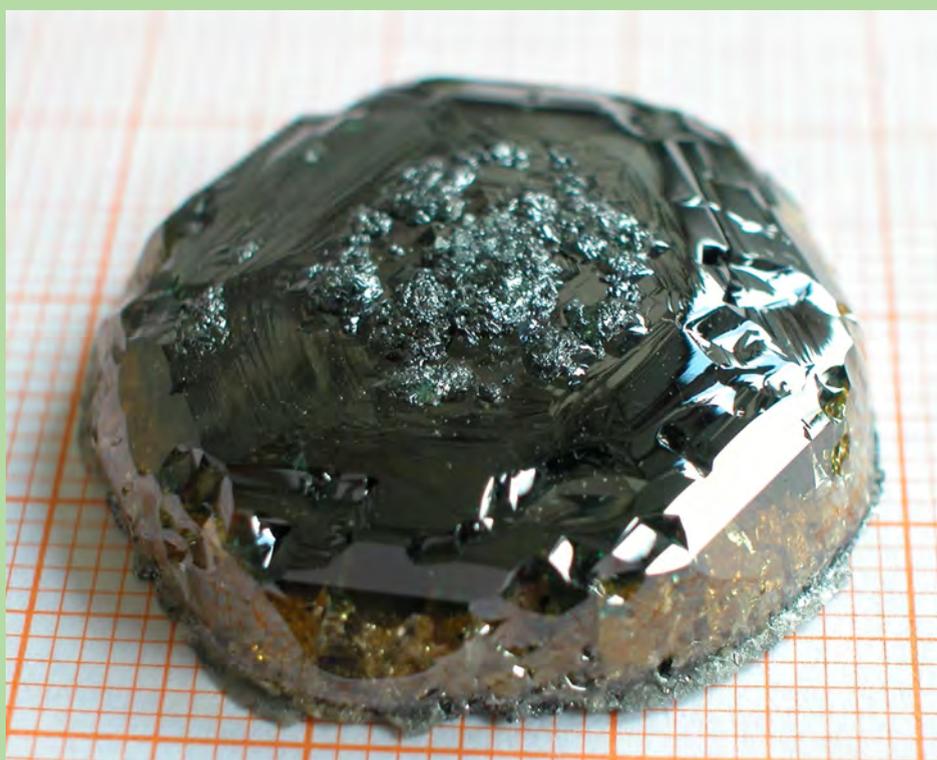


ISSN 2193-3758

Mitteilungsblatt  
Nr. 93 / 2011



Deutsche Gesellschaft  
für Kristallwachstum und  
Kristallzüchtung e.V.



---

## Inhaltsverzeichnis

Der Vorsitzende / Editorial . . . . .	3
DGKK-intern . . . . .	5
DGKK-Personen . . . . .	10
DGKK-Nachrichten . . . . .	12
DGKK-Fokus . . . . .	21
DGKK-Nachwuchs . . . . .	25
Über die DGKK . . . . .	28
Tagungskalender . . . . .	29

---

# 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](mailto:precious-metals-technology@heraeus.com)

[www.wc-heraeus.com/precious-metals-technology](http://www.wc-heraeus.com/precious-metals-technology)

**W. C. Heraeus**

## Der Vorsitzende

### Liebe Kolleginnen und Kollegen,

ich habe mir mal die Mühe gemacht, alle Themen der bisher verliehenen (jeweils 110) Nobelpreise für Physik und Chemie auf das Wort oder die Silbe „Kristall“ bzw. das Adjektiv „kristallin“ durchzusehen. Ich fand vier für Physik und zwar 1. von Laue: „für die Beugung von Röntgenstrahlen beim Durchgang durch Kristalle“ (1914), 2. die beiden Braggs „für die Erforschung der Kristallstrukturen mittels Röntgenstrahlen“ (1915), 3. Davisson und Thomson: „für die experimentelle Entdeckung der Beugung von Elektronen durch Kristalle“ (1937) und 4. de Gennes: „für Arbeiten über Ordnungsprozesse in Flüssigkristallen“ (1991). Drei Pendants fand ich bis zum September 2011 auf dem Gebiet der Chemie – 1. Sumner: „für die Entdeckung der Kristallisierbarkeit von Enzymen“ (1946), 2. Klug. „für die Entwicklung kristallographischer Verfahren zur Entschlüsselung biologisch wichtiger Nukleinsäure-Protein-Komplexe“ (1982) und 3. Hauptmann und Karle: „für Leistungen in der Entwicklung direkter Methoden zur Bestimmung von Kristallstrukturen“ (1985). Nun ist am 5. Oktober diesen Jahres ein weiterer Preisträger der Chemie hinzugekommen: Daniel Shechtman „für die Entdeckung der Quasikristalle“. Darüber freuen wir uns als Kristallzüchter natürlich besonders, wenn im Sujet einer solch exquisiten Ehrung der Ausdruck „Kristall“ genannt wird. Haben wir es doch immer wieder recht schwer, der Allgemeinheit zu erklären, was es bedeutet, „den“ und nicht „das“ Kristall zu züchten (hin und wieder erlebe ich Vorträge über „das“ Kristall, obwohl der Glaszustand definitiv nicht gemeint ist). Aus meiner Durchsicht folgt, dass in keiner Preisbegründung das Wort „Kristallzüchtung“ auftaucht. Am nächsten kommt da noch der Nobelpreis für Chemie des Jahres 1946 zur „Kristallisierbarkeit“ von Enzymen. Übrigens wurde im gleichen Jahr der Physikpreis an Percy Williams Bridgman verliehen, jedoch nicht, wie man meinen könnte, für die gerichtete Kristallisation sondern „für die Erfindung eines Apparates zur Erzeugung von extrem hohem Druck . . .“, was natürlich auch viel mit Kristallzüchtung wie der Diamanthochdrucksynthese zu tun hat. Man muss also schon etwas genauer in die Themen eindringen, um direkte Beziehungen zum Kristallwachstum zu finden. Da wäre z.B. der Nobelpreis für Physik 1978 an Pjotr Kapiza „für seine grundlegenden Erfindungen und Entdeckungen in der Tieftemperaturphysik“, die auch mit seinen bereits 1927 weltweit erstmals beschriebenen Züchtungsexperimenten von Bismutkristallen nach der Schmelzzonentechnik in einem horizontalen Boot verbunden sind. So wird man noch etliche weitere Nobelpreise finden, die ohne gezüchtete Kristalle nicht entstanden wären. Jedenfalls ereilen mich nun etliche Fragen in meinem Familien- und Freundeskreis „was denn nun ein Quasikristall“ sei. Gar nicht so einfach, das sofort zu erklären. So erging es auch uns, einer renommierten „Kristallzüchterrunde“ am Mittagstisch des 5. Oktober während der diesjährigen Arbeitskreistagung zur „Herstellung und Charakterisierung von massiven Halbleiterkristallen“ in Erlangen. Wir informierten uns gegenseitig geradezu

jubilend über die soeben verbreitete Verleihung des Nobelpreises für Quasikristalle, stellten aber im gleichen Atemzug fest, dass wir jetzt besonders gefragt sind, eine verständliche Antwort über den Gegenstand der Trophäe zu geben. Da fielen Worte wie Aperiodizität, Überstruktur, Penrosemuster. Einer „winkte“ sogleich Wikipedia in seinem iPhone herbei. . . . Ich bin mir sicher, Peter Gille liefert uns in der heutigen Ausgabe auf Seite 21 einen professionellen, auf eigenen experimentellