt für seine Polytypie, d.h. diese Verbindung tritt in einer Vielzahl unterschiedlicher Kristallstrukturen auf. Der Polytyp 4H-SiC hat sich auf Grund seiner Materialeigenschaften (große elektronische Bandlücke von 3,2 eV, vergleichsweise hohe Ladungsträgermobilitäten, sehr hohe elektrische Durchbruchfeldstärke und hervorragende thermische Leitfähigkeit) und der Verfügbarkeit in hoher Qualität und Menge in den letzten 10 Jahren für leistungselektronische Anwendungen durchgesetzt. Kubisches 3C-SiC verspricht eine geringere Anisotropie der Eigenschaften als hexagonales 4H-SiC, was in einigen Anwendungen von Vorteil ist. Auf Grund der kleineren elektronischen Bandlücke von 2,4 eV (gegenüber 3,2 eV bei 4H-SiC) ist 3C-SiC vor allem für MEMS Anwendungen interessant.

4H-SiC Volumenkristalle werden nach dem modifizierten PVT-Verfahren (auch Lely-Verfahren genannt) großtechnisch hergestellt: der Marktführer Cree Inc. (Durham, USA) hat im Rahmen der ECSCRM 2012 bekanntgegeben, dass bei Cree in den Jahren seit 2008 insgesamt 58 Tonnen SiC-Kristalle gezüchtet wurden, davon seit 2010 allein 6 Tonnen mit dem aktuell größten Durchmesser von 150mm. Eine solch hohe Züchtungskapazität führt zu steiler werdenden Lernkurven in Hinsicht auf Materialqualität, beispielsweise der Vermeidung von Polytypeinschlüssen, und auch Defektdichten, hier sind vor allem die „berühmterbühmten“ Mikroröhren zu nennen. Seit einigen Jahren wird bereits Mikroröhren-freies Substratmaterial mit einem Durchmesser bis 100mm angeboten. Ein Mitbewerber aus Japan, Nippon Steel, hat zeigen können, dass die Reduzierung thermomechanischer Spannungen bei der Volumenkristallzüchtung zu einer deutlichen Reduzierung der sog. Basalflächenversetzungen von typischerweise 10^4 BPDs/cm² auf etwa 100 BPDs/cm² führt. Dieser spezielle Versetzungstyp ist besonders kritisch für

die Langzeitstabilität bipolarer Hochvoltbauelemente, so dass hier ein großer technologischer Fortschritt basierend auf einem tiefgehenden Verständnis für Kristallzüchtung gelungen ist. Insgesamt bieten weltweit 5 etablierte Hersteller 4H-SiC Substrate mit einem Durchmesser bis 150mm an, die sich in den kommenden Jahren weiteren Wettbewerbern aus Asien, vor allem China, stellen werden müssen.

Ergänzend zu den zahlreichen Beiträgen über SiC-Material wurde auch über Graphen und Gruppe III-Nitride auf der ECSCRM 2012 berichtet. Graphen verfügt als 2D-Material über außergewöhnliche Eigenschaften, die mittlerweile gezielt manipuliert werden können, z.B. mittels Interkalation mit Wasserstoff. Auf der ECSCRM wurde in verschiedenen Beiträgen gezeigt, dass Graphen als Kontakt- und Gatematerial eingesetzt werden kann und damit bereits Bauelemente und logische Schaltungen aufgebaut werden können. Hinsichtlich der Gruppe III-Nitride fielen vor allem Beiträge zur Massivkristallzüchtung von Aluminiumnitrid (AlN) nach dem PVT- und SST-Verfahren auf, in denen Ähnlichkeiten und Unterschiede zur SiC-Massivkristallzüchtung betont wurden.

Der Themenbereich Epitaxie umfasst sowohl die Homoepitaxie von 4H-SiC als auch die Heteroepitaxie von 3C-SiC auf Silizium. In beiden Fällen wird als Epitaxieverfahren überwiegend die Chemische Gasphasenepitaxie (CVD) angewendet, es gibt aber nach wie vor auch Aktivitäten zur Lösungszüchtung. Die Forschungsschwerpunkte liegen bei der Epitaxie auf der Herstellung dicker, niedrig dotierter Schichten mit hoher Ladungsträgerlebensdauer, die als Driftzone in Hochvoltbauelementen benötigt werden, sowie der Steigerung der Wachstumsrate, um die Prozesszeiten verkürzen zu können. Für diese Forschungsschwerpunkte ist die Zugabe chlorhaltiger Precursoren ein aktuelles Forschungsthema, das an mehreren Forschungseinrichtungen wie z.B. der Universität Linköping (Schweden), IMM (Italien) und der Universität Kyoto (Japan) vorangetrieben wird. Ein weiterer wichtiger Forschungsschwerpunkt liegt in der Vermeidung von sog. Basalflächenversetzungen in Epitaxieschichten, da diese die Langzeit-Stabilität von bipolaren Bauelementen limitieren können. Hier werden von den verschiedenen Forschungseinrichtungen unterschiedliche Lösungsansätze verfolgt: die Universität Linköping setzt auf den Einsatz von on-axis Substraten,

da in diesem Fall auf Grund der Wachstumsrichtung keine Basalflächenversetzungen auftreten. Allerdings sind die on-axis Schichten durch eine stark ausgeprägte Oberflächenmorphologie gekennzeichnet, die für spätere Bauelementprozesse nachteilig ist. Das Naval Research Laboratory (NRL, Washington, USA) wendet Wachstumsunterbrechungen an, um die Basalflächenversetzungsdichte in den Epitaxieschichten schrittweise zu reduzieren. Das Fraunhofer IISB hingegen hat in den letzten Jahren gezeigt, dass die Verwendung von off-axis Substraten mit geringen Verkipfungswinkeln von 2° und 4° sowie optimierte Prozessbedingungen ebenfalls zu einer sehr geringen BPD-Dichte < 10 BPDs/cm² führen. Alle genannten Prozessvarianten einschließlich der Chlor-unterstützten Epitaxie dienen auch der Reduzierung der Gesamtdefektdichte, so dass in Zukunft Bauelemente mit größerer Fläche und damit höherer Stromtragfähigkeit hergestellt werden können.

Epitaxieschichten werden von mehreren Substratherstellern sowie von „Foundries“ wie z.B. Ascatron (Schweden) und dem Fraunhofer IISB (Erlangen) angeboten. Neben den meist an Forschungsinstituten eingesetzten Einzelscheibenreaktoren werden von Aixtron, TEL (Japan) und LPE (Italien) auch Mehrscheibenreaktoren angeboten, die bevorzugt von der Industrie eingesetzt werden. Hier stehen, neben den bereits genannten Forschungsschwerpunkten, vor allem technologische Fragestellungen hinsichtlich Schichthomogenität, Scheibendurchsatz und Prozesskosten im Vordergrund.

In den letzten Jahren ist die Lebensdauer der Minoritätsladungsträger in Epitaxieschichten stark in den Fokus gerückt, da diese Materialeigenschaft ein wichtiger Parameter für bipolare Hochvoltbauelemente ist. Die Untersuchung der Ladungsträgerlebensdauer ist eng verknüpft mit der Charakterisierung von Punktdefekten und strukturellen Defekten. Ein Vorreiter in diesem Gebiet ist die Arbeitsgruppe um Prof. Kimoto (Universität Kyoto, Japan), die durch ihre Arbeiten maßgeblich zur Aufklärung von Punktdefekten beigetragen haben und darüber hinaus zeigen konnten, dass – gemäß der Shockley-Read-Hall-Statistik – die Ladungsträgerlebensdauer in n-typ Material durch einen bestimmten Punktdefekt namens Z1/2 limitiert ist. Die Konzentration dieses Z1/2-Defekts, der mit einer C-Leerstelle korreliert ist, kann bei der Epitaxie und nachfolgenden Prozessen kontrolliert werden, so dass auch die Ladungsträgerlebensdauer in bestimmten Grenzen gezielt beeinflusst werden kann. Sofern die Z1/2-Konzentration eine kritische Grenze von etwa 5×10^{12} cm⁻³ unterschreitet, limitieren andere, bislang nicht vollständig aufgeklärte Faktoren die Ladungsträgerlebensdauer. Eine wichtige Rolle spielen hierbei auch strukturelle Defekte wie z.B.

Versetzungen und Stapelfehler. Da diese Defekte als strahlende Rekombinationszentren im indirekten Halbleiter 4H-SiC wirken, können diese Defekte beispielsweise mittels abbildender Photolumineszenz-Verfahren zerstörungsfrei charakterisiert und nachgewiesen werden.

Ein weiterer Forschungs- und Entwicklungsschwerpunkt ist die Zustandsdichte an der SiC/SiO₂-Grenzfläche, die von zentraler Bedeutung für die (Weiter-)Entwicklung von MOS-basierten Bauelementen ist. SiC besitzt gegenüber anderen Halbleitern großer Bandlücke zwar den Vorteil, ein natürliches Oxid zu besitzen, allerdings verschlechtert die Anreicherung von Kohlenstoff aus dem SiC bei der Oxidation die Eigenschaften der Grenzfläche bzw. die Kanalbeweglichkeit der Ladungsträger im SiC unterhalb des Oxids. Hier konnte gezeigt werden, dass durch Zugabe von Stickstoff-tragenden Verbindungen bei der Oxidation die Grenzflächenzustandsdichte signifikant reduziert und die Kanalbeweglichkeit der Ladungsträger erhöht werden kann.

Diese Weiterentwicklungen haben sicherlich dazu beigetragen, dass beispielsweise von Cree Inc. 1200V/50A und 1700V/50A MOSFETs kommerziell erhältlich sind, die vergleichbaren Si-Bauelementen in den elektrischen Eigenschaften deutlich überlegen sind. Ergänzt wird das Angebot an energie-effizienten, leistungselektronischen Bauelementen durch die seit über 10 Jahren erfolgreichen Schottkydioden bis 1700V, die vor allem in hochwertigen Netzteilen für Computer und Server eingesetzt werden. Der Absatz SiC-basierter Leistungsbaulemente ist in den letzten Jahren exponentiell angewachsen und führte natürlich auch zu einem stark ansteigenden Absatz bei dem SiC-Grundmaterial. Dies führte wiederum zu einer Senkung der Substrat- und Bauelementpreise und einer kontinuierlichen Verbesserung der Materialqualität. In naher Zukunft werden neben den MOSFETs weitere Schalter wie z.B. der JFET eingeführt werden, so dass sich auch das Angebot an Bauelementen diversifizieren wird. Die eingangs genannten Fortschritte bei der Materialentwicklung erlauben eine Entwicklung der SiC-Bauelemente hin zu höheren Spannungsklassen und größeren Bauelementflächen. Gerade in Spannungsklassen oberhalb 600V bis in den Kilovolt-Bereich kann SiC seine materialspezifischen Vorteile gut ausspielen und sich von anderen Halbleitern sehr deutlich absetzen. So lässt sich abschließend festhalten, dass das Siliziumkarbid nun die lang ersehnte Marktreife erreicht hat und sich den leistungselektronischen Markt mehr und mehr erschließt. Weitere Informationen zur ECSCRM 2012: www.ecscrm-2012.org

Die nächste „Internationale“ SiC-Konferenz ICSCRM findet 2013 in Japan statt: www.icscrm2013.org.

Bericht zur ECSCRM 2012 vom 2.9.2012 bis zum 6.9.2012 in St. Petersburg, Russland

Thomas Hupfer, Lehrstuhl Materialien der Elektronik und Energietechnik, FAU Erlangen-Nürnberg

Im Vorfeld der 9. europäischen Konferenz über Silizium Carbide wurde ein Tutorial-Day für Nachwuchswissenschaftler veranstaltet, insbesondere für jene, die zum ersten Mal auf einer Konferenz sind, um die Grundlagen zum Thema SiC wieder aufzufrischen und zu erweitern. Etliche bekannte Wissenschaftler gaben sich zu diesem Anlass die Ehre, unter anderem die Professoren Tairov von der St. Petersburg Electrotechnical University und Lebedev vom IOFFE Physical-Technical Institute in St. Petersburg sowie Professor Choyke von der University of

Pittsburgh. Die Vorträge gaben, wenn auch durch technische Probleme beeinträchtigt, einen guten Abriss zu generellen und aktuellen Forschungsgebieten auf SiC.

Eingeleitet wurde die Konferenz durch Prof. Tairov mit einem Vortrag über die historische Entwicklung von SiC, direkt gefolgt von einer Präsentation zum aktuellen Stand der industriellen Fertigung von SiC-basierten Bauteilen vom größten SiC-Wafer Produzenten Cree. Die thematischen Schwerpunkte der Konferenz bzgl. Herstellung von SiC lagen auf der Epitaxie von 4H und

16 3C. Außerdem wurde viel Platz für die Charakterisierung von SiC und für auf SiC basierte Bauteile eingeräumt. Ein weiterer Schwerpunkt lag auf Herstellung und Anwendung von Graphen. Die Massivkristallzüchtung war im Allgemeinen, abgesehen von einigen Projekten zur Züchtung über die flüssige Phase, geprägt von Statusberichten der großen industriellen Waferproduzenten. Der aktuelle Stand kommerziell verfügbarer Wafer liegt bei 150 mm Durchmesser bei einer Mikroröhrendichte von etwa 1 cm^{-2} . Relevante Informationen über Fortschritte im Züchtungsverfahren wurden nicht preisgegeben. Die Vortragsreihe zur Massivkristallzüchtung wurde begonnen mit einer Zusammenfassung von Vorteilen der Züchtung von SiC und AlN in Tiegeln aus Refraktärmetallen, insbesondere Tantal. Dieses reagiert bei hohen Temperaturen mit Kohlenstoff zu TaC und sorgt damit für ein Gleichgewicht zwischen Si und C in der Gasphase. Dadurch wird einem Überschuss an C, bedingt durch Graphitiegel und Graphitisolierung, entgegengewirkt und somit auch die Anzahl an Kohlenstoff-Einschlüssen im Kristall verringert. Zur Herstellung von Graphen wurden sowohl das Verfahren über CVD als auch das Verfahren des Abdampfens von Si aus SiC behandelt. Letzteres führt, wenn auf der Si-Seite von SiC durchgeführt, durch Oberflächenrekonstruktion zu einer ein- bis zweilagigen Graphenschicht. Besonderes Augenmerk lag auf Verständnis und Charakterisierung der Grenzfläche zwischen Graphen und SiC als Schlüssel zur Herstellung von auf Kohlenstoff basierender Elektronik. Durch die Interkalation von Was-

serstoff kann quasi freistehendes Graphen erzeugt werden mit nur noch wenigen Bindungen zur SiC-Oberfläche. Dadurch ändern sich die Zustandsdichte und somit auch die Bandstruktur. Durch die Menge an Wasserstoff kann dieser Effekt kontrolliert werden und ermöglicht so einen Weg zur gezielten Dotierung von Graphen.

Zwei Sessions hatten Epitaxie von SiC zum Thema, einmal mit Schwerpunkt 4H, einmal mit Schwerpunkt 3C. Der Einleitungs-vortrag zur 4H-Epitaxie ging auf die Züchtung unter Zuhilfenahme von Chlorid ein und die dadurch gewonnenen Vorteile einer erhöhten Wachstumsgeschwindigkeit sowie erhöhter Materialqualität. Die übrigen Vorträge zum Thema 4H-Epitaxie zeigten, dass sich dieser Themenbereich stark in Richtung Anwendungen ausrichtet. Dagegen ist der Themenbereich 3C Epitaxie noch geprägt von grundlegenden Fragestellungen. Sowohl die Hetero-Epitaxie von 3C-SiC auf Si als auch die Epitaxie von 3C-SiC auf hexagonalem SiC sind von Interesse. Es wurde gezeigt, dass Korngrenzen-freies 3C-SiC auf 4H-SiC gezüchtet werden kann mittels hot-wall CVD und Chlorid Einsatz. 3C-SiC Massivkristalle konnten noch nicht demonstriert werden.

Ein eigener Beitrag (siehe Seite 34) zum Thema Fast Sublimation Epitaxy von fluoreszierendem SiC wurde als Poster präsentiert. Der Beitrag entstand als Diplomarbeit im Rahmen des NORLED-Projekts, welches mit zahlreichen Beiträgen vertreten war.

I-B-S Fertigungs- und Vertriebs GmbH

für Forschung und Produktion

D-82284 GRAFRATH, Postfach 30

Tel. 08144 / 7656 Fax 08144 / 7857

email: ibs-scholz@t-online.de

Sägen

Innenlochsägen
Periphere Sägen für Längsschnitte
Fadensägen nach dem Läppprinzip
Gattersägen nach dem Läppprinzip

Läppen

IB 400 Läppmaschinen
Tellergrößen von 300 - 400mm
Läppmittelzuführsystem
Abziehringe

Polieren

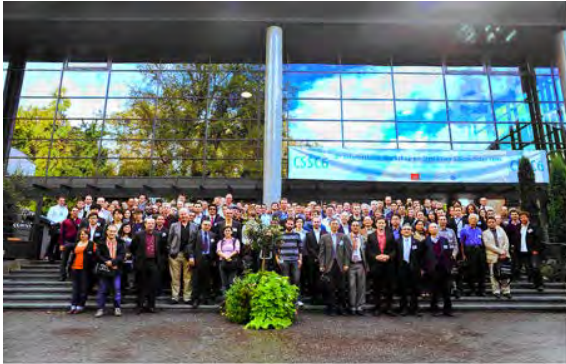
IB 400 Poliermaschine
IB 400 CMP-Maschine
Tellergrößen 300 - 400mm
Slurry- und Chemiepumpen
Jigs, Autokollimatoren

Bitte besuchen Sie unsere Internetseite

www.ibs-grafrath.de

CSSC 6: 6-th International Workshop on Crystalline Silicon Cells

Peter Rudolph, Crystal Technology Consulting Schönefeld



Die Teilnehmer der CSSC-6

Foto: CSSC-6

1. Statistik

Datum: 08.-11. Oktober 2012
 Ort: Aix-les-Bains, France
 Veranstalter: CEA/INES France, Chair: Dr. Anis Jouni
 Homepage: <http://www.ines-solaire.org/anglais/DT1327499185/page/CSSC6>
 Teilnehmer: 181 aus ca. 25 Ländern

Am stärksten vertreten waren Frankreich und Deutschland (FhG IISB Erlangen, THM Freiberg und ISE Freiburg, SolarWorld Innovation, IKZ, PVA Tepla, Bosch Solar Energy, Calisolar, Vario Kristallbearbeitung, CTC). Darüberhinaus waren z.B. vertreten: Japan (zahlreich), Norwegen (zahlreich), Taiwan, Spanien, Schweiz, Italien, NL, Belgien, USA, China und Russland. Es wurden ca. 60 Vorträge gehalten und 38 Poster (über die gesamte Zeit) präsentiert. Unter den relativ wenigen Ausstellern waren vorrangig französische Firmen, wie z.B. ECM, Thermosolar, EAG, INES dazu MERSEN (USA, Fr, China) und SEMILAB (Ungarn).

Die nächste Tagung CSSC-7 findet im Oktober 2013 in Japan statt. Veranstalter ist die Kyushu Universität in Fukuoka (Japan). Chair ist Prof. K. Kakimoto.

2. Abstracts und Proceedings

Alle Teilnehmer erhielten einen Memory Stick mit Konferenzteilnehmern, Programm, Abstracts und 4-seitigen „full papers“ (mit Bildmaterial) der meisten Beiträge. Letztere werden bei AIP (über T. Buonassisi) publiziert. Eine Verbreitung der elektronischen Daten unter den Tagungsteilnehmern wurde von allen gebilligt.

3. Schwerpunkte

In die folgende Auswertung zum Schwerpunkt Kristallisation wurden einbezogen:

1. Crystal growth fundamentals (zur Versetzungsbündelung, Zwillingsbildung und zum Kornwachstum)
2. Cost-effective silicon feedstock (zur metallurgischen Reinigung, Kompensation mit Ga, Ge und zur Plasmareinigung)
3. Advanced ingot crystallization (wandkontaktfreies Wachstum, auch FZ, quasi-mono-Wachstum, Schmelzmischung (mechanisch und Magnetfeld), Wachstumsrate, Versetzungssimulation (nur nach Alexander-Haasen), gezielt homogenes vielkörniges Wachstum).

Nicht ausgewertet, jedoch auf dem Conference-Stick vorhanden sind:

1. Kerfless wafers and recycling (Folienzüchtungen und Abtrennung von Unterlagen, Bänderzüchtung)
2. Novel concepts (epitaktische Abscheidungen, Nanokristallanordnungen, Strukturätzen)
3. Advanced characterization (GDMS, PL-Spektroskopie und -tomographie, laser-induced breakdown spectroscopy)
4. Crystal defects and defect engineering (Preiskalkulationen, Kohlenstoffpräzipitate, point defect engineering, cell passivation)
5. Kristallschnitt: Diamond vs. slurry (Vorteile von Diamantdrähten, Waferbruch).

4. Highlights

- PV-fähiges „feedstock“-Material wird durch Niedertemperatur-Kristallisation aus Al-reichen Schmelzlösungen erhalten (Calisolar u.a.).
- „Co-doping“ (z.B. mit Ga) schiebt den Wendepunkt von n-zu p-Typ in Ingots aus UMG-Material weit an das Blockende (Calisolar u.a.).
- Unter Nutzung von Keimplatten mit defektblockierenden Korngrenzen, sog. „functional grain boundaries“, wie z.B. {310} $\Sigma 5$, wird daran beim Quasimono-Prozess das seitliche Hereinwachsen von Defekten aufgehalten (Tohoku Univ.).
- Der Siemensprozess gibt sich bezüglich Kosten noch nicht geschlagen. Viele Optimierungen, wie Wasserstoffrückfluss und Wärmedämmung, reduzieren den Preis beträchtlich (Polytechn. Univ. Madrid).
- Wiederverwendete Si-Abfälle zeigen nach der Czochralskizüchtung PV-fähige Eigenschaften (ECN Solar, NL).
- FZ kann bei direktem Einsatz der Siemensstäbe, niederen HF-Frequenzen und Züchtung viereckiger Querschnitte deutlich billiger gestaltet werden (IKZ Berlin).
- Kieselglas-Tiegeldeckel und Gastromkontrolle nach Pasteurkolben-Prinzip verringert wesentlich den Kohlenstoff (Sauerstoff)-Gehalt (Kyushu Univ.).
- Das HEM-Erstarrungsprinzip mit konvexer kalottenhafter Interfacewölbung ist beim Quasimono-Prozess vorteilhaft (mehrere Vorträge).
- Sehr gutes G4 - G5 mc-Si-Solarzellmaterial ($\eta = 18\%$) gelingt mit Vielkornstruktur kleiner homogener Kornabmessungen, wobei dazu die Beherrschung der Vielkeimbildung erforderlich ist (Nat. Univ. Taiwan).
- Die Quasimono-Prozessgestaltung gelingt zunehmend in G5-Ingotsgröße (CEA/INES und Pillar Group).
- Neue Möglichkeiten (geringe Waferdicke, erhöhte Scheibenqualität) ermöglicht das Diamantdrahtsägen gegenüber dem konventionellen „slurry“-Drahtsägen.

4. Ausgewählte Vortragsanalyse

Fundamentals:

18 Aus rein chronologischen Gründen beginnt der **Berichtersteller** (BE) mit seinem Beitrag (Eröffnungsvortrag der Tagung), in dem er neben dem Versuch einer Klärung der Gründe für's Versetzungsclustern und deren Klassifizierung in mc-Silizium (Manuskript und Folien sind verfügbar) darauf hinwies, konventionelle Konzepte und Modellierungen durch moderne zu ergänzen bzw. abzulösen, wie irreversible Thermodynamik und Hochtemperatur-Versetzungsdynamik. Es könne nicht sein, dass seit über 30 Jahren immer nur noch das das Kontinuum betreffende Alexander-Haasen-Modell zur Beschreibung der Versetzungsvorgänge herangezogen wird (wie z.B. in den Beiträgen von Kakimoto, Nakano, Black u.a.), welches keine Auskunft über die lokale Interaction-Dynamik sowie das Ensembleverhalten und damit die reale Versetzungsverteilung gibt. Die Metallphysiker und Deformations- bzw. Festigkeitsfachleute seien den Züchtern darin schon weit voraus und es sei an der Zeit, endlich eine Brücke zu ihnen zu schlagen, auch wenn dazu die Numerik sehr komplex und eine hohe Computerkapazität erforderlich ist.

G. Stokkan (Univ. Trondheim, Norway) analysierte die Wechselwirkung zwischen Körnern und Zwillingsbildung. Er unterscheidet je nach Bildungsmechanismus in „ribbon (starke Korndesorientierung), polygon and needle twins“.

Ein interessantes Konzept für ein quasi-monokristallines Wachstum wurde von **K. Katsukake** (Tohoku Univ. Japan) vorgestellt. Es sei ein deutlicher Anstieg des quasi-mono-Marktes für PV-Si zu erwarten. Um das charakteristische seitliche Einwachsen von an der Wand gebildeten polykristallinen Körnern nach erfolgtem monokristallinem Ankeimen am Tiegelboden zu unterbinden, werden (z.T. mehrere nebeneinander gelegte) Bodenkeimplatten mit seitlichen, sog. „functional grain boundaries (GBs)“, wie z.B. $\Sigma 5$, eingesetzt, die davon abweichend orientierte seitlich einwachsende Körner stoppen. Eine solche Eigenschaft weisen z.B. die $\{310\}$ -Flächen auf. Es wurden $<100>$ -Keimplatten mit insgesamt 100mm-breiten Seitenflächen, die in einer Tiefe von 10 mm mit $\{310\} \Sigma 5$ KG versehen waren, getestet. Die gezeigten Abbildungen demonstrierten das Blockieren seitlicher Zwillinge und Multikorn Grenzen und somit ein fehlerfreies fortschreitendes Wachstum des zentralen Ingotgebietes. Dagegen setzte bei Verwendung einer einkristallinen Cz-Keimplatte ohne „functional grain boundaries“ alsbald ein ungebremstes seitliches Einwachsen der Strukturfehler ein. Es werde nach weiteren effektiven GBs gesucht.

Feedstock:

F. Kirscht (Calisolar, Germany) ging auf die enorme Entwicklung zur Reinheitsverbesserung von UMG-Ausgangsilizium während der letzten Jahre ein. Grundproblem sei nach wie vor die Kompensation durch die beiden inhärenten Verunreinigungen B und P. Calisolar favorisiert in Kooperation mit einer kanadischen Firma die Kristallisation aus Al-reicher Schmelzlösung. Hier aus dem „full paper“:

European companies like Elkem and Ferroatlantica have extensively developed slag processing, most successfully used for B removal. Elkem applies also a segregation process and a special chemical cleaning step, so-called acid leaching. Japanese companies including Nippon Steel and Kawasaki Steel have done extensive work on gas and vacuum treatments, the latter including electron beam enhanced degassing resulting in efficient P removal. Plasma treatment is yet another key refinement process aiming predominantly at B removal.

One of today's successful base technologies, developed originally by the Canadian company 6N, starts with generating a silicon-aluminum melt solution generated at much lower temperature than a Si melt, with the obvious advantage of reducing the energy for melt generation. The company has continued UMG-Si development after acquisition by Calisolar and since recently as Silicor Materials. Naturally, here the final removal of aluminum (Al) is most essential besides removing B and P.

Anmerkung des BE: dazu erschien von Yoshikawa and Morita (Osaka Univ., Japan) ebenfalls eine Publikation in *J. Crystal Growth* 311 (2009) 776.

Als sehr günstig erweise sich das „co-doping“ mit Ga, dessen Verteilungskoeffizient viel geringer als jene von P und B ist. Bei 0,22 ppmw B und 0,74 ppmw P genüge eine Zugabe von 0,18 ppmw Ga mit einem viel steileren hinteren Segregationsanstieg, um beide Elemente zu kompensieren und den spez. el. Widerstand nahezu axial homogen auf $1 \Omega \text{ cm}$ bis hin zu $g = 0,9$ zu halten (US Patent 7,651,566 von 2007).

A.-K. Søliland von Elkem Solar Silicon (Norway) berichtete über Zelleffizienzen von 17-17.5% (multi) und 18.3 % (mono) beim Einsatz des neuen rein metallurgisch gereinigten Feedstock-Materials, dessen Produktion im Jahre 2009 aufgenommen wurde. Eine genaue Beschreibung der Methode, darin Segregationsreinigung, findet sich unter *J. O. Odden et al., Photovoltaics International, 45-49, May 2012* (beim BE noch nicht verfügbar). Das Material ist kompensiert auf Grund der Anwesenheit von Akzeptoren und Donatoren. Übergangsmetalle sind weniger als 50 ppb vorhanden. Eine ausführliche Reinheitsanalyse wurde dargestellt. Elkems Feedstock könne mit „Siemensmaterial“ mithalten, sei aber deutlich billiger.

Auch **J. Altenberend** (SiMAP, France) stellte einen metallurgischen Reinigungsschritt ohne CVD-Abscheidung dar (letztere würde u.a. viele toxische Stoffe produzieren). In einer Plasmaflamme mit verschiedenem Wasserstoffanteil wird besonders Bor in flüchtige Verbindungen (BO , BH_2 , BH_3 ...) umgewandelt. Dazu muss die Schmelze elektromagnetisch durchmischt werden (HF-Heizung würde trotz geringer Skintiefe ausreichend sein). Mit dem Programm FactSage werden die Oberflächenreaktionen modelliert, die im Gleichgewicht ablaufen.

Das sich aber der Siemensprozess für die PV noch nicht geschlagen gibt, bewies der Vortrag von **C. Del Canizo** (Polytechn. Univ. Madrid; Spanien). So wird eine Rückführung des kostspieligen hochreinen Wasserstoffs erfolgreich getestet. Verringerte Konvektions- und Strahlungsverluste des CVD-Reaktors senken die Energiekosten.

P. Bronsveld berichtete, dass ihre Firma ECN Solar Energy (The Netherlands) in enger Kooperation mit SINTEF (Norway) an der Si-Rückführung und Wiederverwendung der durch Cz-Schnitte und Ingot-Randabtrennung entstandenen Si-Abfälle arbeitet. Solches p-Material erzielt nach erneutem Ziehen mit der Cz-Methode bis hin zum „tail“-Bereich noch immer eine Effizienz von 18,1 %. Hier beginnen sich die für Cz typische OSF-Ringe (oxydation-induced stacking-fault) auszubilden, die für eine Solarzelle schädlich sind. Während die Sauerstoffkonzentration (O_1) mit 27 ppma für Cz-Material zu hoch ist, ist sie für Kohlenstoff unerwartet gering (0,7 vorn bis 4,0 ppma hinten). Ein „full paper“ wurde nicht geliefert.

Ingot Crystallization:

K. Nakajima (Kyoto Univ., Japan) zeigte weitere Resultate seiner Quasi-Kyropoulos-Züchtung (siehe dazu auch seine neuere

Publikation in *J. Crystal Growth* 344 (2012) 6). Nach dem Ankeimen an der Si-Schmelzoberfläche wird eine Kalotte in die Schmelze hinein kristallisiert und gleichzeitig emporgezogen, so dass es zu keinem Kontakt mit der Tiegelwand kommt. Si₃N₄-Schwimmteilchen der Wandbeschichtung auf der Schmelzoberfläche werden durch Tiegelrotation an den Rand getrieben. Es seien recht lange Kristalle züchtbar, hier mit einem Durchmesser von 25 cm bei einem Tiegelmaß von nur 33 cm (überraschenderweise wird sodann der Kristall sehr schnell von der Schmelzoberfläche abgezogen, was nach Meinung des BE zu zusätzlichen Spannungen und Rückwachsen von Versetzungen in den Kristall führt). Kornwachstum sei so vermeidbar. Nur Zwillinge werden beobachtet, die für Solarzellen unschädlich seien. Eine industrielle Pilotanlage für 450 kg sei im Aufbau.

T. Sekiguchi (Univ. Tsukuba, Japan; Kooperation mit K. Kakimoto) analysierte zylindrische VB Ingots (2 kg, 10 cm Ø) erhöhter Reinheit, kristallisiert unter verringerter thermomechanischer Spannung auf einer (100)-Keimkristallplatte. Um eine niedrige Kohlenstoffkonzentration um $3 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ und glänzende Ingotendflächen zu erhalten, wurden graphitfreie Gaszuleitungen und ein Tiegeldeckel aus Kieselglas verwendet. Geringe Restspannungen wurden bei langsamen Abkühlraten erzielt. Versetzungsbündel bilden sich am Keim und ziehen sich bis oben hin durch.

D. Vizmann (West University of Timisoara, Romania) präsentierte per Vortrag und Poster numerische Modellierungen mechanischer und elektromagnetischer Durchmischungen der Schmelze bei der Ingotkristallisation. Schon geringe Rotationen (5 rpm) eines relativ dünnen Eintauchstabes versetzen eine 38x38x38 cm³ - Schmelze in einen hinreichend guten Durchmischungszustand. Besonders geeignet seien zwei Eintauchelektroden eines angeschlossenen Stromkreises bei gleichzeitiger Wirkung eines stationären vertikalen Magnetfeldes, da neben einer guten Durchmischung auch die Form der Phasengrenze über Elektrodenabstand und Stromamplitude beeinflusst werden kann.

M. Zschorsch (FhG THM Freiberg, Germany) stellte Ergebnisse zur Nutzung eines Wandermagnetfeldes (Standard 50 Hz und 0°, 60°, 180° Phasenschub) bei der Kristallisation von G1-Ingots an der PVA Tepla - Anlage vor. Der Phasenschub erweist sich hilfreich zur Beeinflussung der Phasengrenzform. Es ist klar, dass bei fehlendem Phasenschub (0°) eine höhere Lorentzkraft (77 N/m³) eingekoppelt wird, als bei 180° (19 N/m³), da im ersten Fall eine Passung der drei Phasen und im letzteren Fall eine Aufhebung (vergleichbar mit DC) entsteht. In Kombination mit dem Kühlprozess am Tiegelboden scheint über den Phasenschub eine Kontrolle der Unterkühlung möglich, was bei 0° zu kleinen und bei 180° zu größeren Körnern führt.

M. Azizi vom FhG IISB Erlangen (Germany) stellte Ergebnisse zur axialen Fe-Verteilung in gerichtet erstarrten zylindrischen mc-Si - Modellingsgots (10 cm Ø) als Funktion der Kristallisationsrate vor. Zusätzlich zur Fe-Dotierung wurde auch Bor hinzugegeben. Dabei wurde mit induktiver Heizung eine viel effektivere Durchmischung als mit Widerstandsheizung erzielt. Sogar bei relativ hohen Raten von 3,5 cm/h wurden keine Anzeichen konstitutioneller Unterkühlung gefunden. Allerdings entstanden bei relativ hohen Fe-Konzentrationen axiale Inhomogenitäten und Lebensdauerschwankungen über benachbarte Körner.

Einen Überblick über die Möglichkeiten des Floating-Zone (FZ) - Verfahrens gab **H.-J. Rost** vom IKZ Berlin (Germany). Zweifels-

frei könnten damit sehr PV-geeignete hochqualitative reine und versetzungsfreie Si-Kristalle mit geringsten O- und C-Gehalten hergestellt werden. Noch erweisen sich aber die Kosten dieses Verfahrens als zu hoch. Nun wurde vom IKZ ein „low-cost“ - Konzept erarbeitet, das die folgenden Zielsetzungen vorsieht:

1. Creating of a modified SIEMENS-process adapted to the PV-FZ requirements.
2. Cost reduction by saving mechanical and chemical treatment of the poly-Si (direct transfer technology).
3. Improved crystal growth process stability using reduced RF-frequencies.
4. Better utilization of a given crystal cross-section by the growth of nearly square - shaped FZ- crystals (QFZ).

Im Zuge einer Spannungs- und Frequenzverringung (von 3 auf 1,7 MHz) kann nicht nur der Durchmesser auf 145 mm, sondern auch die radiale Widerstandshomogenität wegen zunehmender Konvektion erhöht werden. Die dabei verstärkt auftretenden Schmelzfluktuationen werden mit einem Strahlungsschild oder noch besser mit einer speziell fokussierten Halogen-Ringlampe gedämpft. Diese Maßnahme erweist sich auch hilfreich bei direktem Einsatz der relativ unebenen Siemensbarren als polykristalliner Nährstab. Schließlich führt die Züchtung viereckiger Stäbe zu einer 30 %-igen Materialeinsparung.

Einen Beitrag zur andauernden hitzigen Diskussion über die Richtigkeit des v/G-Kriteriums (v - Ziehrate, G - Temperaturgradient an der Interface) in versetzungsfreien Si - Cz-Kristallen lieferte **M. Juel** vom SINTEF Trondheim (Norway). Bekanntlich wird das Ggw.-Konzept von Voronkov akzeptiert, wonach bei hohen v/G-Werten Vakanzen, dagegen bei niedrigen Interstitials gebildet werden. Im kritischen Übergangsbereich formiert der Vakanzüberschuss Sauerstoffpräzipitate, die in Solarzellen schädlich sind. Demgegenüber steht die Nggw.-Theorie von Abe, wonach nur der T-Gradient die Punktdefektsituation beeinflusst. Ein weiterer Defekt sind O-bezogene thermische Donatoren als Rekombinationszentren im Si-Band. Es wurden zwei Czochralskiversuche mit unterschiedlichen Ziehrateprogrammen (Cz 1 zunehmend, Cz 2 abnehmend) durchgeführt. Der kritische v/G-Übergang wurde experimentell bestätigt, allerdings unterschied sich dieser um 10 mm vom numerischen, was darauf zurückgeführt wurde, dass die Defektbildung nicht an der Interface sondern erst unmittelbar danach im abkühlenden Kristall stattfindet. Aber noch blieben Fragen offen.

Einen streitbaren Sachverhalt schilderte auch **J. Hofstetter** aus der Gruppe um T. Buonassisi vom MIT Boston (USA), wonach es beim Tempern von Si-Scheiben mit Cu-Beschichtung bei relativ niedrigen Temperaturen um 820 °C zur Versetzungsreduzierung durch Cu-aktivierte Versetzungsannihilation käme. Sodann erhöhe sich die Lebensdauer solcher behandelter Solarzellen. Es wurden Bilder gezeigt, in denen nach der Behandlung keine Versetzungen mehr in den Körnern zu sehen waren. Entsprechend des Diskussionsbeitrages des BE wäre Versetzungsabstand und Diffusionsweg der Cu-Atome bei relativ niedriger Temperatur nicht passfähig. Erst kürzlich zeigte T. Geiger vom FhG IISB beim DGKK-Arbeitskreis, dass sich beim Tempern der spez. elektrische Widerstand und dadurch der selektive Abtrag des Ätzmittels nach Secco verringert. Geeigneter sei das Ätzmittel nach Schimmel, was auch als Nachprüfung sowie TEM-Analysen mit der Gruppe Buonassisi vereinbart wurde.

20 A. Black von der Autonomen Univ. Madrid (Spain) optimierte die deutlich konvexe Phasengrenzgestaltung beim HEM-Verfahren eines 60 kg - Blockes, um die auch gezielt für eine quasi-mono - Kristallisation auszunutzen. Zur Modellierung der thermoelastischen Spannungen und Versetzungsmultiplikation wurde das Alexander-Haasen-Modell herangezogen, das nach Ansicht des Vortragenden nicht ausreiche, lokale Spannungsherde, wie Korngrenzen und Einschlüsse, zu erfassen, weshalb die experimentell ermittelte Versetzungsdichte höher als die modellierte ausfällt.

Auch **S. Nakano** von der Kakimoto-Gruppe (Kyushu Univ. Japan) beschränkte sich bei seiner numerischen Analyse der Versetzungsdichte in VB mc-Si (VB - vertical Bridgman, d.h. mit abwärts fahrendem Tiegel) auf das Alexander-Haasen-Sumino - Modell. Nachdem beim Abkühlen der elastische Stressanteil im HT-Bereich zunächst durch plastische Relaxation, d.h. Versetzungsmultiplikation, abgebaut wird, steigt er mit abnehmender Temperatur wegen der reduzierten Versetzungsbewegung wieder an. Ein gutes „Cooling down-Engineering“ ohne Temperatursprünge sei notwendig.

K. Kakimoto (Kyushu Univ, Fukuoka, Japan) gab in bewährter Weise einen Überblick über numerisch gestützte noch zu lösende Schritte bei der Ingotkristallisation, wie zulässige optimierte Versetzungsdichte, Sauerstoff-, Kohlenstoffkonzentration, Präzipitate, Ankeimen beim Quasi-Mono-Prozess mit mehreren parallelen Keimplatten, Unterdrückung der Fremdkeimbildung an der Containerwand, konvexe Phasengrenze von einem zentralen Keimort ausgehend (HEM-ähnlich), was er favorisiert. Es können geringe C-Konzentrationen ($< 10^{14} \text{ cm}^{-3}$) erzielt werden, wenn der Tiegel mit einer Kieselglasplatte abgedeckt und die Reinheit des Gasstromes nach dem Pasteur-Kolbenprinzip kontrolliert wird. Einen wichtigen Platz nahm die axiale Fe-Verteilung ein. Während des Ankeimvorganges kommt es zur Fe-Rückdiffusion in die Keimplatten, was geringe Haltezeiten erfordert und die Wiederverwendung der Keime infrage stellt.

Einen Höhepunkt stellte der Vortrag von **Ch.-W. Lan** (Nat. Taiwan University) dar, der einen diametralen Weg zur Quasimono-Methode verfolgt. Ohne auf technische Details einzugehen, zeigte er Ingots mit durchgehend relativ kleinen homogenen Korngrößen, mit denen Solarzelleneffizienzen um 18 % erreicht werden, ohne das Keimplatten eingesetzt werden. Es erweist sich, dass die Korngrenzen in solchen homogenen Strukturen keinen bedeutenden Einfluss (wie z.B. Versetzungsbündel bei großen Körnern oder einkristallinen Ingots) auf die Zelleffizienz haben. Allerdings sei die Steuerung der Unterkühlung als eine Vielkeimmaßnahme sehr schwierig. Stattdessen wird die „Hot zone“ optimiert und „templates“ für eine gleichmäßige Vielkeimbildung am Tiegelboden verwendet. In seinem „full conference paper“ fasst er zusammen:

It was found that the control of undercooling for nucleation was difficult, even though some good ingots could be grown, but the yield was low. However, with a seeded/self-seeded, templates, or notched crucibles, it was possible to have controllable nucleation. Recently, a few Taiwanese and Chinese companies have similar products with uniform grain structures in the market, e.g., M3 wafers from LDK solar, and their solar cell performance is also very impressive.

In einer anschließenden Diskussionsrunde informierte Lan über seine sehr enge Zusammenarbeit mit der taiwanesischen Industrie. Er erhalte die Gelegenheit, wöchentlich 1-2 Tests an großtechnischen Anlagen (450 und 600 kg) durchzuführen.

E. Pihan (CEA/INES-RDI, LITEN/DTS, Le Bourget du Lac, France) legte die beachtlichen Ergebnisse zur Kristallisation quasimono-kristalliner G2- und G5-Ingots (55 und 403 kg aus „electronic grade feedstock“, respektive) dar. Als Keimplatten wurden $<100>$ 8-Zoll-Cz-Wafer der Dicke 2 cm (27 kg für G5) in Vesuvius-Containern eingesetzt. Das Anschmelzen wurde mittels „quartz rod dipping“ kontrolliert. Wichtig sei die durchgehende Einhaltung einer konvexen Interface, um seitliches Polywachstum zu verhindern. Während bei konvexer Phasengrenze der Sauerstoff unter 10^{17} cm^{-3} über die G2-Ingotshöhe gehalten wurde, war sie für Kohlenstoff recht hoch (im Bereich $4-6 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$), was auf eine C-Sättigung der Schmelze hindeutet. Die geringe Ladungsträgerlebensdauer am Tiegelboden wird nicht auf Fe sondern auf einen noch zu identifizierenden kontaminierenden Fremdstoff hingeführt. Ein monokristalliner Longitudinalschnitt eines G5-Blocks war beeindruckend. Angaben zur Versetzungsdichte erfolgten nicht.

J.M. Parras (DC Wafers Investments, S. L. Valdelafuente, León, Spain) wies in seinem Vortrag über ebenfalls quasimono kristallisierte G5-Blöcke auf folgende noch zu überwindende Probleme hin: - das oftmalige seitliche polykristalline Einwachsen und - der relativ hohe thermomechanische Stress in solch großen Ingots. Dennoch seien Zelleffizienzen wie mit Cz-Material erzielbar. Auf die Entstehung von Versetzungssträngen und deren Beeinflussung, die an den desorientierten Nahtstellen der Keimplatten zustande kommen, ging **M. Trempa** vom FhG IISB Erlangen (Germany) ein. Dazu wurden die Untersuchungen in einem zylindrischen Container mit $<100>$ und $<111>$ Keimen durchgeführt. Es wurde stets ein polykristalliner Rand beobachtet, in dem die Defekte (zumeist Zwillinge) unter einem bestimmten Winkel (45° im $\{100\}$ - und 35° im $\{110\}$ -Schnitt) einwachsen. Ein quasi-einkristallines Wachstum sei in Zukunft möglich.

Zu einem ähnlichen Ergebnis gelangt **I. Buchovska** (Pillar Group, Kiev, Ukraine) an G5-Ingots. Ein Bild zeigt, wie zwar die Versetzungsauffächerung gering gehalten werden kann, dafür aber seitliches Polywachstum einsetzt. Es wird eine Zelleffizienz von 18,8 % erzielt.

Wegen der Nähe des Interessengebietes des BE sei hier noch auf ein Poster von **M. Cablea** et al. (SIMAP/EPM - CNRS, France) hingewiesen, in dem der Einfluss eines modulierten Wander magnetfeldes (traveling magnetic field - TMF) auf die Verteilung metallischer Verunreinigungen in VB-kristallisiertem mc-Si untersucht wird. Moduliert wird die Feldrichtung, indem Auf- und Abwärtsverlauf alle 30 s umgeschaltet werden. Dazu wird eine Bitter-Magnetanordnung verwendet, bestehend aus vertikal gestapelten Cu-Scheiben, in denen der Stromfluss schleifenähnlich verläuft, wodurch enorm hohe Lorentzkräfte erzielt werden. Der Phasenversatz beträgt 60° . Magnet und Widerstandsheizter sind getrennt ausgeführt. Entsprechend der ersten Tests nähert sich die axiale Verteilungskurve bei unmoduliertem, nur abwärts gerichtetem TMF der Scheil-Kurve mehr als im modulierten Fall. Der Einfluss auf die Interface-Stabilität und Korngröße soll noch untersucht werden. Als Anmerkung sei die relevante Patentanmeldung des FV Berlin DE 10 2008 027 359 B4 vom 04. 06. 2008 identischen Anspruchs genannt.

Neue Mitglieder 2012

Wir begrüßen ab dem 16.06.2012 als neue Mitglieder (Stand 30. November 2012):

Herr M.Sc. Markus Gellesch	Leibniz Institut für Festkörper- und Werkstoffforschung (IFW) Dresden
Herr Dipl.-Phys. Benjamin Hertweck	Universität Erlangen
Herr Prof. Dr. Rüdiger Klingeler	Institut für Physik Universität Heidelberg
Herr Prof. Dr. Cornelius Krellner	Goethe-Universität Frankfurt/Main
Herr Ph.D. Satya Kumar Kushwaha	National Physical Laboratory New Delhi, Indien
Herr Prof. Chung-Wen Lan	National Taiwan University Taipei, Taiwan
Herr Dipl.-Phys. Christoph Neef	Kirchhoff Institut für Physik Universität Heidelberg
Herr M.Sc. Daniel Oriwol	SolarWorld Innovations GmbH Freiberg
Frau Dipl.-Min. Claudia Schmid	Fraunhofer Institut für Solare Energie Freiburg
Frau M.Sc. Judith Schwerin	Ludwig-Maximilians-Universität München

Am Rande der IWMCG 7 wird Prof. Chung-Wen Lan vom Vorsitzenden der DGKK, Dr. Jochen Friedrich, als neues Mitglied der DGKK begrüßt.



Material-Technologie & Kristalle für Forschung, Entwicklung und Produktion

- ▲ Kristallzüchtungen von Metallen, Legierungen und Oxiden
- ▲ Kristallpräparation (Formgebung, Polieren und Orientieren)
- ▲ Reinstmaterialien (99,9 – 99,99999 %)
- ▲ Substrate (SrTiO₃, MgO, YSZ, ZnO, Al₂O₃, etc.)
- ▲ Wafer (Si, Ge, ZnTe, GaAs und andere HL)
- ▲ Sputtertargets
- ▲ Optische Materialien (Fenster, Linsen, etc.)
- ▲ Auftragsforschung für Werkstoffe und Kristalle



MaTeCK

Im Langenbroich 20
52428 Jülich
Tel.: 02461/9352-0
Fax: 02461/9352-11
eMail: info@mateck.de

Besuchen Sie uns im Internet (inkl. Online-Katalog):
www.mateck.de

22 Summer School on Crystal Growth and Photovoltaic Materials, Brasov, August 2012

7th International Conference on Advanced Materials, ROCAM 2012

Radosław Zwierz and Krzysztof Kachel, Leibniz-Institut für Kristallzüchtung (IKZ), Berlin

In late August 2012 the Romanian city of Brasov hosted two scientific events in the field of crystal growth. The second edition of International Summer School on Crystal Growth and Photovoltaic Materials, Aug 27th- Sep 1st, combined with the 7th International Conference on Advanced Materials, ROCAM 2012, Aug 28th – Aug 31st, both of which took place in International Conference Centre of Transylvania University.

The International Summer School on Crystal Growth and Photovoltaic Materials was organized by Romanian Materials Science – Crystal Growth Society, German Association for Crystal Growth (DGKK), Transylvania University of Brasov, University of Brasov (Faculty of Physics), National Institute of Materials Physics (NIMP) in Bucharest and sponsored by International Union of Crystallography (IUCr) and Executive Agency for Higher Education, Research, Development and Innovation Funding (UEFISCDI).

The International Summer School in Brasov covered wide range of topics of modern crystal growth technology, from theoretical to experimental point of view. The comprehensive set of lectures on diverse growth methods, materials characterization, applications and crystal growth modelling was an immense source of knowledge, not only for beginners in the enthralling field of crystal growth science and technology but also for more experienced students.

In the opening lecture Thomas Kuech (Department of Chemical and Biological Engineering University of Wisconsin – Madison, Madison, USA) presented lecture titled: "Some Fundamentals of Epitaxy", containing overview of epitaxial growth techniques and some of the current challenges in this field. The remaining lectures were divided into two parts, both conducted by a truly international group of scientists.

The first part: Crystal Growth – Fundamentals and Applications, was presented by the following lecturers: Detlef Klimm (*Leibniz Institute for Crystal Growth, Berlin, Germany*), Thierry Duffar (*Grenoble institute of Technology, Grenoble, France*), Jochen Friedrich (*Fraunhofer IISB, Erlangen, Germany*), Roberto Fornari (*Leibniz Institute for Crystal Growth, Berlin, Germany*), Peter Rudolph (*Crystal Technology Consulting, Schönefeld, Germany*), Horia V. Alexandru (*University of Bucharest, Bucharest, Romania*), Alain Ibanez (*Institut Néel, CNRS and Université J. Fourier, Grenoble cedex 9, France*), Joe Greene (*University of Illinois, Urbana, Illinois, USA*), Wolfram Miller (*Leibniz Institute for Crystal Growth, Berlin, Germany*), Jeffrey J. Derby (*University of Minnesota, Minneapolis, USA*), Daniel Vizman (*West University of Timisoara, Timisoara, Romania*), Christiane Frank-Rotsch (*Leibniz Institute for Crystal Growth, Berlin, Germany*), Hanna Dąbkowska (*Brockhouse Institute of Materials Research, Hamilton, Canada*), Matthias Bickermann (*Leibniz Institute for Crystal Growth, Berlin, Germany*), Kevin Roberts (*University of Leeds, Leeds, UK*), Tatau Nishinaga (*The Uni-*

versity of Tokyo, Tokyo, Japan). The lectures presented in this part of the Summer School concentrated mainly on the crystal growth from the melt, describing methods such as Czochralski, Floating Zone and Vertical Gradient Freeze. Moreover, there were also few lectures given on modern epitaxial growth techniques. During 75 minutes long talks the lecturers spoke not only about fundamentals, but explained in details also more complex problems.

The second part was devoted to materials used in photovoltaic applications, their growth and characterization, as well as technological processes in preparation of the solar cells. The lectures were delivered by: Martin Green (*University of New South Wales, Sydney, Australia*), Koichi Kakimoto (*RIAM, Kyushu University, Kasuga, Japan*), Georg Müller (*Crystal Consulting, Langensendelbach, Germany*), Sefik Suzer (*Bilkent University, Ankara, Turkey*), Thomas Kuech (*University of Wisconsin – Madison, Madison, USA*), Stefan Antohe (*University of Bucharest, Bucharest-Magurele, Romania*) and John Preston (*McMaster University, Hamilton, Canada*). The lectures of this session addressed for instance: thermodynamics in crystal growth, different methods of growth from the melt, highlighting application of magnetic field to control it, solution growth and sublimation growth methods.

During the Summer School special social program the participants got the great opportunity to visit the famous Bran Castle, find out whether it used to be a Dracula's home and admire a beautiful view over Brasov from the mountains surrounding the city.

This year the Summer School was for the first time held in parallel with ROCAM conference (Romanian Conference Series on Advanced Materials). It was organized in the way that students had a possibility to attend plenary sessions, where most of the summer school lecturers presented state of the art of their speciality. Moreover, the students could mingle with more experienced researchers and presented their own results in the form of talk or poster.

The International Summer School in Brasov was a great opportunity to broaden knowledge in the very challenging field of crystal growth. All of the students, both beginners and those more experienced ones, had a possibility to make themselves more familiar with problems existing in the growth techniques used by their colleagues. Moreover, the international environment facilitated meeting the young scientists from all over the world and establishing international contacts, which might result in a future cooperation. Therefore, we would like to recommend to all young scientists, both PhD and master students, who think seriously about their scientific carrier, to take part in such a great event. At this point we would like to drag your attention to the next summer school - 15th International Summer School on Crystal Growth, 4th - 10th of August 2013 in Gdańsk, Poland.

A way to new crystals



SCIDRE
SCIENTIFIC INSTRUMENTS DRESDEN GMBH



The high pressure crystal growth furnace by Scidre

The HKZ offers a broad range of properties, which no other furnace covers:

- pressure range from 10^{-3} mbar to 150 bar
- several gases like argon, oxygen, nitrogen⁺ and other
- high pressure cleaning device for argon
- static atmosphere or gas flow from 0.2 mlmin^{-1} to 1 lmin^{-1}
- optical heating with two ellipsoidal mirrors in a vertical allignment
- lamp power 3, 5, 7 kW
- smooth energy adjusting via power shutter
- temperatures up to 3000°C
- patented temperature measurement during crystal growth⁺
- growth speed from 0.1 to 200 mmh^{-1} and fast manipulation for setup
- rotational speed adjustable between 0 and 150 rpm

Scientific Instruments Dresden GmbH
Großenhainer Str. 101
01127 Dresden

Tel.: 0351 - 821 131 40
E-Mail: info@scidre.de

⁺option

24 Grenzen überwinden – Höchstdotierte Siliciumkristalle für sparsamere Netzteile und effizientere Motorsteuerungen

Energiesparen ist einer der wichtigsten Hebel, um eine bezahlbare Energiewende zu ermöglichen. Speziell durch intelligente Leistungselektronik kann der Energieverbrauch von Netzteilen oder Elektromotoren erheblich gesenkt werden. Dafür werden Siliciumkristalle mit einem sehr geringen elektrischen Widerstand benötigt, um die elektrischen Schaltverluste in den Leistungsbau-elementen zu minimieren. Die Herstellung von hoch leitfähigen Siliciumkristallen ist heute noch extrem anspruchsvoll. Gemeinsam mit der Freiburger Siltronic AG erforscht das Fraunhofer Technologiezentrum Halbleitermaterialien THM in Freiberg im Projekt PowerOnSi die wissenschaftlich-technischen Grundlagen, um kostengünstig Siliciumkristalle mit extrem geringen elektrischen Widerständen herstellen zu können, so dass der Einsatz von Leistungselektronik zum Energiesparen auf breiter Ebene weiter vorangetrieben wird. PowerOnSi wird vom Sächsischen Ministerium für Wissenschaft und Kunst gefördert, das Projekt begann am 1. Oktober 2012.

Bei der Erzeugung, Übertragung und Wandlung elektrischer Leistungen dominiert die auf dem Halbleitermaterial Silicium basierende Leistungselektronik. Speziell für Anwendungen bei niedriger bis mittlerer Leistung und mittleren bis höheren Frequenzen, beispielsweise in Schaltnetzteilen, Robotern, Autoelektronik oder zur Ansteuerungen von Motoren, kommen sogenannte PowerMOS-Bauelemente zum Einsatz. Um die Widerstandsverluste von vertikalen leistungselektronischen Bauelementstrukturen in Durchlassrichtung zu minimieren, werden insbesondere n-Typ-Siliciumkristalle mit einem sehr geringen elektrischen Widerstand von 5.0 m Ω cm bis hin zu 1.0 m Ω cm benötigt. Die Siliciumkristalle werden nach dem Czochralski-Verfahren durch Ziehen aus der Siliciumschmelze hergestellt. Den niedrigen elektrischen Widerstand im einkristallinen n-Typ-Silicium erreicht man dabei durch eine gezielte Zugabe von Arsen oder Phosphor als Dotierstoff. Die hohen Mengen an benötigtem Dotierstoff können jedoch beim Herstellungsprozess kristallwachstumsinduzierte Störungen verursachen, wie z.B. Versetzungen im Kristall. Die Kristallfehler führen zum Verlust der einkristallinen Struktur des Siliciums und vermindern die Kristallausbeute, wodurch im Endeffekt der erzielbare Widerstandsbereich begrenzt wird. Für die beobachteten Störungen existieren zwar verschiedene Erklärungsansätze, jedoch sind weder die genauen Ursachen bekannt, noch gibt es etablierte, verfahrenstechnische Lösungsansätze für die Herstellung größerer Kristalldurchmesser.

An diesem Punkt setzen die Experten des Fraunhofer THM und der Siltronic an. Sie untersuchen systematisch die Grundlagen der kristallwachstumsinduzierten Störungen beim Ziehen von hochdotierten Siliciumkristallen und bestimmen die prozess-technisch relevanten Parameter. Nur auf Basis einer soliden wissenschaftlichen Kenntnis der Grenzen des einkristallinen Wachstums von hochdotiertem Silicium können entsprechende kristallzüchterische Maßnahmen entwickelt und erprobt werden, um das untere Widerstandslimit bei großen Kristalldurchmessern abzusenken und die Kristallausbeute zu steigern. Eine weitere Schwierigkeit, die die Forscher überwinden müssen, ist die Suche nach geeigneten Analysemethoden für die hochdotierten Materialien:

„Während bei niedrigen Dotierungen seit Jahrzehnten verschiedenste Messverfahren etabliert sind, um die unterschiedlichen physikalisch-chemischen Eigenschaften des Siliciums umfassend zu bestimmen, funktionieren diese aufgrund physikalischer Gründe meist nicht bei höchstdotiertem Material“ erklärt Dr. Jochen Friedrich, Sprecher des Fraunhofer THM und Leiter der

Abteilung Kristallzüchtung am Fraunhofer IISB in Erlangen, einem der Mutterinstitute des THM.

„Deshalb werden wir auch neue Messverfahren austesten und genau untersuchen, ob sich damit die relevanten Eigenschaften von hochdotiertem Material bestimmen lassen“, so Dr. Jochen Friedrich.

„Dieses Projekt ist für Siltronic aus zwei Gründen interessant“, sagt Dr. Andreas Mühe, Leiter Operations Deutschland, Siltronic AG und Werkleiter des Standortes Freiberg. „Erstens ist Siltronic ein führender Hersteller von Siliciumwafern für Leistungselektronik und zweitens ist Siltronic tief in der Region Freiberg verwurzelt. Daher freuen wir uns ganz besonders, unseren Anteil zum Gelingen dieses spannenden Forschungsvorhabens beizutragen.“

Zwei Jahre haben die Forscher von Fraunhofer THM und Siltronic jetzt Zeit, um wissenschaftlich-technische Lösungen zu erarbeiten, damit die Herstellung von Siliciumkristallen mit sehr geringen elektrischen Widerständen für PowerMOS-Anwendungen wirtschaftlicher wird. Nicht zuletzt dadurch wird die Position des Industrie- und Forschungsstandortes Freiberg als Zentrum der deutschen Halbleitermaterialherstellung weiter gestärkt.



Die Anfangsstücke von Siliciumkristallen mit unterschiedlichen Kristalldurchmesser und daraus gefertigten Wafern sowie das Ausgangsmaterial für die Siliciumkristallherstellung Foto: Fuchs/Fraunhofer IISB

Ansprechpartner:

Dr. Jochen Friedrich

Fraunhofer IISB

Schottkystraße 10, 91058 Erlangen, Germany

Tel.: +49-9131-761-270

Fax: +49-9131-761-280

E-Mail: info@iisb.fraunhofer.de

Bessere Siliziumkristalle für eine bezahlbare Energiewende Kristallzüchter des Fraunhofer IISB mit dem Ulrich-Gösele-Young-Scientist-Award ausgezeichnet

Dr.-Ing. Christian Reimann vom Fraunhofer-Institut für Integrierte Systeme und Bauelementetechnologie IISB wurde am 10. Oktober 2012 mit dem Ulrich-Gösele-Young-Scientist-Award ausgezeichnet. Die während der internationalen Konferenz „Crystalline Silicon for Solar Cells“ in Aix les Bains in Frankreich vor 200 Kristallzüchtungsexperten verliehene Auszeichnung würdigt Reimanns herausragende Beiträge zur Steigerung der Materialqualität von multikristallinen Siliziumkristallen. Multikristalline Siliziumkristalle bester Qualität ermöglichen die kostengünstige Herstellung hocheffizienter Solarzellen.

Dr.-Ing. Christian Reimann hat sich intensiv mit der Entstehung von Materialfehlern beschäftigt, die bei der Herstellung von Siliziumkristallen nach dem Prinzip der gerichteten Erstarrung durch leichte Elemente wie Sauerstoff, Stickstoff und Kohlenstoff verursacht werden. Die Materialfehler führen zu Ausbeuteverlusten bei der industriellen Produktion multikristalliner Wafer und verschlechtern die Eigenschaften der Solarzellen. Mit einer von Reimann entwickelten Methode wird während des Kristallherstellungsprozesses der Eintrag der für die Materialdefekte verantwortlichen Verunreinigungen in das Silizium reduziert und somit die Bildung schädlicher Kristallfehler unterdrückt. Das Verfahren wurde in der Zwischenzeit patentiert.

„Eine intelligente Gasströmung sowie ein intensives, aber kontrolliertes Rühren der 1400°C heißen Siliziumschmelze beim Erstarrungsprozess sind die zentralen Hebel, um die Bildung der durch Kontamination mit Kohlenstoff und Stickstoff verursachten Ausscheidungen zu verhindern, wie er es in seinen systematischen Untersuchungen als einer der ersten weltweit herausgefunden hat“, erläutert die Jury des Ulrich-Gösele-Awards die herausragenden Leistungen von Dr.-Ing. Christian Reimann im Bereich der Solarenergieforschung bei der Preisverleihung. Die Arbeiten entstanden in enger Zusammenarbeit mit der Entwicklung und

Fertigung der SolarWorld AG, bei der seine Erkenntnisse bereits praktisch umgesetzt wurden. Im Ergebnis der Forschungsarbeiten können somit die Kosten für die Gewinnung von Solarstrom weiter gesenkt werden, ein wichtiger Beitrag für die erfolgreiche Umsetzung der Energiewende.

Der Ulrich-Gösele-Young-Scientist-Award wird seit 2011 an junge Wissenschaftler verliehen, die herausragende wissenschaftlich-technische Beiträge auf dem Gebiet des Silizium-Grundmaterials, der Kristallzüchtung von Siliziumkristallen, der Herstellung von Silizium-Wafern oder des so genannten Defect Engineering von Silizium für Photovoltaikanwendungen erzielt haben. Der Preis ist nach Prof. Dr. Ulrich Gösele benannt, der auch nach seinem Tod als einer der renommiertesten Wissenschaftler weltweit auf dem Gebiet der Halbleiterphysik und -technik gilt.

Ansprechpartner:

Dr. Jochen Friedrich
Fraunhofer IISB
Schottkystraße 10, 91058 Erlangen, Germany
Tel.: +49-9131-761-269
Fax: +49-9131-761-280
E-Mail: info@iisb.fraunhofer.de



Preisträger und Laudatoren des Ulrich-Gösele-Young-Scientist-Awards bei der feierlichen Preisverleihung in Aix les Bains (v.l.n.r.): Prof. Chung-Wen Lan aus Taiwan (National Universität Taiwan, Jury-Mitglied), Dr. Jean-Paul Garandet (CEA-INES, Jury-Mitglied), Dr. Christian Reimann (Fraunhofer IISB), Dr. Jochen Friedrich (Fraunhofer IISB), Prof. Tonio Buonassisi (MIT, Jury-Mitglied), Dr. Anis Jouini (CEA-INES, Organisator der Konferenz)



Dr. Christian Reimann während seiner Dankesrede anlässlich der Preisverleihung. Im Hintergrund von links Dr. J.-P. Garandet (Mitglied der Fachjury) und Dr. A. Jouini (Konferenzorganisator)

26 Fourth European Conference on Crystal Growth (ECCG-4) in Glasgow

Wolfram Miller, Leibniz-Institut für Kristallzüchtung (IKZ), Berlin



Reception at Barony Hall.

Foto: ECCG4

More than 20 years after ECCG-3, which was held 5th-11th May 1991 in Budapest, a principal successor took place on 17th-20th June 2012 in Glasgow. The idea for the revival of a European conference came from the British Association for Crystal Growth (BACG) and here namely from Kevin Roberts. At the EACG meeting in Berlin (October 2010) the final decision on launching the European Conference again was made and the date for ECCG-4 was fixed (see DGKK-MB No. 91/2010 pgs. 25-26). The start was a great success: 231 delegates participated in the conference. In total 24 European countries were presented at the conference by delegates, which made a genuine European one. Naturally, the strongest group was that from UK (60 participants) followed by the Germans (41 participants). The conference attracted also participants from eight countries outside Europe.

Except for plenary lectures, the programme was arranged in two parallel sessions. After opening the first plenary talk was given by Roberto Fornari (Leibniz-Institute for Crystal Growth, Berlin) on recent developments in bulk crystal growth supported by numerical simulations. The latter comprise thermodynamic calculations, temperature calculations in complex environments and computation of melt flow.

This overview was followed by a non-scientific presentation. Dr. Marcin Sadowski from the European Commission gave an introduction into the main outline of horizon 2020, the successor of Framework Programme FP7. The presentation was focussed on material research – he is in the Unit G3 – Materials of the Directorate Generale Research & Innovation in Brussels. (General information can be found on www.ec.europa.eu/research/horizon2020). The talk was followed by a discussion in a smaller group, the council of the European Network of Crystal Growth and some other active in European research affairs. Though material research is needed for nearly all developments in modern industry it is difficult to promote our interests. The principal problem with European projects is the exclusion of successor ones. i.e. there is no way to develop materials in a first project followed by device development. Further complication is coming from the fact that in Europe companies are typically divided in those active in materials production and those producing devices, modules, etc.. However, it is evident that more and more money for research will be distributed via European Commission and therefore it is a need to explain the background of materials research to the public in order to get a better standing.

Two other plenary talks were given Jacek Baranowski (Institute of Electronic Materials, Warsaw) on „Epitaxial Graphene Growth“ and Stéphane Veesler (CINaM-CNRS, Marseille) on „Predictive Nucleation of Crystals“. Jacek Baranowski gave a nice overview

and reminds us that the band structure of graphene was already predicted in 1947 by P. R. Wallace (Phys. Rev. 71, 622)! He presented two ways of getting graphene: chemical vapour deposition on metals and on SiC. In the latter case, a buffer layer with sp³-hybridization is formed directly on SiC but the second layer is already graphene. With all kind of methods only polycrystalline graphene can be produced, which limits the carrier mobility. However, a high carrier mobility is needed for most of the electronic devices. Growing single crystals is the goal and the challenge.

Stéphane Veesler showed how nucleation can be induced by an electrode with a sharp tip in solution growth. Using in-situ observation it can be nicely seen how different the evolution of crystallites is with different voltages applied.

Another 13 invited talks were given, equally distributed over the different topics of the conference. They reflect the diversity in the field of crystal growth:

- Crystal nucleation kinetics in confined systems by Z. Kozišek (Institute of Physics AS CR, Praha)
- High pressure crystal growth of complex perovskites by Edmondo Gilioli (IMEM-CNR, Parma)
- Preferential crystallisation – from classical to advanced process concepts by Guillaume Levilain (MPI für Dynamik komplexer technischer Systeme, Magdeburg, Germany)
- Continuous crystallization and downstream processing by Johannes Khinast (Institute of Process and Particle Engineering, Graz)
- Manipulating colloidal crystallization with external fields by Michiel Hermes (Debye Institute for Nano Materials Science, Utrecht)
- Mechanisms of mesocrystal formation by Helmut Cölfen (Universität Konstanz)
- The route to crystallization: what structural studies of solutions can tell us about solvation as a barrier to crystal nucleation and growth by Dan Bowron (Rutherford Appleton Laboratory, UK)
- Isomorphism in terms of crystallogeneses: specificity of phenomena, kinetic laws, and growth mechanisms by Arkady Glikin (St. Petersburg University)
- Interaction of dislocations and point defects – influence of defect patterning by Hartmut S. Leipner (Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg)
- Crystallography and hierarchical architecture of calcium-carbonate based biomaterials – implications for their formation and morphologic control by Wolfgang Schmahl (Ludwig-Maximilians-Universität, München)
- Nanostructuring through electrochemical nucleation and growth: the challenge of some practical systems by V. Tsakova (Bulgarian Academy of Science, Sofia)
- From needle crystals to spherulites: Phase-field modeling of complex solidification morphologies by László Gránágy
- Crystal nucleation, polymorphism & self-association by Joop H. ter Horst (Delft University of Technology)

Another 64 contributed talks and 140 posters completed the program.

The following can give only some spots of the subjects presented at the conference.

CdZnTe is still or again a hot topic. Jeffrey Derby (University of Minnesota) presented simulations of melt flow and tested the influence of a travelling magnetic field (TMF). Using 300 A and 500 Hz for the TMF no effect could be seen – the buoyancy forces were dominant. A different approach is used by Avetissov and Zharikov (Mendelev University, Moscow). They apply vibration to the melt flow, which influence not only the melt convection but probably also the melt structure in front of the crystal (see also paper at CrystEngComm online DOI: 10.1039/C2CE26202A). Ernesto Dieguez and co-workers use superheating and SiC cold finger to enhance quality.

The use of external fields was also subject of some contributions. Travelling magnet fields (TMFs) can be used for different purposes: high TMF for influencing strong buoyancy convection in Czochralski growth (Miller et al., Institute for Crystal Growth, Berlin), low fields in vertical gradient freeze growth to tune the interface shape near the crucible (Frank-Rotsch et al., Institute for Crystal Growth, Berlin). Using TMF for Bridgman growth of CdZnTe was already mentioned above. Electrostatic fields play an important role for organic and bio-crystals. Such fields (up to 8~kV) can help to control polymorphism and to increase the growth rate.

Radscii and coworkers (Delft University of Technology) showed an increase of the growth rate from 8 $\mu\text{m}/\text{min}$ without to 130 $\mu\text{m}/\text{min}$ with electric field. In a more academic way electric fields can be applied for manipulating the crystallisation of colloidal suspensions, which are used as a model system to understand nucleation and growth.

There were contributions on nitrides but rather limited with respect to their importance. This community has its own conference (International Workshop on Nitride Semiconductors) which might be the reason for the limited participation in ECCG-4.

Several contributions were about fundamentals of crystallisation especially for organic materials. The British organization for Crystal Growth (BACG) is very active in the field of crystals for pharmaceuticals – in contrary to the DGKK. Therefore, the conference attracted many people from this field. On fundamental level the problems are pretty much the same for all three fields:

mass crystallisation, bulk crystal growth, and epitaxy. Bringing together people from these different directions was the great success of the conference. In the good English and Scottish tradition everything was organized on the campus: rooms for staying were available, the lunch was served in Lord Todd Building near to the lecture hall. Also the conference dinner was on the campus, in the stunning Barony hall, a former church. The dinner was followed by performing Scottish dances. The performers were the participants of conference themselves, guided by the BIGShoogle ceilidh band. Concluding many pros but there were also some cons as for instances poster and exhibition rooms were too small.

Nevertheless, altogether the revival of the European Conference on Crystal Growth was a great success. Therefore, the council of the European Network of Crystal Growth (ENCG) decided to continue the series. The ballot went for Bologna. Andrea Zaplatini and Giuseppe Falini will be the chairmen of ECCG-5 in 2015. Also to note that there will be a school together with the conference. So we hope that Bologna will be a meeting point for European researchers and people from industry working in the field of crystal growth and crystallisation.



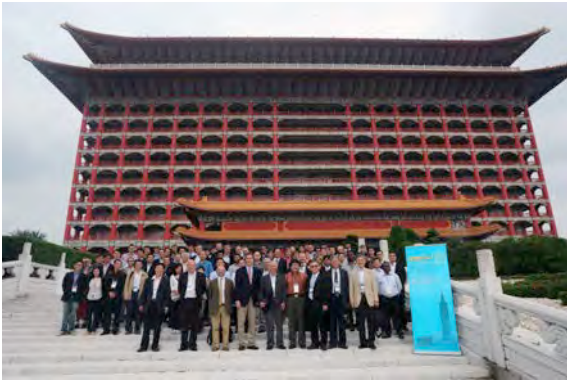
Performing Scottish Dances in Barony Hall after dinner.
Foto: ECCG4

The 7th International Workshop on Modeling in Crystal Growth

Michael Wünscher, Leibniz-Institut für Kristallzüchtung (IKZ), Berlin

Die Reise zum 7. International Workshop on Modeling in Crystal Growth führte die etwa 100 Teilnehmer nach Taipei in die Hauptstadt von Taiwan. Der Workshop wurde von Chung-Wen Lan (National Taiwan University) und Jyh-Chen Chen (National Central University) organisiert und fand im 12. Stock des Grand Hotels, am Fuß des Hügels *Yuanshan* gelegen, vom 28. Oktober bis zum 31. Oktober statt. Von den 49 Vorträgen zeichneten sich die 19 eingeladenen Vorträgen aus, die das gesamte Spektrum der Modellierung der Kristallzüchtung aus der Schmelze bis zur Lösungszüchtung abdeckten und auch Ausflüge in die Mathematik enthielten. Hinzu kamen noch einmal 46 Poster, die in zwei Sitzungen diskutiert werden konnten. Die Vorträge waren auf 9 Sitzungen an den drei Tagen verteilt und wurden von ei-

nem allabendlichen Programm eingerahmt. Die ersten beiden Sitzungen beschäftigten sich vornehmlich mit der Kristallisation von Silizium und der daraus resultierenden Notwendigkeit zur Berechnung des Wärme- und Stofftransports. Im Fokus stand besonders die Optimierung der Prozesse im Hinblick des Kostendrucks in der Photovoltaik. So ist es nicht verwunderlich, dass über die gerichtete Erstarrung von Quasi-mono-Kristallen (Kakimoto et al., Kyushu University; Zhang et al., Tsinghua University) als auch über die Modellierung des Wachstumsverhaltens von Korngrenzen (T. Duffar et al., SIMaP-EPM) berichtet wurde. Die Sitzung über die kommerziellen Programme wurde von F. Dupret (FEMAGSoft S.A.) eingeleitet. Er nahm schon am ersten Workshop (1989 in Parma, Italien) teil und war Organisator des



Die Teilnehmer der IWMCG-7 vor dem Tagungsort, dem Grand Hotel Taipei
Foto: IWMCG-7

zweiten Workshops in Durbuy, Belgien 1996. Diesmal stellte er die Möglichkeiten seiner komplett überarbeiteten Software FEMAG-3 (FEMAGSoft S.A.) vor, die durch die von ihm genannte *spectral technique* (azimutale Auflösung einer begrenzten Anzahl von Fourier Moden) den Wärme- und Stofftransport von 3D Systemen mit geringfügig mehr Rechenzeit als in einer axialsymmetrischen Berechnung lösen kann. Danach wurden die Möglichkeiten von CGSim (STR Group Ltd.) vorgestellt und viele Beispiele, 2.5D bis 3D, beginnend von Czochralski-Silizium bis hin zur Berechnung von Kyropoulos-Züchtung von Saphir unter der Berücksichtigung der teilweisen Transparenz beim Strahlungstransport gezeigt. Die Kollegen aus Erlangen (J. Friedrich et.al., Fraunhofer IISB) haben den Einfluss der Gasströmung auf die Siliziumkristallzüchtung gezeigt, insbesondere den Einfluss auf den Sauerstofftransport bei Czochralski. Dazu haben sie ihr Programm CrysMAS (Fraunhofer IISB) benutzt. Für die 3D-Berechnung der Schmelzenströmung kombinieren sie dieses mit dem open source Programm OpenFOAM (OpenCFD Ltd.), um den Durchmischungseffekt eines *travelling magnetic fields* (TMF) zu studieren (Seebeck et.al., Fraunhofer IISB). Zum Einfluss von Magnetfeldern auf die Schmelzenbewegung gab es noch viele weitere Vorträge und beschäftigte damit einen großen Teil der Vortragenden. Neben dem Vergleich zu experimentellen Ergebnissen bei der Verwendung eines KristMAG® Heizers zum Erzeugen eines TMF bei der Züchtung von VGF GaAs und Germanium (C. Frank-Rotsch et.al., Leibniz-Institut für Kristallzüchtung), wurde die Geschwindigkeit in Modellexperimenten an GaInSn-Schmelzen mit Simulationsergebnissen unter Einfluss eines TMF (K. Niemietz et.al.) verglichen. Ein zusätzlicher elektrischer Strom durch die Silizium-Schmelze zusammen mit einem vertikalen Magnetfeld beeinflussen die Bewegung der Schmelze erheblich, welches anhand von Berechnungen mit STHAMAS 3D (D. Vizman et.al., West University of Timisoara) gezeigt werden konnte. Ebenfalls bei der gerichteten Erstarrung wurde eine Studie mit Ansys zum Vergleich von verschiedenen Magnetfelder gezeigt und das *carousel magnetic field* (CMF) als eine weitere Methode (N. Drobka et.al., Leibniz-Institut für Kristallzüchtung) vorgestellt, um die Durchmischung der Schmelze zu verbessern.

Wegen der Vielzahl von Vorträgen, die sich mit der Schmelzenbewegung beschäftigen, wurde von einem Teilnehmer treffend kommentiert, „kommen wir jetzt mal zu einem Vortrag

ohne Konvektion“. Weitere Themen waren die Berechnung von Versetzungen nach dem Alexander-Haasen-Model sowohl mittels Spezialprogramm wie CGSim (A. Smirnov et.al., STR Group Ltd.) als auch mit Comsol Multiphysics (B. Gallien et.al., SIMaP-EPM) oder die molekulardynamischen Simulationen am Phasenübergang (T. Sinno et.al., University of Pennsylvania), die an den atomistischen Charakter der Materialien erinnert haben und gerade bei einem „heißen“ Kristall kurz vor dem Schmelzpunkt nicht die perfekte Anordnung des Kristallgitters die Wahrscheinlichste ist, sondern mehr Anordnungsmöglichkeiten vorhanden sind, wenn Defekte eingebaut werden. Der letzte Tag des Workshops stand ganz im Zeichen von Phasenfeld-Simulationen und damit ebenfalls im Zeichen von kleineren Abmessungen. Jedoch wurde auch gezeigt, was man mit der gewaltigen Leistung von 16000 CPU Kernen zusammen mit 4000 GPU Kernen anstellen kann, z.B. um auf einem Gitter 4096x6480x13000 das dendritische Wachstum von einer 2-Phasen-Ligierung wie Al-Si zu berechnen und damit hübsche Animationen zu erstellen. Passend zu den Tagen davor wurde unter anderem die Facettierung des Wachstumsinterface bei Silizium (C.W. Lan et.al., National Taiwan University) oder auch das Kornwachstum, insbesondere das Wachstum der Korngrenze, in Silizium (W. Miller et.al., Leibniz-Institut für Kristallzüchtung) untersucht. Aber auch andere Materialien wie Zeolite Filme bzw. Eiskristalle (F. Wandler et.al., Karlsruhe Institute of Applied Sciences) oder metallische Materialien (T. Uehara, Yamagata University) waren Gegenstand von Untersuchungen.

Der Workshop wurde eingrahmt von dem Besuch des Wolkenkratzers „Taipei 101“, dem bis 2010 höchsten Gebäude der Welt. Neben dem beeindruckenden Ausblick über Taipei bei Nacht, war die Kugel zum Schwingungsdämpfen des Gebäudes beeindruckend. Eine Relativbewegung der Kugel zum Gebäude konnte vom Autor leider nicht wie erhofft wahrgenommen werden. Am Dienstag wurde das Konferenz-Dinner begleitet von einer taiwanesischen Tanzgruppe bestehend aus Aborigines, welche die Tanzkultur der Ureinwohner der Insel Taiwan dargestellt haben und den halben Workshop in Tanzlaune versetzt haben. Neben der Überreichung von Skulpturen an die eingeladenen Vortragenden wurden auch noch die besten drei Poster mit jeweils 500\$ prämiert, wobei ein Preis an die Gruppe von Dupret et.al. ging. Am Mittwoch wurde die Besichtigung des National Place Museums organisiert, in der die Schätze der chinesischen Kultur gezeigt werden, die von den Herrschern in Peking über Jahrhunderte gesammelt wurden und teilweise durch den chinesischen Bürgerkrieg nach Taiwan mitgenommen wurden.

Am Schluss des Workshops wurde dann noch bekannt gegeben, dass der nächste Workshop wie 1996 wieder in Belgien stattfinden wird. Als Datum wurde der 04-07 Oktober 2015 oder 11-14 Oktober 2015 genannt. F. Dupret wird die Organisation übernehmen und hat zwei Orte für die Veranstaltung, entweder *City of Spa* oder *La Roche en Ardenne*, vorgeschlagen. Somit können sich alle Interessierten dies schon einmal vormerken. Weitere Informationen über die einzelnen Vorträge finden sich im Tagungsband des Workshops, welcher als „Special Issue: IWMCG-7“ in der Zeitschrift *Journal of Crystal Growth* erscheinen wird.

DGKK-Forschung

Kristalle – Wunderwerkstoffe für die Industrie Orakel für Technologie-Entwicklungen?

Im Rahmen des Fraunhofer-Präsidialprojektes III, welches Ende 2011 abgeschlossen wurde, ging es darum, mathematische Methoden zu entwickeln, um Technologieentwicklungen zu bewerten. In diesem Zusammenhang haben Fraunhofer-Forscher den sogenannten Technologiekompass entwickelt, mit dem sich ähnliche Technologien anhand von Indikatoren vergleichen lassen. Dieser Technologiekompass wurde von Dr. Berndt Weinert, FCM, Prof. Dr. Georg Müller, Crystal Consulting und Dr. Jochen Friedrich, Fraunhofer-IISB getestet, um den Technologiestatus der GaN-Kristallzüchtung heute mit der GaAs-Kristallzüchtung zu vergleichen. Daraus ist der Beitrag „Kristalle – Wunderwerkstoffe für die Industrie“ entstanden, der in dem kürzlich erschienenen Buch abgedruckt ist.

Hans-Jörg Bullinger (Hrsg.):
TECHNOlogisch! - Technologien erfolgreich in den Markt bringen
Ludwigsburg: LOG_X Verlag GmbH
ISBN 978-3-932298-44-8
176 Seiten

Schon die alten Griechen hätten gerne gewusst, wie die Zukunft aussieht. Aus diesem Grunde befragten sie vor wichtigen Entscheidungen (beispielsweise während eines Krieges oder vor der Gründung einer neuen Kolonie) das Orakel von Delphi. Heute geht es den Verantwortlichen in Industrie und Forschungseinrichtungen nicht viel anders. Die Vorhersage technologischer Entwicklungen gilt als schwierig – aber nicht als unmöglich, wie in diesem Anwendungsbeispiel gezeigt werden soll. Ein schönes Beispiel dafür ist der Einsatz von Kristallen in der Industrie.

Orientierungshilfe für die Technologiebewertung

Bei der großen Vielfalt der Kristallmaterialien und deren Anwendungsgebiete wäre es gut, wenn man eine Orientierungshilfe hätte – einen ‚Technologiekompass‘ sozusagen, mit dem man beurteilen könnte, ob es sich lohnt, in eine Technologie zur Herstellung von einem bestimmten Kristallmaterial einzusteigen bzw. wann wohl der richtige Zeitpunkt dafür gekommen ist. Denn steigt man zu früh ein, ist das Risiko eines Fehlschlags mit hohen Kosten verbunden. Steigt man zu spät ein, wird es erst recht teuer, weil die Konkurrenz inzwischen einen Zeit- und Entwicklungsvorsprung hat.

Glücklicherweise gibt es tatsächlich einen ‚Technologiekompass‘. Man hat herausgefunden, dass sich selbst unterschiedliche Technologien häufig nach vergleichbaren zeitlichen Mustern entwickeln. Wenn sich Methoden finden lassen, diese Muster zu erkennen, können die darin enthaltenen Informationen zur Unterstützung bei strategischen Entscheidungen von Unternehmen, Fördereinrichtungen und Forschungsinstituten herangezogen werden.

Erforderlich sind einerseits die Aufstellung quantitativer Modelle für Technologieentwicklungen und andererseits die Bestimmung des Entwicklungsstatus einer Technologie. Die Angabe eines Entwicklungsstatus erfolgt mit sogenannten Indikatoren und muss sich dabei stets auf eine Referenztechnologie beziehen, um diesen überhaupt erst einer Bewertung unterziehen zu können.

Zu den Indikatoren gehören z.B. die Anzahl wissenschaftlicher Publikationen in einem für die jeweilige Technologie relevanten Bereich, die Zahl der Patente, die wesentliche Komponenten einer bestimmten Technologie nutzen. Auch die Analyse von internationalen Konferenzen (Themen, Zugehörigkeit der Präsentatoren zu Instituten bzw. Unternehmen) liefert wichtige Hinweise auf Richtung und Fortschritt bestimmter Technologien.

Denkbar ist auch eine Einbeziehung von Fördermitteln, Produktionsmengen bzw. Umsatzzahlen.

Allerdings darf man nicht erwarten, dass die Werteverläufe der einzelnen Indikatoren allgemeinen, technologieunabhängigen Gesetzmäßigkeiten folgen. Man wird aber Klassen von Technologien mit ähnlichem Werteverlaufsverhalten finden.

GaN und sein älterer Bruder GaAs

Was im vorigen Abschnitt noch sehr theoretisch geklungen hat, soll nun in einer praktischen Anwendung erläutert werden. Es geht ganz konkret um Galliumnitrid. Galliumnitrid wird nachgesagt, das neue Wundermaterial für die Leistungselektronik und Optoelektronik zu sein. Galliumnitrid ist ein Halbleiter wie beispielsweise das sehr verbreitete Silizium, aus dem Computer-Chips hergestellt werden. GaN gehört wie sein älterer Bruder das Galliumarsenid (GaAs) zur Klasse der Verbindungshalbleiter. Diese Verbindungshalbleiter zeichnen sich durch physikalische Eigenschaften aus, die dem Silizium für optische und bestimmte elektrische Anwendungen in den Bereichen Hochfrequenz und Leistungselektronik weit überlegen sind.

Die Referenztechnologie GaAs

Um GaAs-Bauelemente für die oben genannten Anwendungen herzustellen, werden zunächst hochwertige GaAs-Kristalle aus der Schmelze gezüchtet. Die industrielle Produktion der GaAs-Kristalle erfolgt mit dem Liquid Encapsulated Czochralski (LEC)-, Bridgman- (horizontales Bridgman HB und vertikales Bridgman) und Vertical Gradient Freeze (VGF)-Verfahren und gilt als ausgereift. Die so aus der Schmelze hergestellten GaAs-Kristalle werden zu so genannten Wafern vereinzelt. Auf diesen Wafern erfolgt dann die eigentliche Herstellung der GaAs-Bauelemente. Je nach Bauelementtyp werden zu diesem Zweck verschiedene Techniken, wie Ionenimplantation, LPE (Flüssigphasenepitaxie), MOCVD (Metallorganische Gasphasenabscheidung) oder MBE (Molekularstrahlepitaxie) eingesetzt.

Die neue Technologie am Beispiel GaN

Beim GaN können heute die materialspezifischen Vorteile für die vielfältigen Anwendungen nur bedingt ausgenutzt werden. Dies liegt daran, dass große GaN-Einkristalle aufgrund ihres schwierigen Herstellverfahrens bis heute nicht in ausreichenden Mengen verfügbar sind. GaN wird aus der Gasphase oder aus einer Gallium- oder Stickstoff-haltigen Lösung gezüchtet werden. Diese Verfahren heißen HVPE (Hydrid-Vapor-Phase-Epitaxy),

30 HPSG (High Pressure Solution Growth), LPSG (Low Pressure Solution Growth) oder Ammonothermal-Methode. Sie sind sehr viel aufwändiger, langsamer und deshalb teurer im Vergleich zur klassischen Schmelzzüchtung von GaAs. Deshalb bestehen GaN-Bauelemente nach heutigem Stand der Technik aus einer kristallinen Schicht, die auf einem Wafer aus Saphir, Siliziumkarbid oder Silizium mittels der oben erwähnten MOCVD- oder MBE-Techniken abgeschieden wird. Wegen der großen physikalischen und chemischen Unterschiede zwischen Wafer und Schicht entsteht jedoch in der abgeschiedenen Schicht zwangsläufig eine große Zahl von Kristallbaufehlern, die die Leistungsfähigkeit und Zuverlässigkeit der GaN-Bauelemente nachteilig beeinflussen können.

Deshalb wäre es wünschenswert, wenn arteigene, defektarmer GaN-Kristalle verfügbar sind, die zu GaN-Wafern vereinzelt werden, um darauf die aktiven Schichten abzuschneiden. Aus diesem Grund forschen Wissenschaftler aus Forschung und Industrie weltweit an neuen Technologien, die es ermöglichen sollen, hochwertige GaN-Kristalle kostengünstiger herzustellen.

Der Reifegrad interessiert

Die herausragenden Eigenschaften und die vielfältigen Einsatzmöglichkeiten, verbunden mit dem hohen Preis, den man für GaN-Wafer verlangen kann, verlocken geradezu, schnell in dieses Thema einzusteigen, um an diesem ‚Geschäft‘ zu partizipieren. Doch es ist Vorsicht geboten, denn die Kristallzüchtungstechnologie gilt als sehr schwierig, Investitionen erscheinen als ziemlich riskant.

Hier könnte nun der Technologiekompass eine wertvolle Entscheidungshilfe sein, indem er angibt, in welchem Reifegrad sich die Kristallzüchtung von GaN befindet, wenn dafür eine geeignete Referenz zur Verfügung steht. Mit Referenz ist ein im zeitlichen Verlauf abgeschlossener Entwicklungsvorgang einer artverwandten Technologie gemeint, d.h. eine ausgereifte Kristallzüchtungstechnologie für ein ähnliches Kristallmaterial mit einem ähnlichen Anwendungsspektrum. Als Referenz wurden Halbleiterkristalle aus GaAs gewählt, da es heute nach Silizium das wichtigste Halbleitermaterial ist und wie oben beschrieben ähnliche Einsatzgebiete in der Optoelektronik und im Mobilfunk besitzt wie das GaN. Das GaAs sollte sich daher sehr gut als Referenztechnologie eignen, obwohl gerade die Herstellung der Kristalle – beim GaAs aus der Schmelze, beim GaN aus der Gasphase oder Lösung – unterschiedlich ist.

Ohne Indikatoren geht es nicht

Um den Technologiekompass für die Bestimmung des Reifegrades der GaN-Technologie anwenden zu können, lautete die erste Aufgabe, eine Familie von Indikatoren zu identifizieren, die den Entwicklungsstand der Kristallzüchtung und Bauelementtechnologie von GaAs und GaN charakterisieren.

Als Indikatoren wurden in erster Linie die Anzahl der wissenschaftlichen Publikationen gewählt. Denn entsprechende Literaturdatenbanken können vom Arbeitsplatz aus ohne größeren Aufwand mit entsprechenden Suchmaschinen, zum Beispiel Scopus, nach einschlägigen Suchkriterien relativ einfach durchforstet und ausgewertet werden. Zusätzlich wurden auch Patentdatenbanken, die Fördermitteldatenbank des Bundesministeriums für Forschung und Bildung (BMBF) sowie Marktstudien zum Beispiel in Hinblick auf Marktvolumen oder produzierte Mengen als weitere Indikatoren verwendet. Zu jedem dieser Indikatoren wurden die Daten jahresweise erfasst.

Jedoch wurden Patente, Fördermittel und Marktstudien nicht für die mathematische Modellbildung im Rahmen des Technologie-

kompasses herangezogen. Im Fall der Patente sind im Bereich GaAs-Kristallzüchtung pro Jahr nur etwa fünf bis zehn Patentfamilien relevant, die keine statistischen Aussagen über deren zeitlichen Verlauf zulassen. Außerdem hat die Bedeutung von Patenten in den letzten 20 Jahren deutlich zugenommen, was sich zum Beispiel darin äußert, dass bei der GaN-Kristallzüchtung heute jährlich mindestens zehnmal mehr Patente angemeldet werden als es beim GaAs vor zehn bis 20 Jahren der Fall war. Die frei zugängliche Fördermitteldatenbank lieferte bei der Recherche nach Fördervorhaben rund um GaAs automatisch eindeutige Ergebnisse. Bei GaN hätten die über 7000 angezeigten Treffer manuell ausgewertet werden müssen, inwieweit sie wirklich Fördervorhaben zu GaN betreffen. Die Marktstudien könnten wertvolle Indikatoren liefern. Im konkreten Fall lagen für GaN nur seit 2006 Daten vor, was zu wenig war, um sie sinnvoll in die mathematische Betrachtung einbeziehen zu können.

Die richtigen Daten beschaffen

Die folgende Betrachtung des Reifegrades der GaN-Technologie im Vergleich zur GaAs-Referenztechnologie stützt sich aus diesem Grunde ausschließlich auf die Anzahl wissenschaftlicher Publikationen. Zu diesem Zweck wurde die Suchmaschine Scopus nach folgenden Indikatoren durchsucht:

- Indikatoren für die GaAs- und GaN-Kristallzüchtung, zum Beispiel Horizontal Bridgman, Liquid Encapsulated Czochralski, Vertical Gradient Freeze, Vertical Bridgman, Hydride Vapor Phase Epitaxy, Solution Growth, Ammonothermal Growth, ...
- Indikatoren für die GaAs- und GaN-Bauelementtechnologie Metal Organic Vapor Deposition, Molecular Beam Epitaxy, Liquid Phase Epitaxy, Ionimplantation, ...

Zu jedem dieser Indikatoren wurden die Daten jahresweise im Zeitraum 1965 bis 2010 erfasst. Erst einmal wurde überprüft, ob es signifikante Unterschiede im zeitlichen Verlauf im Bereich Kristallzüchtung gibt, wenn man nach Publikationen sucht, die die oben genannten Indikatoren im Titel, in der Zusammenfassung oder in der Liste der Schlüsselwörter enthielten, oder wenn man nur nach den Indikatoren im Titel sucht. Glücklicherweise ist das Ergebnis sehr ähnlich, so dass im Weiteren die wissenschaftlichen Artikel immer nach Indikatoren im Titel, Zusammenfassung und Schlagworten durchforstet wurden. Nachdem dieser Datensatz zur Verfügung stand, wurden die Daten anschließend einer fachlichen Bewertung unterzogen und in einen zeitlichen Verlauf überführt.

Exemplarisch ist in Bild 1 die Entwicklung der Publikationen zur Kristallzüchtung von GaAs von 1970-2010 dargestellt. Man erkennt, dass die Entwicklung etwa 1980 einsetzt, wobei das Czochralski-Verfahren (LEC) klar dominiert mit einem Maximum von 180 Publikationen im Jahr 1985. Etwa parallel dazu, aber in weit geringerem Umfang, verlaufen die Publikationen zum horizontalen Bridgman-Verfahren (HB). Ab etwa 1990 werden die beiden bis dahin dominierenden Verfahren (LEC und HB) vom aufkommenden Vertical-Gradient-Freeze-Verfahren (VGF) abgelöst. Die Ursache liegt darin, dass mit dem VGF-Verfahren bessere Materialeigenschaften, d.h. weniger Kristalldefekte, erreicht werden können und damit z.B. größere Helligkeiten von LEDs erzielbar sind.

Es ist bemerkenswert, dass der aus der BMBF-Förderdatenbank ermittelte zeitliche Verlauf der Fördermittel für FuE-Projekte zur GaAs-Kristallzüchtung weitestgehend dem Verlauf der Publikationen ähnelt, aber um 3-5 Jahre später.

Die zeitliche Entwicklung der Publikationen zu den Technologien, mit denen aus den GaAs-Kristallen Bauelemente hergestellt

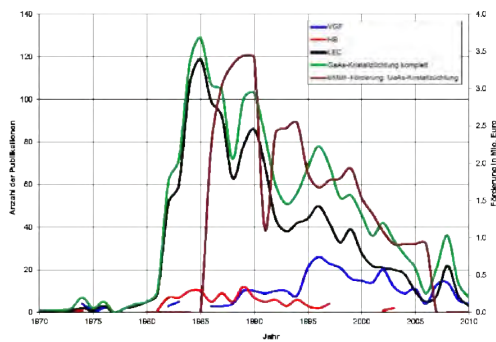


Bild 1: Zeitlicher Verlauf der Zahl der wissenschaftlichen Publikationen zu verschiedenen Kristallzuchtungsverfahren von GaAs zwischen 1970 und 2010, bei denen die Schlüsselbegriffe im Titel, Zusammenfassung oder bei den Schlüsselwörtern vorkommen. Zusätzlich ist der aus der BMBF-Förderdatenbank ermittelte zeitliche Verlauf für die Förderung von GaAs-Kristallzuchtungsprojekten auf der Sekundären y-Achse dargestellt. VGF=Vertical Gradient Freeze, HB=Horizontal Bridgman und LEC=Czochralski-Verfahren.

werden, lässt sich wie folgt beschreiben: Die Flüssigphasenepitaxie (LPE) war die erste Technologie, mit der ab den 1970er Jahren LEDs und Laserdioden produziert wurden.

Parallel dazu wurden erste elektronische Bauelemente mittels Ionenimplantation gefertigt. Ab Mitte der 1980er Jahre wurde die damals neu erfundene MOCVD-Technologie und die MBE-Methode zum dominierenden Herstellungsverfahren für Halbleiterkristallschichten und löste die Flüssigphasenepitaxie ab. Die Entwicklung dieser MOCVD- und MBE-Verfahren in den 1980er Jahren war auch gleichzeitig der Anstoß für die Entwicklung des VGF-Kristallzuchtungsverfahrens.

Seit dem Jahr 2000 sind die wissenschaftlichen Publikationen sowohl im Bereich GaAs-Kristallzuchtungen als auch im Bereich GaAs-Bauelemententechnologie rückläufig, weil die Weiterentwicklungen bei der Industrie stattfinden, weitgehend ohne publiziert zu werden. Die GaAs-Material- und Technologieentwicklung hat also 15 bis 20 Jahre gedauert, wenn man die wissenschaftlichen Publikationen als ein Maß für den Reifegrad verwendet. Somit kann man für GaAs als von einer insgesamt ausgereiften Technologie sprechen, die sich aber auch heute noch ständig im Bereich Kristallzuchtungen und Waferherstellung weiterentwickelt im Hinblick auf neue Anforderungen, die sich bei den Bauelementen ergeben. GaAs sollte sich deshalb gut als Referenz eignen, um den Stand der GaN-Material und Technologieentwicklung zu bewerten.

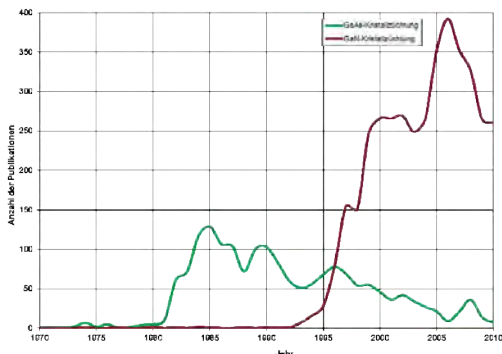


Bild 2: Zeitlicher Verlauf der Zahl der wissenschaftlichen Publikationen zu verschiedenen Kristallzuchtungsverfahren von GaAs und GaN zwischen 1970 und 2010

Wie sieht die Zukunft von GaN aus?

Will man nun den Entwicklungsstand der Kristallzuchtungen von GaN angeben und gar dessen zukünftige Entwicklung voraussagen, so muss man die gleichen Indikatoren wie beim Referenzmaterial GaAs untersuchen und einander gegenüberstellen. Solche Vergleiche sehen dann typischerweise so aus wie in Bild 2 dargestellt.

Verglichen werden hier die oben genannten Indikatoren aus dem Bereich der Kristallzuchtungen. Die Verläufe mögen zunächst für das ungeübte Auge verwirrend erscheinen, sie lassen sich jedoch mit dem Technologiekompass sehr gut und eindeutig auswerten.

Der Technologiekompass bewertet die Zeitverläufe für jeden Indikator nach speziellen statistischen Verfahren. Im vorliegenden Fall wurden die aus den Literaturrecherchen erhaltenen zeitlichen Kurvenverläufe zunächst geglättet und mithilfe mathematischer Funktionen dargestellt. Diese mathematischen Funktionen können dann hinsichtlich ihrer Ähnlichkeit statistisch ausgewertet werden. In den vorliegenden Fällen fand dies zu 90 Prozent nach Form und zu 10 Prozent nach Absolutwerten statt. Da diese Festlegung empirisch nach visueller Inspektion der Werteverläufe erfolgte, stellt die Auswertung derartiger Zeitverläufe nach wie vor eine große Herausforderung dar und belegt auch die Schlussfolgerungen mit einer gewissen Unsicherheit.

Wenden wir uns zunächst dem Indikator ‚Kristallzuchtungen‘ zu (siehe Bild 3). Der Verlauf für GaAs wurde bereits im Zusammenhang mit Bild 1 erläutert. Erwähnt sei hier, dass typischerweise ein besonderer Effekt die Aktivitäten zur Forschung anregen kann. Beim LEC-Verfahren für GaAs war dies die Entdeckung der semi-isolierenden Eigenschaft, d.h. die Möglichkeit, den Kristall mit einem sehr hohen spezifischen elektrischen Widerstand herzustellen, wie es für Anwendungen im Mobilfunk wichtig ist. Auf diesen semi-isolierenden Wafern wurden die ersten lateralen Bauelemente mittels Ionenimplantation gefertigt.

Eine ähnliche Wirkung hatte die Entdeckung, dass man mit dem VGF-Verfahren GaAs-Kristalle züchten konnte, die viel weniger Kristallfehler aufweisen als mit dem LEC-Verfahren hergestellte Kristalle und sich somit besser für die Herstellung von Bauelementen mithilfe der MOCVD- und MBE-Technologie eignen.

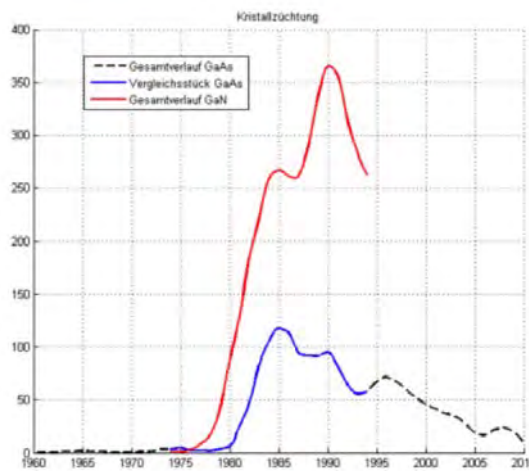


Bild 3: Zeitlicher Verlauf der mathematisch ausgewerteten Indikatoren „Veröffentlichungen im Bereich Kristallzuchtungen“ für GaAs und GaN. Der Verlauf von GaN wurde durch den Technologiekompass zeitlich so verschoben, dass er dem Verlauf von GaAs am ähnlichsten ist.

32 Dadurch konnten vertikale Bauelementkonzepte realisiert werden, die kleiner, leistungsfähiger und verlustärmer sind und dadurch erst die Einführung des UMTS-Standards in der Datenübertragung ermöglichten.

Beim GaN ergibt sich ein ähnlicher Verlauf in Bezug auf die Veröffentlichungen (siehe Bild 2 und Bild 3). Allerdings steigt die Anzahl der Publikationen im Bereich GaN-Kristallzüchtung erst vor etwa 10 bis 15 Jahren stark an. Auslöser für diesen Anstieg der Forschungsaktivitäten war, dass es in den 1990er Jahren gelang, erstmalig GaN-basierte LEDs und Laserdioden auf Fremdsubstraten herzustellen. Vor allen Dingen für die spätere Kommerzialisierung der blauen Laserdiode war die Verfügbarkeit von GaN-Kristallen zwingend und triggerte weltweit die entsprechenden Forschungsanstrengungen an. Die Anzahl der Publikationen pro Jahr ist etwa drei bis viermal umfangreicher als beim GaAs. Dies könnte ein Indiz dafür sein, dass GaN schwerer beherrschbar ist als GaAs. Es fallen mehr Ergebnisse bei der Lösung der materialspezifischen Probleme an, die zu mehr wissenschaftlichen Publikationen führen.

Es scheinen auch bereits die Grundlagen der GaN-Kristallzüchtung so weit entwickelt zu sein, dass die FuE-Aktivitäten, die zu Veröffentlichungen führen, in den letzten zwei bis vier Jahren eher rückläufig sind. Darin spiegelt sich auch die Tatsache wider, dass im gleichen Zeitraum zunehmend GaN-Wafer, wenn auch nur in geringen Mengen, auf dem Weltmarkt verfügbar wurden. Die industriellen Entwicklungen hinsichtlich Hochskalierung, Ausbeuteerhöhung und Kostenreduktion gehen weiter, führen aber nicht zu Publikationen. Dies entspricht der Situation beim GaAs Mitte bis Ende der 1990er Jahre, als die Zahl der Publikationen nach Entwicklung des LEC- und VGF-Verfahrens ebenfalls rückläufig waren.

Bemerkenswert ist, dass in beiden Fällen die Aktivitäten zur Materialentwicklung innerhalb von etwa fünf Jahren stark ansteigen, sich über zehn bis 15 Jahre auf einem hohen wissenschaftlichen Niveau bewegen und dann im Sinne der Anzahl von wissenschaftlichen Publikationen rückläufig werden.

Ist der Blick in die Zukunft tatsächlich möglich?

Die Kernfrage im konkreten, hier vorliegenden Anwendungsbeispiel lautete: Lässt sich die Technologieentwicklung von Galliumnitrid mithilfe des Technologiekompasses voraussagen, wenn man die Technologieentwicklung von Galliumarsenid als Referenz heranzieht?

Hier benötigt man aussagekräftige Indikatoren. Bei den Indikatoren scheint es zumindest im vorliegenden Fall ausreichend zu sein, nur die Anzahl der Veröffentlichungen als Kriterium zu betrachten. Der Vorteil ist eindeutig, dass solche Daten sehr einfach zu beschaffen und auszuwerten sind. Außerdem ist man in jedem Fall auf das Wissen und die Erfahrung von Experten angewiesen. Denn es wurde ja schon anschaulich dargestellt, wie die zeitliche Entwicklung bei dem Referenzbeispiel GaAs von anderen technologischen Entwicklungen (z.B. bei der Herstellung von Bauelementen) beeinflusst werden kann. Daraus kann man klar den Schluss ziehen, dass die Richtigkeit der Voraussage mithilfe des Technologiekompasses umso wahrscheinlicher wird, je ähnlicher sich die ‚neue‘ (hier GaN) und die ‚alte‘ (hier GaAs) Technologie sind.

Im vorliegenden Szenario scheint diese Ähnlichkeit gut genug für eine brauchbare Voraussage zu sein. Diese lautet: Der Stand der GaN-Kristallzüchtung ist heute, d.h. im Jahr 2011, etwa so, wie sie für GaAs um 1995 war. Dies bedeutet aber auch, dass in den nächsten fünf bis zehn Jahren bei GaN noch eine intensive Material- und Verfahrensentwicklung stattfinden wird, damit

GaN-Kristalle so kostengünstig verfügbar werden, dass sie in größerem Umfang in der Bauelementherstellung eingesetzt werden.

Gelingt dies nicht, könnte wie bei dem Verbindungshalbleiter Indiumphosphid (InP), welcher in den 1980er Jahren als Wunderwerkstoff für die optische Datenübertragung galt, der Fall eintreten, dass das vorhergesagte Marktpotenzial nie erreicht wird. Aufgrund materialspezifischer Probleme gelang es nicht, InP-Kristalle kostengünstig zu produzieren. Deshalb haben Bauelementhersteller Konzepte entwickelt, die keine InP-Wafer benötigen. Außerdem führte die Entwicklung auf dem Gebiet der Datenkompression dazu, dass keine so großen Datenmengen mehr transportiert werden müssen und keine Notwendigkeit mehr bestand, InP-Bauelemente in größeren Mengen einzusetzen.

Wem nützt das Ergebnis?

Zum Schluss sollte natürlich auch die wichtigste Frage beantwortet werden, wem ein solches Ergebnis eigentlich nützt. Betrachten wir noch einmal das Endergebnis für den heutigen Stand der Technologie von GaN. Dazu muss man sich nochmals den Verlauf der Technologieentwicklung von GaAs genauer ansehen, dessen Stand im Jahr 1995 nun die Referenz darstellt. Die wissenschaftlichen Aktivitäten zur Kristallzüchtung befinden sich in einer Hochphase, geprägt durch Innovationen eines neuen Verfahrens für GaAs (Vertical Gradient Freeze), haben aber den Höhepunkt und das darauffolgende Abklingen der Aktivitäten, mithin den Reifegrad schon vor Augen. Wem nützt diese Erkenntnis?

Für ein Forschungslabor an Hochschulen oder außeruniversitären Instituten, die Grundlagen entwickeln und publizieren wollen, ist ein Neueinstieg in dieser Phase der Technologie zu spät – der Vorsprung der Etablierten ist zu groß.

Für ein Unternehmen, das bereits an der GaN-Kristallzüchtung forscht und künftig produzieren möchte, ist der Zeitpunkt gekommen, in die GaN-Kristallzüchtung zu investieren und Produktionskapazitäten aufzubauen. Voraussetzung ist, dass das Unternehmen seine technologischen Hausaufgaben gemacht hat und die Forschung und Entwicklung im Unternehmen an GaN weit entwickelt ist. Der Vorteil liegt darin, dass keine abrupte Technologieänderung für die nächste Zeit zu erwarten sein dürfte, welche die Investitionen infrage stellt. Es muss jedoch beachtet werden, dass Parallel- bzw. Alternativentwicklungen umso stärker stattfinden werden, wenn die Ziele bei der GaN-Kristallzüchtung in Hinblick auf Kostensenkung und Steigerung der Materialqualität nicht erreicht werden.

Generell könnte man das Anwendungspotenzial des Technologiekompasses auch so beschreiben: Er ermöglicht es abzuschätzen, wann der richtige Zeitpunkt ist, in eine Technologie einzusteigen. Wobei dieser Zeitpunkt allerdings – und das muss unbedingt betont werden – von den Interessen des Nutzers abhängt. Je näher der Nutzer an der Grundlagenforschung interessiert ist, desto früher muss er einsteigen. Wenn der Nutzer mehr das Endprodukt im Auge hat, muss er einen späteren Zeitpunkt für den Einstieg wählen. Den optimalen Zeitpunkt zu treffen, ist sowohl für Forscher, Geschäftsleute als auch Industriemanager und Fördermittelgeber nicht so einfach und birgt immer ein gewisses Risiko. Der Technologiekompass kann nur helfen, dieses Risiko zu mindern – eine absolute Sicherheit kann auch er nicht geben. Aber damit ist der Technologiekompass noch viel besser als das Orakel von Delphi, das ja bekanntlich mehrdeutige Antworten gab.

Masterarbeit im Rahmen des „European Crystal Growth Network“ an der Universität Linköping, Schweden

Saskia Schimmel: Wachstum und Dotierung von fluoreszenten Siliziumkarbid-Schichten

Im Rahmen des *European Crystal Growth Network* führte Saskia Schimmel ihre Masterarbeit in Linköping, Schweden, durch, wo sie die Züchtung und Dotierung fluoreszenter Siliziumkarbid-Epitaxieschichten mittels des in Linköping entwickelten *Fast Sublimation Growth Process (FSGP)* [1] untersuchte. Die Arbeit ist Teil des Kooperationsprojektes NORLED (Nordic Light Emitting Diode Initiative) an dem u.a. die Linköping University (Dr. M. Syväjärvi) und die Universität Erlangen-Nürnberg (Prof. P. Wellmann) beteiligt sind.

Die Anwendung von fluoreszentem SiC (f-SiC) in Leuchtdioden basiert auf dem Einsatz als Lichtkonverter. SiC kommt dabei nicht in der dünnen aktiven Schicht der Diode zum Einsatz, wodurch die indirekte Bandlücke kein Problem darstellt [3]. Je nach SiC-Polytyp und Dotierstoffen ist mittels Donator-Akzeptor-Paar-Lumineszenz (DAP) die Umwandlung von NUV-Licht in unterschiedliche Wellenlängenbereiche des sichtbaren Lichts möglich. Mit zwei Schichten, von denen jeweils eine mit Stickstoff und Bor (N-B) und eine mit Stickstoff und Aluminium (N-Al) co-dotiert ist, lässt sich beispielsweise ein breites Weißlichtspektrum erzielen, welches sich durch einen hohen Color Rendering Index (CRI) auszeichnet. Abbildung 1a) zeigt eine mit Stickstoff und Bor co-dotierte f-SiC Schicht unter Anregung durch zwei NUV-LEDs.

Der FSGP basiert auf der Sublimation einer monolithischen SiC-Quelle und der Kristallisation der entstehenden Gasspezies auf einem einkristallinen Substrat. Im Vergleich zu pulverförmigen Quellen, wie sie in der Massivkristallzüchtung mittels physikalischem Gasphasentransport (PVT) eingesetzt werden, bieten monolithische Quellen ein gleichmäßigeres Sublimationsverhalten. Die gleichmäßige Sublimation ist aufgrund des geringen Abstands zwischen Quelle und Substrat (typischerweise 1 mm) erforderlich. Während Stickstoff im FSGP als Gas zugesetzt werden kann, muss zumindest die Bordotierung über eine dotierte Quelle erfolgen. Das N-B co-dotierte Quellmaterial (Abb. 1b) wurde in Erlangen von M. Kaiser im PVT-Verfahren hergestellt. Im Rahmen der Arbeit wurden erstmals N-B co-dotierte f-SiC Schichten vom Polytyp 4H gezüchtet, welche die erwartete Lumineszenz im grünen Spektralbereich zeigen (Abb. 2). Die Er-

gebnisse der Arbeit weisen weiterhin darauf hin, dass im f-SiC (wahrscheinlich sowohl bei 4H als auch 6H) Defekte eine größere Rolle spielen als bisher angenommen. Insbesondere erwies sich die Dotierung mit gasförmigem Stickstoff während des FSGP als problematisch und steht im Verdacht, die Bildung von Punktdefekten zu fördern. Eine hohe strukturelle Qualität nicht nur im Hinblick auf Versetzungen, sondern auf jegliche Defekte, welche den Ladungsträgern Möglichkeiten zur nichtstrahlenden Rekombination bieten, ist jedoch von zentraler Bedeutung für das Erreichen hoher interner Quanteneffizienzen. Es wurde daher eine Prozessvariante entwickelt, welche den Einfluss adsorbierter Stickstoffs minimiert.

Die Ergebnisse der Arbeit lassen vermuten, dass eine genauere Kenntnis der in f-SiC auftretenden, die Ladungsträgerlebensdauer limitierenden Defekte sowie ein besseres Verständnis der Defektbildungsmechanismen einen wesentlichen Beitrag zum Erreichen höherer Quanteneffizienzen leisten kann. Es ist zu vermuten, dass neben der Gasatmosphäre, dem Druck und der Züchtungstemperatur auch das Si/C-Verhältnis sowie die Dotierstoffkonzentrationen eine wesentliche Rolle für die Defektbildung spielen.

Ein herzlicher Dank ergeht an die DGKK sowie das Austauschprogramm ERASMUS für die finanzielle Unterstützung durch ein Stipendium.

- [1] M. Syväjärvi et al., *J. Crystal Growth* 197 (1999) pp. 155-162
- [2] J.W. Sun et al., *J. Phys. D: Appl. Phys.* 45 (2012) 235107
- [3] S. Kamiyama et al., *J. Appl. Phys.* 99 (2006) 093108

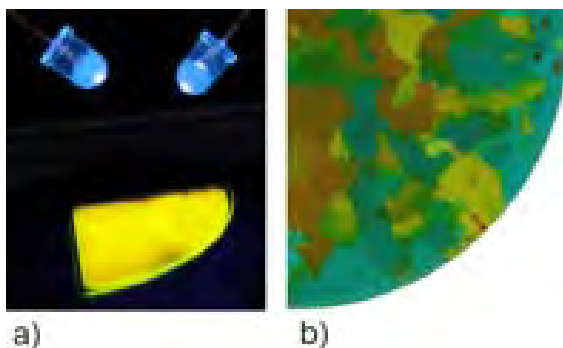


Abb. 1: a) N-B co-dotierte f-SiC Epitaxieschicht, angeregt durch zwei NUV-LEDs [2], b) polykristalline N-B co-dotierte SiC-Quelle

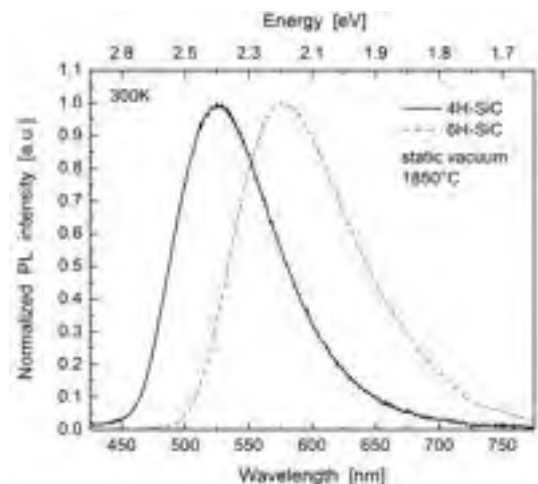


Abb. 2: DAP-Lumineszenz von N-B co-dotiertem 4H- und 6H-SiC (Messung: Y. Ou, Technical University of Denmark)

Modellierung des Massetransports bei homo-epitaktischem Wachstum von Silizium Carbid durch schnelle Sublimations-Epitaxie

Thomas Hupfer^{1,a}, Philip Hens^{1,2}, Michl Kaiser¹, Valdas Jokubavicius², Mikael Syväjärvi² und Peter J. Wellmann¹

¹ Materialien für Elektronik und Energietechnik, Universität Erlangen-Nürnberg, Martensstr. 7, 91058 Erlangen

² Department of Physics, Chemistry and Biology, Linköping University, SE-58183, Linköping, Sweden

^a Hupfer.Thomas@gmx.net

Abstract: Zwei Wachstumsmodi mit unterschiedlicher Limitierung werden beobachtet während der Sublimations-Epitaxie von Silizium Carbid. Durch die Berechnung der mittleren freien Weglänge kann der Wachstumsmodus für die gewählten Parameter vorhergesagt werden. Die Einflüsse von Temperatur und Intergasdruck auf den Massetransport beim Wachstum von epitaktischen Schichten wurden berechnet und experimentell überprüft.

Silizium Carbid ist ein vielversprechendes Material, nicht nur für Hochleistungsbauteile, sondern auch für eine neue Generation von Lichtkonvertern. Fluoreszierendes Silizium Carbid (f-SiC) dient als effizienter Lichtkonverter für weiße LEDs, wenn das Material gewisse Voraussetzungen erfüllt. Die Kristallqualität ist dabei ein wichtiger Punkt, denn Defekte sind der Hauptgrund für nicht-strahlende Rekombination von Ladungsträgern. Dies passiert als Konkurrenzreaktion zur Donor-Akzeptor-Paar-Lumineszenz, die für die Emission des weißen Lichts genutzt wird. Die schnelle Sublimations-Epitaxie wird für die Züchtung von f-SiC als der am besten geeignete Prozess gehalten. Dieser Prozess macht es möglich, f-SiC Material von sehr hoher Kristallqualität zu wachsen, wie es für die Lichterzeugung nötig ist.

In dieser Arbeit wurde der Massetransport zwischen Quellmaterial (poly-SiC) und Substrat (einkristallines SiC) während der Epitaxie untersucht. In Abhängigkeit von Inertgassorte, Inertgasdruck, Quellmaterial und Abstand zwischen Quellmaterial und Substrat wurden Züchtungsparameter für diffusiven und ballistischen Massetransport während des Kristallwachstums ermittelt.

Generell nimmt die Wachstumsgeschwindigkeit mit sinkendem Gasdruck zu. Dies lässt sich mit der Druckabhängigkeit des Diffusionskoeffizienten und somit der Diffusionsgeschwindigkeit erklären. Bei sehr niedrigem Gasdruck jedoch zeigt sich ein Übergang zu konstanter, druck-unabhängiger Wachstumsgeschwindigkeit. Bei welchem Druck dieser Übergang stattfindet hängt, bei gleicher Temperatur, von dem Abstand zwischen Quellmaterial und Substrat ab. Je geringer der Abstand, desto

ausgedehnter der Bereich der Druck-unabhängigen Wachstumsgeschwindigkeit. In diesem Bereich lässt sich auch der Einfluss verschieden hergestellter Quellmaterialien mit gleicher Zusammensetzung beobachten. Die Wachstumsgeschwindigkeit hängt somit von der Sublimationsrate des Quellmaterials ab und wird durch den Transport durch die Gasphase nicht beeinträchtigt. Der Stofftransport erfolgt dabei ballistisch, d.h. ohne Wechselwirkung mit dem Inertgas.

Die Berechnung der mittleren freien Weglänge der SiC-Spezies in der Gasphase erlaubt die Korrelation des Abstands mit dem Wachstumsmodus der Epitaxieschicht. Überschreitet die mittlere freie Weglänge den Abstand zwischen Quellmaterial und Substrat, so geschieht der Massetransport ballistisch und die Wachstumsgeschwindigkeit ist limitiert durch die Sublimationsgeschwindigkeit des Quellmaterials. Ist die mittlere freie Weglänge hingegen kürzer, so begrenzt die Diffusionsgeschwindigkeit der SiC-Spezies in der Gasphase die Wachstumsgeschwindigkeit des Kristalls. Diese Korrelation erlaubt die gezielte Einstellung eines bestimmten Transportmodus und ermöglicht eine weitere Optimierung des Züchtungsprozesses. Die Berechnungen von mittlerer freier Weglänge sowie des Prozentsatzes an ungestreuten Atomen für verschiedene Züchtungsparameter bei 1 mm Abstand zwischen Quellmaterial und Substrat sind in den Grafiken 1 und 2 gezeigt. Experimentell wurde ballistischer Massetransport für die gekennzeichneten Parameterkonstellationen 1 und 2 ermittelt sowie diffusiver Massetransport für die mit Punkt 3 gekennzeichneten Züchtungsbedingungen. Aktuell werden Untersuchung zum Zusammenhang zwischen Transportmodus und Polytypenumschlägen durchgeführt.

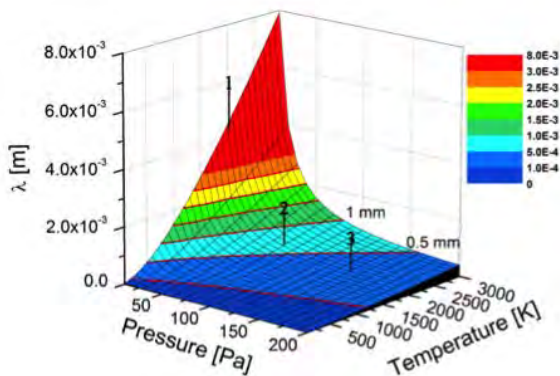


Fig. 1: Berechnete mittlere freien Weglänge für Si in Argon bei unterschiedlichen Züchtungsparametern.

1: 10^{-3} Pa; 2: 70 Pa; 3: 140 Pa;

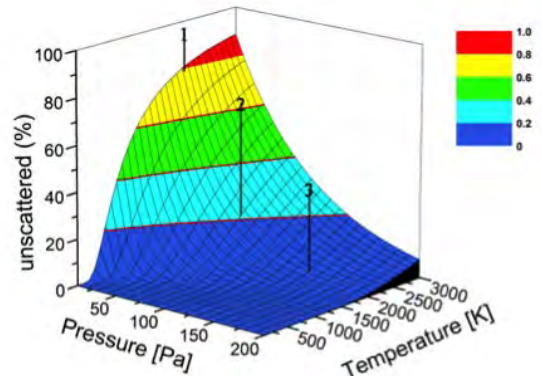


Fig. 2: Berechnung des Prozentsatzes an abgedampften Atomen, die den 1 mm Abstand zwischen Quellmaterial und Substrat ungestreut überwinden.

1: 10^{-3} Pa; 2: 70 Pa; 3: 140 Pa;

DGKK-Fokus

100 Jahre von Mises-Spannung

Klaus Böttcher, Leibniz-Institut für Kristallzüchtung (IKZ), Berlin

Mit dieser knappen Überschrift soll das Interesse auf eine mechanische Größe und ihre Urheber gelenkt werden. Zur Auswertung berechneter thermoelastischer Spannungen in Kristallen hat vermutlich Duseaux 1983 [10] als erster die von Mises-Spannung anstelle der einzelnen Spannungskomponenten verwendet. Und seit der Entwicklung und Verbreitung des Programms CrysVUN [24] des Erlanger Kristalllabors Ende der 90er Jahre für thermische Modellrechnungen zur Volumenkristallzüchtung gehört die von Mises-Spannung zum Alltagsvokabular vieler Kristallzüchter, obwohl die dazugehörige, 1913 publizierte Formel ausdrücklich für isotrope Stoffe hergeleitet wurde.

Die von Mises-Spannungsformel sowie weitere artverwandte Formeln werden verwendet, um die mechanische Belastung eines Werkstücks zu beziffern. Die Belastung wird dann mit Grenzwerten verglichen, die an standardisierten Belastungsfällen experimentell ermittelt wurden und bei deren Überschreitung z. B. der Übergang von elastischen zu plastischen Verformungen einsetzt, also zum Materialversagen führt. Bei zähen Stoffen spricht man üblicherweise vom Fließen, bei spröden Stoffen vom Bruch; es gibt auch Zwischenformen.

Die Hypothesen zum Materialversagen drücken aus, welche mechanischen Größen für den Weg zur Fließ- oder Bruchgrenze entscheidend sind: etwa die größte der drei Hauptspannungen, oder der Dehnungen oder der Schubspannungen (was gerichtete Größen sind) oder eine Energie-Größe. Metalle zeigen nach Überschreitung der Elastizitätsgrenze ein ausgeprägtes Fließverhalten, so dass sich die Forschung auf die Formulierung dieses Umschlagpunktes (Fließgrenze) konzentrierte. Für Überblicke über die historische Entwicklung der Forschung zum Materialversagen sei verwiesen auf u.a. [36] und [29]. Zumindest für duktile Stoffe lief die Entwicklung auf eine Energie-Größe hinaus, dessen Spannungsterm heute als die von Mises-Spannung bezeichnet wird. Die Literatur spricht vom HMH-Kriterium in Anlehnung an Huber, von Mises und Hencky. Zeitlich davor kommen Maxwell und Beltrami hinzu. Die Entstehungsgeschichte dieser Formel und deren Interpretation ist der Inhalt des nachfolgenden Artikels; aber auch das Leben der im weiteren Sinne drei Namensgeber (also HMH) wird beleuchtet.

Die spezifische elastische Formänderungsenergie einer Deformation kann bei isotropen Stoffen in einen Anteil zur reinen Volumenänderung U_{volu} (verursacht durch hydrostatische Drücke) und einen Anteil zur reinen Gestaltänderung U_{gest} (verursacht durch Scherspannungen) zerlegt werden [12, S. 39]. Deren Formeln können sowohl in der Sprache der Spannungen als auch der Verzerrungen geschrieben werden. Mit Hauptspannungen σ_1, σ_2 und σ_3 lauten sie

$$U_{volu} = \frac{1-2\nu}{6E} (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)^2, \tag{1}$$

$$U_{gest} = \frac{1}{12G} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2], \tag{2}$$

und die Summe von beiden in kürzester Notation

$$U_{tot} = \frac{1}{2E} [(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)^2 - 2(1 + \nu) (\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_3\sigma_1)] \tag{3}$$

mit E : Young-Modul, G : Schermodul und ν : Poisson-Zahl. Mit kartesischen oder Zylinderkoordinaten kommen noch die Scherspannungen τ_{ij} dazu.

Nach und auch neben der Ära der Theorieversuche mit Maximalwerten von Spannungen und Dehnungen war vermutlich **James C. Maxwell** (1831-1879) der erste, der eine Energiegröße zur Beschreibung des elastischen Limits eines Festkörpers verwendete, wie er dies 1856 in einem Brief an William Thomson (Lord Kelvin, 1824-1907) beschrieb. Davon erlangte die Öffentlichkeit aber erst Kenntnis, als die "familiar letters" an W. Thomson im Jahre 1937 publiziert wurden [25]. Der betreffende Briefabschnitt ist auch in [34, Anh. 2] wiedergegeben. Angeregt durch Versuche anderer Forscher zur Polarisation des Lichts in Glaskörpern, die erhitzt oder unter Druck gesetzt wurden, führte Maxwell die obige Zerlegung der Formänderungsenergie durch und schrieb: "Let $\alpha\beta\gamma$ be the 3 principal strains at any point ... The resilience of rigidity R_2 (which is the converse of plasticity) is the work required to be expended in pure distortion in order to produce a permanent change of form in the element. I have strong reasons for believing that when

$$\alpha^2 + \beta^2 + \gamma^2 - \beta\gamma - \gamma\alpha - \alpha\beta \tag{4}$$

reaches a certain limit = R_2 then the element will begin to give way." Offensichtlich brauchte der Terminus "Plastizität" unter Physikern damals keine weitere Erklärung. Abgesehen von Koeffizienten wie in Gl.(2) (dort auf Spannungen bezogen), die hier fehlen, stellt Gl.(4) genau die reine Gestaltänderung dar; ersichtlich an der Umformung von (4) in

$$1/2 [(\alpha - \beta)^2 + (\beta - \gamma)^2 + (\gamma - \alpha)^2].$$

Maxwell griff dieses Thema aber nicht mehr auf und Thomson ebenso nicht. Die Forschung brauchte viele Jahrzehnte, um erneut auf diese Idee zu kommen.

Der italienische Mathematiker **Eugenio Beltrami** (1835-1900) arbeitete an der mechanischen Interpretation von Maxwells Gleichungen zur Elektrodynamik und kam dadurch zur Elastizitätstheorie. Mit Blick auf die bis dato angewandten Prinzipien der maximalen Spannung und auch Dehnung bemerkte er, "dass weder das eine noch das andere Princip naturgemäß ist, da das wahre Maß für die der Kohäsion eines elastischen Körpers gesteckte Grenze von der Gesamtheit aller Dilatationen und aller Spannungen in der Umgebung eines jeden Punktes des Körpers abhängen muss" [32], und so folgerte er 1885, dass die Lösung vom elastischen Potential aus anzugehen sei. D.h. Gl. (3) wurde mit der elastischen Energie eines einachsigen Zugversuchs $U_{tot} = \sigma_{1ax}^2 / (2E)$ skaliert, so dass die Fließgrenze durch den Spannungszustand

$$\sigma_{1ax}^2 = \sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\nu (\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_3\sigma_1) \tag{5}$$

beschrieben wird (im Original [3] mit kartesischen Spannungskomponenten t_{xy}, \dots). Der Ansatz von Beltrami wurde erst Jahrzehnte später bekannt. Der Aufsatz war zwar sowohl in der Zeitschrift "Il nuovo cimento" [3] als auch in der Zeitschrift des Mailänder "Istituto Lombardo di scienze e lettere" [2] veröffentlicht worden. Dennoch ist man auf die Arbeit erst aufmerksam geworden durch den Abdruck der Gedenkrede von E. Pascal

36 Anfang 1901, ein Jahr nach Beltramis Ableben: die Rede erschien gedruckt auf italienisch noch 1901 in [30], auf polnisch 1902 [31] und auf deutsch 1903 [32]. In [32] ist Beltramis obiger Artikel mit einer halben Seite gewürdigt worden, aus der aber nur hervorgeht, dass die Formelableitung vom elastischen Potential aus begonnen wurde. Der 4. Band der gesammelten Werke Beltramis (auch auf italienisch) mit dem Abdruck des 1885-er Artikels [19, S. 180–189] erschien 1920 gerade noch rechtzeitig, um in den Diskussionen der 1920-er Jahre mit durchgesprochen zu werden (z.B. [35, 44]). Der Veröffentlichung von Maxwell's Ideen erst 1937 war das nicht vergönnt.

Nur jene kurze Information aus [31] kam **Maksymilian Tytus Huber** (1872-1950) in Krakau (heute Krakow in Polen) in die Hände, als er seinen Artikel [21] konzeptionell bereits fertiggestellt hatte: der Artikel ist auf polnisch geschrieben, hat 12 Kapitel, wurde im Oktober 1903 eingereicht und erschien 1904 auf 4 Hefte verteilt gedruckt in der Technischen Zeitschrift der Universität Lemberg (heute Lwiv in der Ukraine). Die ersten 11 Kapitel sind unter einem allgemeineren Aufsatztitel zeitgleich auch zu einer Warschauer Zeitschrift eingereicht worden [20]. Den Lemberger Artikel derzeit zu beschaffen gelang nicht, sondern wir nehmen Bezug auf den englischen Nachdruck [22] anlässlich des 100. Jahrestages seines Erscheinens. In diesem schreibt Huber, dass er gerade wegen der räumlichen Anordnung der Bauteilchen eines isotropen Festkörpers "... came to the conviction, with the help of the schematic picture of molecular distribution in a strained body . . . , that not only the separation of particles lying in the direction of the maximum elongation affects the risk of fracture but also so does a change of a distance between particles lying in all directions passing through the considered point of the body (that is elongation in all directions) . . . or shorter: strain of the element of the body defines its material effort." Die Anforderungen an eine Funktion F , die die Materialbelastung in der Sprache von Ausdehnungen bzw. Scherwinkeln beschreiben soll, führt auf die spezifische Formänderungsenergie, und die ist innerhalb der Einschränkungen des Hooke'schen Gesetzes nichts anderes als das elastische Potential. Man erhält einen Ausdruck in den Spannungen und über die Invarianten einen in den Hauptspannungen, identisch zur obigen Gl.(3). Durch Vergleich mit dem Potential eines Zustandes mit nur einer einzigen Hauptspannung ergibt sich wieder der Ausdruck wie von Beltrami (oben, Gl.5), Huber bezeichnet sie als "reduzierte Spannung", "which defines a simple tension or compression σ that produces the same work of strain, that is the same material effort, as the three-dimensional state of stress with components $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$, or, equivalently $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_x, \tau_y, \tau_z$. The stress σ can of course serve as a convenient measure of material effort ...". Beide Artikel Hubers von 1904 [20, 21] hatten wegen der Sprache und der Zeitschrift wenig Chancen, in Mittel- und Westeuropa wahrgenommen zu werden. Er hat aber dem Münchener Mechanik-Professor August Föppl Exemplare seiner Arbeiten geschickt. Föppl würdigt in seinem Buch von 1920 [12, Band 1, S. 50–52] Hubers Arbeit zur Materialbelastung ausführlich, eingangs mit den Worten: "Die ursprüngliche Veröffentlichung von Huber ist uns nicht zugänglich, da sie in der polnischen Muttersprache ihres Verfassers geschrieben ist; wir können uns aber dabei nach einer brieflichen Mitteilung mit einem ausführlichen Auszuge aus der Abhandlung richten, die wir Herrn Huber verdanken. Herr Huber spricht darin seine Annahme in dem Satze aus: >Die Anstrengung des Materials wird gemessen durch die Summe jener Teile der bezogenen Formänderungsarbeit, welche durch reine Gestaltänderung und durch reine Volumen-Vergrößerung

bedingt sind.< " Mit diesen Worten ist der grundsätzliche Unterschied zu Maxwells Idee (nur reine Gestaltänderung), aber auch der eher kleine Unterschied zu Beltramis Interpretation klar ausgedrückt: Volumen-Verkleinerungen werden bei Huber nicht als Belastung angerechnet, Volumen-Vergrößerung schon. Nicht nur, aber auch mit dieser Nennung im Buch von Föppl 1920 und dann auch 1924 hat Hubers Arbeit Eingang gefunden in die Artikel- und Konferenzdiskussionen der nachfolgenden Jahre.

Keine einzige der bisher besprochenen Ideen zum Übergang von Elastizität zu Plastizität waren zu **Richard von Mises (1883-1953)** nach Straßburg im Elsass (heute Strasbourg in Frankreich) gelangt, als er 1913 seinen Artikel [43] für die Göttinger Nachrichten verfasste; denn dort beschreibt er den Stand der Technik mit den Ergebnissen von Cauchy, Saint-Venant und Mohr. R. von Mises hatte sich in der Vorzeit ein gediegenes analytisches Können im Umgang mit Strömungsgleichungen erarbeitet und sich an das Vorhaben gemacht, eine Bewegungsgleichung für plastisch deformierbare Festkörper aufzustellen. In [43] führt er Annahmen und Erfahrungstatsachen auf, die er nach Diskussion in Gleichungen ummünzt: an der Elastizitätsgrenze und darüber hinaus verhält sich ein Festkörper wie eine zähe, nahezu inkompressible Flüssigkeit, womit er meint, "dass nicht der Deformations-Zustand, wie beim elastischen Körper, sondern der Deformations-Vorgang die Spannungen bedingt." Derart ergeben sich anstelle des Hooke'schen Gesetzes mit Festigkeitsmodul und Deformation nun $\sigma_i(k)$ mit einer Reaktionsgröße k und den Deformations-Geschwindigkeiten. Ebenso folgert er aus dem Beobachtungsmaterial, dass "sich ... die Arbeit nicht (ändert), die zur Erzielung einer bestimmten Formänderung verbraucht wird", woraus eine Energieformel mit k und der Deformations-Geschwindigkeit entsteht, deren Analyse zur Aussage führt, dass die Spannungen bei plastischen Deformationen ihren Wert beibehalten, und dies ist derjenige, der an der Elastizitätsgrenze vorlag. Wie nun dieser Spannung an der Elastizitätsgrenze habhaft werden? O. Mohr charakterisierte die Elastizitätsgrenze mit Grenzwerten L für die Beträge der Hauptscherspannungen, also $|\tau_i| \leq L, i = 1, 2, 3$. Nimmt man die Hauptscherspannungen $|\tau_i|$ als Koordinatenachsen, so ergibt Mohrs Methode grafisch einen Würfel. Andererseits ist die Summe der Hauptscherspannungen immer Null, was eine Ebene ergibt, die Mohrs Würfel in einem Sechseck schneidet. Sechsecke sind analytisch schwer zu handhaben, und da Mohrs Methode nur eine Näherung ist, ersetzt von Mises Mohrs Würfel durch eine umschreibende Kugel $\tau_1^2 + \tau_2^2 + \tau_3^2 = 2L^2$, die von dieser Ebene in einem Kreis geschnitten wird. Zu τ_i -Formeln kommt man, indem man das Spannungstensor-Koordinatenkreuz aus der Hauptachsenlage heraus um 45° in Richtung der jeweils nächsten Achse dreht. Dann entstehen auf den Nebendiagonalplätzen die Hauptscherspannungen, und zwar ausgedrückt durch die Hauptnormalspannungen, wie z.B. $\tau_2 = (\sigma_1 - \sigma_3)/2$. Damit ergibt sich $\Sigma \tau_i^2 = 1/2(\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2) - 1/2(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_3\sigma_1)$ als Kugel; und mit kartesischen Komponenten

$$\Sigma \tau_i^2 = \frac{1}{2} [(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + (\sigma_{yy} - \sigma_{zz})^2 + (\sigma_{zz} - \sigma_{xx})^2] + 3(\tau_{xy}^2 + \tau_{xz}^2 + \tau_{yz}^2). \quad (6)$$

Gl.(6) ist in heutiger Sprechweise das Quadrat der von Mises-Spannung. Wie ersichtlich, ist deren Formelausdruck eher nebenbei erhalten worden, fast nur aus mathematischen Gründen, wie in Reviewartikeln immer wieder kritisiert wird (z.B. in [29]). Die Formulierung in den Hauptspannungen ist strukturell iden-

tisch mit Maxwells Idee (Gl. (4)) vom Spannungszustand an der Elastizitätsgrenze. Sie erfasst nur die reine Gestaltänderung, was von Mises 1913 aber nicht derart in Worte gefasst hat.

In den zehn Jahren nach 1913 standen alle schon genannten Ergebnisse ohne gegenseitige Kenntnissnahme in der Literatur, woran vor allem der 1. Weltkrieg schuld war. Dann kam die Aufbruchphase nach dem Krieg, und da lohnt **ein kurzer Blick in die Historie von Gesellschaften und Konferenzen**: 1822 wurde nach schweizerischem Vorbild die "Gesellschaft Deutscher Naturforscher und Ärzte" (GdNÄ) gegründet, in der wegen der fachlichen Vielfalt bald Sektionen, Abteilungen usw. gebildet wurden. Es entstanden auch Ausgründungen: z.B. 1856 der Verein Deutscher Ingenieure (VDI) und 1890 die Deutsche Mathematiker-Vereinigung (DMV). Nach dem 1. Weltkrieg entfalte gerade der VDI vielseitige Aktivitäten, und es wurde die Bedeutung der technischen Mechanik erkannt [13]. Die VDI-Forschungsberichte genügten dem "Ausschuss für Mathematik und Mechanik" nicht mehr, so dass unter dem Dach des VDI-Verlages die "Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik" (ZAMM) gegründet wurde, die ab Januar 1921 erschien: Sie ist heute eine Zeitschrift von Weltruf, aktuell im 92. Jahrgang. Ihr erster Schriftleiter war Richard von Mises, Direktor des 1920 für ihn als persönlichen Ordinarius gegründeten Instituts für angewandte Mathematik an der Berliner Universität.

Die Aufgabenbereiche von VDI und DMV wurden immer größer, und so wurde mit einer engeren Zielsetzung am Rande der Leipziger Jahresversammlung der GdNÄ 1922 die Gesellschaft für angewandte Mathematik und Mechanik (GAMM) gegründet [13]. Vorsitzender wurde L. Prandtl, Geschäftsführer R. v. Mises. Nach dem Krieg gab es Nachholbedarf an gegenseitiger Information, gerade auch in der Aero- und Hydromechanik, die durch Flug- und Schiffstechnik wichtig geworden waren. Und so trafen sich Vertreter aus ganz Europa im Herbst 1922 in Innsbruck. Um aber Fragen aus der Gesamt-Mechanik zu diskutieren, kam aus dem Kreis der Innsbrucker Teilnehmer auch Idee und Einladung zu einem Internationalen Kongress für Angewandte Mechanik, der 1924 in Delft tatsächlich stattfand und seitdem als der "Erste" gezählt wird. 2012 fand in Peking der 23. statt.

Auf dem Delfter Kongress 1924 [46] lernten sich Huber und von Mises persönlich kennen [27]. Dazu kam als dritter **Heinrich Hencky (1885-1951)**, der damals schon ein ganzes Jahr an der Delfter Universität arbeitete. Hencky kannte von Mises' Artikel von 1913 und zitierte ihn, aber er wartete mit einer anderen Interpretation der Plastizitätsbedingung auf. In Henckys Konferenzbeitrag [16] sowie auch in dessen gedruckter Langfassung [15] werden 3 Thematiken bearbeitet: a) eine Hypothese, dass infolge plastischer Deformation im Material Nachspannungen zurückbleiben, welche letztlich mit zur Verfestigung führen. Hierzu wird ein 1-fach statisch unbestimmtes Fachwerk untersucht, das aus 3 unterschiedlich dicken Stäben besteht. Der Unbestimmtheit wegen wird zusätzlich das Hookesche Gesetz zur Berechnung der Dehnung gebraucht. Idealisierte Fachwerke wurden in der Vor-Computerzeit häufig als Rechen-Modell auch für Dinge verwendet, die real keine Fachwerke waren. b) eine Plastizitätsbedingung unter Verwendung der Ergebnisse aus a); c) ein Differentialgleichungssystem für die elastisch-plastischen Deformationen.

Wir greifen b) heraus: Hencky beruft sich darauf, dass bereits experimentell erwiesen ist, dass hydrostatische Drücke und Züge keinen Einfluss auf das Einsetzen der Plastizität haben [15]. Folglich ist seine Hypothese, dass die Plastizitätsgrenze bei

einem bestimmten Energiewert der reinen Gestaltänderung erreicht wird – erstmals seit Maxwell wieder dieser Gedanke. Zur Skalierung dient wieder der einachsige Zugversuch, dessen Elastizitäts-Grenzspannung auf σ_{limit} festgelegt wird. D.h. an der Elastizitätsgrenze ist $U_{gest} = \sigma_{limit}^2 / (6G)$ und damit der Spannungszustand

$$\frac{1}{2} [(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2] + 3(\tau_{xy}^2 + \tau_{xz}^2 + \tau_{yz}^2) = \sigma_{limit}^2 \quad (7)$$

Hencky weiter: "Diese Plastizitätsbedingung hat zuerst in etwas anderer Form und Begründung Herr v. Mises in einer Abhandlung über Plastikodynamik [43] aufgestellt." In der Tat sind die Klammerausdrücke in Gl.(7) und Gl.(6) identisch, jetzt aber versehen mit einer neuen Interpretation. Aus den Proceedings einschl. Diskussionsmitschrift [16] geht hervor, dass Huber sich zu Henckys Vortrag zu Wort gemeldet hat mit der Information über seinen polnisch-sprachigen Artikel von 1904 und über die briefliche Mitteilung darüber an A. Föppl. Auch A. Föppl selbst und J. Czochralski waren Teilnehmer. R. von Mises hielt einen Vortrag zu Starkkörperberechnungen.

Um weiter in der Chronologie zu bleiben: Mindestens auf dem Züricher Kongress 1926 [47] haben sich alle wiedergesehen: Huber und Hencky hatten Vorträge, von Mises und Huber waren Sektions-Vorsitzende. Nachdem alle drei schon den ersten Weltkrieg mitgemacht hatten (Huber als Offizier aufgrund Professorentitel, Hencky schon vor dem Krieg Eisenbahningenieur in der Ukraine, beide dann Kriegsgefangene in Russland, v. Mises als Flugzeugkonstrukteur und Fluglehrer, weil Flugausbildung schon vor dem Krieg), haben sie im fortgeschrittenen Alter den zweiten Weltkrieg im Zivilleben erlebt, v. Mises im Exil. Huber hat in den Kämpfen des Warschauer Aufstandes 1944 Archiv und Besitz verloren, Henckys neues Buchmanuskript ist 1943 im Verlagshaus in München großteils verbrannt, und der aus einer jüdisch-österreichischen Familie stammende von Mises hat durch seine Kündigung an der Berliner Universität Ende 1933 und die Emigration nach Istanbul die Pensionsansprüche aus 24 Jahren verloren, und nach dem Tode Kemal Atatürks 1938 und dem politischen Wechsel drohte der Faschismus ihn und viele andere Emigranten auch dort einzuholen, so dass von Mises und seine Frau, die aus Wien stammende Mathematikerin Hilda Geiringer, 1939 in die USA gingen, wo sie sich nach deutsch, französisch und türkisch nun ins Englische als die vierte Unterrichtssprache hineinfinden mussten.

Ausführliche Darstellungen von **M. T. Hubers** Leben und Werk hat dessen ehemaliger Student und spätere Mechanik-Professor Z. S. Olesiak verfasst [27],[28]. Zu Hubers bedeutendsten Leistungen gehört seine Forschung zur Theorie der Elastizität orthotroper Platten. Huber schrieb Bücher zur Festigkeitslehre und Elastizität und hat Generationen von Studenten ausgebildet, auch bis ins hohe Alter in der Nachkriegszeit, zuletzt in Danzig und Krakau. Huber hat auch Monographien aus dem Russischen und Deutschen ins Polnische übersetzt. Auf dem Mechanik-Kongress 1948 in London (Vortrag) wird er auch R. von Mises wiedergesehen haben.

H. Hencky hatte ein bewegtes Leben mit Arbeitsorten quer durch Europa, auch USA und mehrfach Russland. Eine ausführliche Darstellung seines Lebens und seiner herausragenden wissenschaftlichen Leistungen haben die Rheologen R. und E. Tanner verfasst [41]. Mit seinem Namen werden heute mehrere mechanische Größen verbunden. Hencky hat die Elastizität beim Ausbeulen von Platten und Schalen berechnet, er hat

38 die Deformationstheorie der Plastizität begründet (mit absoluten Variablen; das Gegenstück ist die inkrementelle Theorie), und seine Berechnungen zum Fließen plastischer Massen gelten als Pionierarbeiten der Rheologie. Warum neue Theorien gebraucht wurden, begründete er ganz rigoros: "Die mathematische Elastizitätstheorie hat ein glorifiziertes, in Wirklichkeit nicht existierendes Material erdacht, den ideal-elastischen Körper, und hat alle ihre Begriffe im Hinblick auf dieses Material geformt. Kein Wunder, dass die Materialprüfung, welche mit den wirklich existierenden Werkstoffen und ihrem Formänderungswiderstand zu tun hat, mit vielen Begriffsbildungen der Elastizitätslehre nichts anfangen konnte." [17]. Hencky verunglückte 1951 beim Bergsteigen tödlich. Kurz zuvor war der gerettete Manuskriptteil von 1943 als Buch erschienen [18].

Das Leben von **R. von Mises** war ab der Berliner Zeit mit dem seiner Fachkollegin und späteren Frau Hilda Geiringer verbunden, die sich als erste Frau in Deutschland im Fach Angewandte Mathematik habilitiert hatte. Zu R. von Mises, mitunter zu beiden, gibt es insbesondere die Darstellungen der Mathematiker H. Bernhardt [5, 7, 8] und R. Siegmund-Schultze [37, 39], und letztere enthalten auch viele Fotos. Das schwierige Leben im Exil schildern [40], [9] sowie kürzlich [33], [23] und [11]. Es war ein Exil ohne Rückkehr.

R. von Mises hat in seinem Schaffen mit Blick auf Methoden und Gegenstand eine unglaubliche Vielseitigkeit an den Tag gelegt: am Berufsanfang berechnete er Wasserturbinen, Getriebe und Flugzeuge, in der Tragflächentheorie fand er z.B. das sog. aerodynamische Zentrum, einen singulären Punkt bzgl. des Auftriebs. Sowohl sein Buch zur Fluglehre als auch das zur Theorie kompressibler Strömungen erlebten Auflagen über Jahrzehnte hinweg. In Fortentwicklung der Fließbedingung für isotrope Stoffe von 1913 hat er für anisotrope Stoffe das Fließpotential eingeführt [44]. In späteren Berufsjahren arbeitete er mehr zu den mathematischen Grundlagen der praktischen Aufgaben. Am bekanntesten ist wohl seine Wahrscheinlichkeitstheorie über die Grenzwertdefinition der relativen Häufigkeit zufälliger Ereignisse (ab 1919), die trotz Kritik an Grundlagenaspekten unter Physikern weite Verbreitung fand. Neben der Forschung engagierte sich von Mises rastlos für Lehre und Wissenschaftsorganisation [6], weshalb maßgeblich ihm die Etablierung der angewandten Mathematik als autonome Fachrichtung zu verdanken ist. Aufbauend auf der Erkenntnistheorie von E. Mach gelangte von Mises zu einer empiristischen Wissenschaftsauffassung, dem Positivismus und fasste seine Sicht 1939 in einem Lehrbuch zusammen [45]. Einen Teil seiner Auffassungen fand er auch im Werk von Rainer Maria Rilke wieder. Vermutlich auch daher hat er sich ab seiner Straßburger Zeit (seiner ersten Prof.-Stelle dort 1909) mit Rilke beschäftigt, alles von ihm und über ihn Geschriebene gesammelt, und hatte am Lebensende die größte Rilke-Sammlung weltweit [26]. Als das akademische Leben nach dem Krieg wieder begonnen hatte, waren R. von Mises und H. Geiringer-von Mises 1951/52 12 Monate am Stück in Europa, von Mises dabei als Gastprofessor vor allem in Rom, aber zu Vorträgen auch in Paris, Wien, Berlin, Istanbul u.a. Auf dem Mechanik-Kongress in Istanbul hatte H. Geiringer einen der Sektionsvorträge: und zwar über ideal-plastische Körper [1]; denn sie zählte spätestens seit dem Stockholm-Kongress 1930 zu den weltweit erstrangigen Fachleuten in Plastizität, später auch in Genetik. Die Wahl zum korrespondierenden Mitglied der (Ost-Berliner) Deutschen Akademie der Wissenschaften 1950 hat von Mises mit Bedauern abgelehnt, weil sie in Amerika als politisch gerichtet ausgelegt worden wäre. John von Neumann

hat Gleiches wenige Tage später. Teile des Briefwechsels sind nachlesbar in [8] und [42].

Im Vorwort [40] der Neu-Edition des Positivismus-Lehrbuchs von R. von Mises spricht der Philosoph F. Stadler 1990 vom "im deutschsprachigen Mitteleuropa fast vergessenen Polyhistor Richard von Mises". Polyhistor heißt Universalgelehrter. Eine umfassende wissenschaftliche Biographie von R. von Mises steht tatsächlich noch aus, wie in der richtungsweisenden Arbeit [38] festgestellt wird.

R. v. Mises und H. Geiringer gehören zu den großen Mathematikern, die in den Büchern [4] und [14] aus dem "Jahr der Mathematik 2008" gewürdigt werden. Seit 2007 wird am Mathematik-Institut der Humboldt-Universität Berlin jährlich im Juni zur R. v. Mises-Vorlesung eingeladen, die aus einem historischen und einem fachlichen Vortrag besteht. Im Erstjahr ging es natürlich um Leben und Wirken von R. von Mises selbst [42]. Schon seit 1989 verleiht die GAMM jährlich den R. v. Mises-Preis an NachwuchswissenschaftlerInnen, und die Berlin School of Mathematics seit 2011 das Hilda Geiringer Scholarship an Doktorandinnen. Die Namen werden also aufgegriffen, in der Mathematik und in der Emigrationsforschung.

Zurück zu Delft 1924 und Straßburg 1913

Mit dem Beitrag Henckys war für die Kennzeichnung der Elastizitätsgrenze bei isotropen Stoffen sowohl die formelmäßige Grundlegung als auch die Bezugnahme zur Energie der reinen Gestaltänderung abgeschlossen. Aus letzterem ergibt sich die oft verwendete sperrige Bezeichnung "Gestaltänderungsenergiekriterium" (GEK), wenn dies als Ansatz für die Bezifferung einer Werkstoffbelastung gedient hat. Das GEK ist nicht eigentlich eine Plastizitätstheorie, es markiert aber für isotrope duktile Stoffe den Übergang von Elastizität zu Plastizität und wird auch heute dafür verwendet, wie der Ingenieurs-Literatur zu entnehmen ist. Obwohl Henckys Beitrag untrennbar zu diesem Kriterium dazugehört, haben wir den 100. Jahrestag des von Mises'schen Artikels in den Göttinger Nachrichten zum Anlass unseres Textes genommen.

Literatur

- [1] ARF, Cahit (Herausgeber): *Proc. of the eighth Int. Congr. on theoretical and applied Mechanics, Istanbul, August 1952, Vol. 1 and Vol. 2.* Faculty of Science of the University of Istanbul, 1953, 1955.
- [2] BELTRAMI, Eugenio: *Sulle condizioni di resistenza dei corpi elastici.* Rend. R. Ist. Lomb. Sc. Lett., XVIII(2):705–714 [Nachdruck in HOEPLI 1920, p. 180–189], 1885.
- [3] BELTRAMI, Eugenio: *Sulle condizioni di resistenza dei corpi elastici (englisch: On the conditions of resistance of an elastic body).* Il Nuovo Cimento, XVIII(1):145–155, 1885.
- [4] BERGMANN, Birgit und Moritz Epple (Herausgeber): *Jüdische Mathematiker in der deutschsprachigen akademischen Kultur.* Springer Verlag, Heidelberg, 2008.
- [5] BERNHARDT, Hannelore: *Zum Leben und Wirken des Mathematikers Richard von Mises.* NTM-Schriftenr. Gesch. Naturwiss., Technik, Med., 16(2):40–49, 1979.
- [6] BERNHARDT, Hannelore: *Zur Institutionalisierung der angewandten Mathematik an der Berliner Universität 1920–1933.* NTM-Schriftenr. Gesch. Naturwiss., Technik, Med., 17(1):23–31, 1980.
- [7] BERNHARDT, Hannelore: *Skizzen zu Leben und Werk von Richard Mises.* In: KERBER, W. (Herausgeber): *Österreichische Mathematik und Physik: W. Gröbner – R. von Mises – W. Pauli,* Seiten 51–62. Zentralbibliothek für Physik in Wien, 1993.
- [8] BERNHARDT, Hannelore: *Richard von Mises und die Berliner Akademie der Wissenschaften.* Leibniz-Sozität, Sitzungsberichte, 64:180–185, 2004.

- [9] BINDER, Christa: *Hilda Geiringer – ihre ersten Jahre in Amerika*. In: DEMIDOV, S. et al. (Herausgeber): *Amphora: Festschrift für Hans Wussing zum 65. Geburtstag*, Seiten 25–53. Birkhäuser Verlag, Basel, 1992.
- [10] DUSEAUX, Marc: *Temperature profile and thermal stress calculations in GaAs crystals growing from the melt*. J. of Cryst. Growth, 88(2):576–590, 1983.
- [11] EDEN, Alp und Gürol Irzik: *German mathematicians in exile in Turkey: Richard von Mises, William Prager, Hilda Geiringer, and their impact on Turkish mathematics*. Hist. Math., 39: 432–459, 2012.
- [12] FÖPPL, August und Ludwig Föppl: *Drang und Zwang*. Oldenbourg Verlag München und Berlin, 1920.
- [13] GERICKE, Helmuth: *50 Jahre GAMM*. Ingenieur-Archiv, 41(Suppl. 1):3–36, 1972.
- [14] GRÖTSCHHEL, Iris: *Das mathematische Berlin – Historische Spuren und aktuelle Szene*. Berlin Story Verlag, 2008.
- [15] HENCKY, Heinrich: *Zur Theorie plastischer Deformationen und der hierdurch im Material hervorgerufenen Nachspannungen*. ZAMM, 4(4):323–334, 1924.
- [16] HENCKY, Heinrich: *Zur Theorie plastischer Deformationen und der hierdurch im Material hervorgerufenen Nachspannungen*. In: BIEZENO, C.B. und J. M. Burgers (Herausgeber): *Proc. of the first Int. Congr. for applied Mech., Delft, April 1924*, Seiten 312–317. Techn. Boekhandel en Drukkerij J. Waltman jr., Delft, 1925.
- [17] HENCKY, Heinrich: *Die Begriffe Härte und Formänderungswiderstand und ihre Anwendungsmöglichkeiten im Materialprüfungsweisen*. Der Stahlbau, 17(Heft 5/7):21–23, 1944.
- [18] HENCKY, Heinrich: *Neuere Verfahren in der Festigkeitslehre*. Oldenbourg Verlag, München, 1951.
- [19] HOEPLI, Ulrico (Herausgeber): *Opere Matematiche di Eugenio Beltrami, Tome 4*. Facolta di scienze della R. Università di Roma, 1920.
- [20] HUBER, Maksymilian T.: *O podstawach teorii wytrzymałości (deutsch: Über die Grundlagen der Festigkeitstheorie)*. Prace matematyczno-fizyczne, XV:47–59 (wie Huber 1904b, nur Kap. 12 fehlt), 1904a.
- [21] HUBER, Maksymilian T.: *Własciwa praca odkształcenia jako miara wyteżenia materialu (deutsch: Die spezifische Formänderungsarbeit als Maß der Anstrengung eines Materials)*. Czasopismo Techniczne, XXII(3,4,5,6):34–40,49–50,61–62,80–81 [zitiert in HUBER 2004], 1904b.
- [22] HUBER, Maksymilian Tytus: *Specific work of strain as a measure of material effort*. Arch. Mech., 56(3):173–190, 2004.
- [23] KADIOGLU, Sevtap und Gaye S. Erginöz: *An emigrant scientist in Istanbul university: Richard Martin Edler von Mises (1883-1953)*. Almages, 2(2):102–123, 2011.
- [24] KURZ, Matthias, Artur Pusztai und Georg Müller: *Development of a new powerful computer code CrysVUN++ especially designed for fast simulation of bulk crystal growth processes*. J. of Cryst. Growth, 198/199:101–106, 1999.
- [25] MAXWELL, James Clerk: *The origin of Clerk Maxwell's Electric ideas, as described in familiar letters to W. Thomson (1850's period, edited by J. Larmor)*. Math. Proc. of the Cambridge Phil. Soc., 32(5):695–748 [Teil-Nachdruck in RYCHLEWSKI 2011], 1937.
- [26] OBERMÜLLER, Paul, Herbert Steiner und Ernst Zinn (Herausgeber): *Katalog der Rilke-Sammlung Richard von Mises*. Insel-Verlag, Frankfurt am Main, 1966.
- [27] OLESIAK, Zbigniew S.: *Professor Maksymilian Tytus Huber: His Life and Activity*. (Privat versandtes Manuskript, eine Veröffentlichung konnte nicht ermittelt werden.), Seiten 1–20, 2000.
- [28] OLESIAK, Zbigniew S.: *On Polish Mechanics (1850-1950)*. In: *21st International Congress of theoretical and applied Mechanics (IC-TAM), August 15-21, 2004*. Local Organizing Committee, Warsaw, 2004a.
- [29] OSAKADA, Kozo: *History of plasticity and metal forming analysis*. J. of Materials Processing Technology, 210(4):1436–1454, 2010.
- [30] PASCAL, Ernesto: *Commemorazione di Eugenio Beltrami*. Rend. R. Ist. Lomb. Sc. Lett., 34(2):57–108 [zitiert in Int. Cat. Sci. Lit., Mathematics, Roy. Soc. London, 1902, p. 92], 1901.
- [31] PASCAL, Ernesto: *Eugeniusz Beltrami*. Wiadomości matematyczne, 6:1–56 [zitiert in Int. Cat. Sci. Lit., Mathematics, Roy. Soc. London, 1904, p. 109], 1902.
- [32] PASCAL, Ernesto: *Eugenio Beltrami*. Mathemat. Annal., 57(1):65–107, 1903.
- [33] REISMAN, Arnold: *Hilda Geiringer: A pioneer of the applied mathematics and a woman ahead of her time was saved from fascism by Turkey*. Woman in Judaism: A multidisciplinary Journal, 4(2):1–20, 2007.
- [34] RYCHLEWSKI, Jan: *Elastic Energy Decomposition and Limit Criteria*. Engng. Trans., 59(1):31–63 (Nachdruck von J. Rychlewskis russ. Artikel: *Razlozheniya uprugoi energii i kriterii predelnosti*, in: *Uspekhi Mekhaniki 7 (1984) 3, 51–80*), 2011.
- [35] SCHLEICHER, F.: *Der Spannungszustand an der Fließgrenze*. ZAMM, 6(8):199–216, 1926.
- [36] SEELHOFFER-SCHILLING, Birgit: *Umschnürte Stahlbetonstützen: Geschichtliche Entwicklung*. Dissertation, ETH Zürich, 2008.
- [37] SIEGMUND-SCHULTZE, Reinhard: *Richard von Mises – ein früherer Emigrant in Distanz und Nähe zur österreichischen Mathematik, Literatur und Philosophie*. Internat. Math. Nachrichten, 187:21–31, 2001.
- [38] SIEGMUND-SCHULTZE, Reinhard: *A Non-Conformist Longing for Unity in the Fractures of Modernity: Towards a Scientific Biography of Richard von Mises (1883-1953)*. Science in Context, 17:333–370, 2004.
- [39] SIEGMUND-SCHULTZE, Reinhard: *Richard von Mises – 125 Jahre nach der Geburt des Gründers der "ersten mathematisch seriösen Schule der angewandten Mathematik in Deutschland"*. GAMM Rundbrief, (1):6–12, 2008.
- [40] STADLER, Friedrich: *Richard von Mises – Wissenschaft im Exil*. In: VON MISES 1990, Seiten 7–30, 1990.
- [41] TANNER, Roger I. und Elizabeth Tanner: *Heinrich Hencky: a rheological pioneer*. Rheol. Acta, 42:93–111, 2003.
- [42] VOGT, Annette: *In memoriam Richard von Mises*. Preprint des Inst. f. Math. der HU Berlin, Nr. 14, 2007.
- [43] VON MISES, Richard: *Mechanik der festen Körper im plastisch-deformablen Zustand*. Gött. Nachr., Math.-Phys. Kl., (4):582–592, 1913.
- [44] VON MISES, Richard: *Mechanik der plastischen Formänderung von Kristallen*. ZAMM, 8(3):161–185, 1928.
- [45] VON MISES, Richard: *Kleines Lehrbuch des Positivismus*. Suhrkamp [von F. Stadler besorgte Neu-Edition des deutschen Erstdrucks 1939, damals im Verlag W.P. Van Stockum & Zoon, Den Haag], 1990.
- [46] ZAMM-Nachr.: *Prot. des ersten Int. Kongr. für angew. Mechanik*. ZAMM, 4(3):272–276, 1924.
- [47] ZAMM-Nachr.: *Prot. des zweiten Int. Kongr. für techn. Mechanik*. ZAMM, 6(5):424–427, 1926.

40 Über die DGKK

Die Deutsche Gesellschaft für Kristallwachstum und Kristallzüchtung (DGKK) ist eine gemeinnützige Organisation zur Förderung der Forschung, Lehre und Technologie auf dem Gebiet des Kristallwachstums und der Kristallzüchtung. Sie vertritt die Interessen ihrer Mitglieder auf nationaler und internationaler Ebene.

Die DGKK ist Mitglied der Bundesvereinigung Materialwissenschaft und Werkstofftechnik e.V. (BV MatWerk).

Die DGKK veranstaltet jährlich die Deutsche Kristallzüchtungstagung, gibt zweimal jährlich das DGKK-Mitteilungsblatt heraus und unterhält eine Web-Seite (www.dgkk.de). Die Arbeit der Gesellschaft ist in Arbeitskreisen organisiert.

Die Deutsche Gesellschaft für Kristallwachstum und Kristallzüchtung (DGKK) ist eine gemeinnützige Organisation zur Förderung der Forschung, Lehre und Technologie auf dem Gebiet des Kristallwachstums und der Kristallzüchtung. Sie vertritt die Interessen ihrer Mitglieder auf nationaler und internationaler Ebene.

Die DGKK ist Mitglied der Bundesvereinigung Materialwissenschaft und Werkstofftechnik e.V. (BV MatWerk).

Die DGKK veranstaltet jährlich die Deutsche Kristallzüchtungstagung, gibt zweimal jährlich das DGKK-Mitteilungsblatt heraus und unterhält eine Web-Seite (www.dgkk.de). Die Arbeit der Gesellschaft ist in Arbeitskreisen organisiert.

Vorsitzender

Dr. Jochen Friedrich
Fraunhofer IISB
Schottkystraße 10, 91058 Erlangen, Germany
Tel.: +49-9131-761-270
Fax: +49-9131-761-280
E-Mail: jochen.friedrich@iisb.fraunhofer.de

Stellvertretender Vorsitzender

Prof. Dr. Peter Rudolph
Crystal Technology Consulting (CTC)
Helga-Hahnemann-Str. 57, 12529 Schönefeld
Tel.: 03379 / 444 253
E-Mail: rudolph@ctc-berlin.de

Schatzmeister

Prof. Dr. Peter Wellmann
Institut für Werkstoffwissenschaften 6
Universität Erlangen-Nürnberg
Martensstr. 7, 91058 Erlangen
Tel.: 09131 / 85 27635
Fax: 09131 / 85 28495
E-Mail: peter.wellmann@ww.uni-erlangen.de

Schriftführerin

Dr. Christiane Frank-Rotsch
Leibniz-Institut für Kristallzüchtung (IKZ)
Max-Born-Str.2, 12489 Berlin
Tel.: 030 / 6392 3031
Fax: 030 / 6392 3003
E-Mail: christiane.frank-rotsch@ikz-berlin.de

Beisitzer

Dr. Klaus Dupré
FEE GmbH
Struthstr. 2
55743 Idar-Oberstein
Tel.: 06781 / 21191
Fax: 06781 / 70353
E-Mail: dupre@fee-io.de

Dr. Bernhard Freudenberg
Beratender Ingenieur
Tel.: 0151 466 55 993
Fax: 09561 329 631
E-Mail: bernhard.freudenberg@t-online.de
bernhard.freudenberg@sw-innovations.de

Prof. Dr. Peter Gille
Ludwig-Maximilians-Universität München
Department für Geo- u. Umweltwissenschaften
Sektion Kristallographie
Theresienstr.41
80333 München
Tel.: 089 / 2180-4355
Fax: 089 / 2180-4334
E-Mail: peter.gille@lrz.uni-muenchen.de

Bankverbindung:

Sparkasse Karlsruhe
Kto.-Nr.: 104 306 19
BLZ: 660 501 01
IBAN DE84 6605 0101 0010 4306 19
SWIFT-BIC: KARSDE66

Redaktion und Anzeigen:

Dr. Wolfram Müller
Leibniz-Institut für Kristallzüchtung (IKZ)
Tel.: 030 / 6392 3074
Fax: 030 / 6392 3003

Uwe Rehse
Leibniz-Institut für Kristallzüchtung (IKZ)
Tel.: 030 / 6392 3070
Fax: 030 / 6392 3003
E-Mail: redaktion@dgkk.de

Redaktionsschluss:

30. November 2012
ISSN 2193-374X (Druck)
ISSN 2193-3758 (Internet)
Gesetzt mit pdfL^AT_EX.

Nachrichten der DGKK, Stellenangebote, Stellengesuche:

Dr. Christiane Frank-Rotsch
Leibniz-Institut für Kristallzüchtung (IKZ)
Tel.: 030 / 6392 3031
Fax: 030 / 6392 3003
E-Mail: christiane.frank-rotsch@ikz-berlin.de

Internetredaktion:

Die Internetredaktion setzt sich gegenwärtig aus der Schriftführerin, der Webmasterin und dem Redaktionsteam des Mitteilungsblattes zusammen.

E-Mail: internet.redaktion@dgkk.de

Sabine Bergmann
Leibniz-Institut für Kristallzüchtung (IKZ)
Tel.: 030 / 6392 3093
Fax: 030 / 6392 3003
E-Mail: webmaster@dgkk.de
WWW: <http://www.dgkk.de>

Mitgliedschaft:

Der Mitgliedsbeitrag kostet zur Zeit im Jahr 20 € und für Studenten ermäßigt 10 €. Beiträge für juristische Personen erhalten Sie auf Anfrage. Das Aufnahmeformular finden Sie auf der letzten Seite in diesem Heft. Sie können sich aber auch über die Internetseite der DGKK online anmelden. Dort finden Sie auch die DGKK Stichwortliste.

Arbeitskreis

„Herstellung und Charakterisierung von Massiven Halbleiterkristallen“

Sprecher:

Prof. Dr. Peter Wellmann

Institut für Werkstoffwissenschaften 6

Universität Erlangen-Nürnberg

Martensstr. 7, 91058 Erlangen

Tel.: 09131 / 85 27635

Fax: 09131 / 85 28495

E-Mail: peter.wellmann@ww.uni-erlangen.de

Arbeitskreis

„Kristalle für Laser und Nichtlineare Optik“

Sprecher:

Prof. Dr. Manfred Mühlberg

Institut für Kristallographie der Universität zu Köln

Greinstr. 6, 50939 Köln

Tel.: 0221 / 470 4420

Fax: 0221 / 470 4963

E-Mail: manfred.muehlberg@uni-koeln.de

Arbeitskreis

„Kinetik“

Sprecher:

Dr. Wolfram Miller

Leibniz-Institut für Kristallzüchtung (IKZ)

Max-Born-Str.2, 12489 Berlin

Tel.: 030 / 6392 3074

Fax: 030 / 6392 3003

E-Mail: wolfram.miller@ikz-berlin.de

Arbeitskreis

„Intermetallische und oxidische Systeme mit Spin- und Ladungskorrelationen“

Sprecher:

Dr. Wolfgang Löser

Leibniz-Institut für Festkörper- und Werkstoffforschung Dresden

Helmholtzstr. 20, 01069 Dresden

Tel.: 0351 / 4659 647

Fax: 0351 / 4659 480

E-Mail: w.loeser@ifw-dresden.de

Arbeitskreis

„Epitaxie von III-V-Halbleitern“

Sprecher:

Prof. Dr. Michael Heuken

Aixtron AG Aachen

52134 Herzogenrath, Kaiserstr. 98

Tel.: 0241 / 8909 154

Fax: 0241 / 8909 149

E-Mail: m.heuken@aixtron.com

Arbeitskreis

„Angewandte Simulation in der Kristallzüchtung“

Sprecher:

Dr. Albrecht Seidl

Wacker SCHOTT Solar GmbH

Industriestr. 13, 63755 Alzenau

Tel.: 06023 / 91 1406

Fax: 06023 / 91 1801

E-Mail: albrecht.seidl@wackerschott.com

Tagungskalender

2013

August 2013

15th Summer School on Crystal Growth (ISSCG-15)

Danzig, Polen

<http://science24.com/event/isscg15>

11. – 16. August 2013

17th International Conference on Crystal Growth and Epitaxy (ICCGE-17)

Warschau, Polen

Leitung: Prof. Stanislaw Krukowski (High Pressure Center, Warschau),

Prof. Roberto Fornari (IKZ, Berlin)

<http://science24.com/event/iccge17>

30. September – 05. Oktober 2013

17th International Workshop on Bulk Nitride Semiconductor (IWBNS-VIII)

Kloster Seeon

Leitung: Dr. Elke Meissner (IISB Erlangen)

<http://www.iwbns2013.iisb.fraunhofer.de/>

05. – 06. Dezember 2013

AK "Epitaxie von III/V Halbleitern"

Ilmenau

<http://www.tu-ilmenau.de/pv/dgkk2013>

Antrag auf Mitgliedschaft in der DGKK

Ich (Wir) beantrage(n) hiermit die Mitgliedschaft in der Deutschen Gesellschaft für Kristallwachstum und Kristallzüchtung e. V. (DGKK).

Art der Mitgliedschaft: ordentliches Mitglied studentisches Mitglied korporatives Mitglied

Gewünschter Beginn der Mitgliedschaft: _____

Name: _____ **Vorname:** _____

Titel: _____ **Beruf:** _____

Geburtsdatum: _____

Dienstanschrift (Firma, Institut, etc.):

Straße, Haus-Nr.: _____

PLZ: _____ Ort: _____

Telefon: _____ Fax: _____ Email: _____

Privatanschrift :

Straße, Haus-Nr.: _____

PLZ: _____ Ort: _____

Telefon: _____ Fax: _____ Email: _____

Tätigkeit, Erfahrung charakterisieren

über die DGKK – Stichwortliste (Bitte maximal 10 Stichwortnummern angeben!)

--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

zusätzlich noch 3 Begriffe (,-getrennt): _____

Einverständnis zur Veröffentlichung der Daten (außer Privatdaten) über die Suchfunktion der DGKK-Homepage (<http://www.dgkk.de>) ja nein

Ort, Datum: **Unterschrift:**

Lastschriftverfahren

Hiermit ermächtige ich Sie widerruflich die von mir zu entrichtenden Zahlungen (Mitgliedsbeiträge DGKK) von folgender Bankverbindung durch Lastschrift einzuziehen:

Konto Nr. _____ **BLZ** _____

Bank _____

Datum: **Unterschrift:**

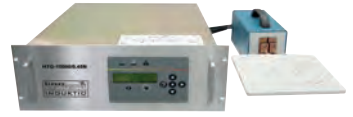
bitte per Post oder Fax an Frau Dr. Christiane Frank-Rotsch (DGKK-Schriftführerin)
 Leibniz-Institut für Kristallzüchtung · Max-Born-Straße 2 · D-12489 Berlin
 Telefax: 030 6392 3003

FURNACE TECHNOLOGY LEADERSHIP

linn
High Therm

info@linn.de

www.linn.de



Induction heating

High frequency generators up to 100 kW, 100 kHz - 27,12 MHz. **Medium frequency inverter** up to 1000 kW, 2 - 80 kHz.

Crystal growth system

Production of low defect SiC single crystals for high-performance, high-temperature electronics and optoelectronics. It allows for precisely defined process conditions (temperature, atmosphere) to grow up to 4" 4H and 6H SiC single crystals by physical vapour transport. System includes growth reactor, a high-stability induction heating unit (medium frequency 10 kHz/20 kW), process controller and a PC interface for monitoring and programming. Tmax 2300 °C.



Tube furnace

3 zone vertical tubular furnace for directional solidification of metals under vacuum / protective gas atmosphere e.g. argon and nitrogen. The furnace is mounted on a linear unit and is led above the sample. The furnace is connected with a cooling tube, suitable for liquid metal loading e.g. Galn. Tmax 1850 °C. Power: appr. 8 kW. Linear unit: 3,6 mm/h to 360 mm/h. Fast cooling: appr. 100 mm/s.



Horizontal zone melting system

for simultaneous purification of 6 Germanium ingots (length 600 mm, diameter 40 mm) in graphite boats. Production of semiconductor materials with a defined purity. Tmax: 1600 °C. Dim. of useful chamber: 6 quartz tubes, inner diameter 100 mm x 700 mm heated length. Max. induction heating power: appr. 50 kW, 25 - 30 kHz. Cleaning speed: 15 - 150 mm/h, back shift in < 2 min. Angle of inclination of the quartz tubes: 0 to 10°. Atmosphere: Nitrogen and Argon / vacuum at normal pressure.

Micro-Crystal growth system

Pulling of single crystalline fibers from the melt under inert gas or air. Fiber dimensions: $\varnothing = 0,2 - 2,0$ mm, $l_{max} = 250$ mm. Up to 5000 mg of starting material is molten in a platinum crucible (for high-melting compounds also Ir-, W-, Mo-crucibles) and crystal is pulled down through a capillary nozzle with a secondary heater around the nozzle.

Power supply:
Primary heater
80 W (max. 500 W),
secondary heater 30 W
(max. 200 W).

Tube furnace

for horizontal crystal growing processes. Resistance heated. Bridgman process and zone-melting under protective gas / vacuum. Adjustable 1 - 200 mm/h. Single or multi zone. Tmax 1750 °C. Alumina, Sapphire or metal tubes.



Special systems according to customer specifications!

Wir schaffen Verbindungen

Anorganika · Organika · Boronsäuren
Fluorchemikalien · Reine und reinste Elemente
Metalle und Legierungen in definierten Formen
und Reinheiten · Seltenerdmetalle, Oxide,
Fluoride für die Kristallzucht · Laborgeräte
aus Platin und Platinlegierungen · Nano-Pulver

Produkte höchster Qualität.
Kürzeste Lieferzeiten. Exzellenter Service.
Zuverlässige und effiziente Zusammenarbeit.

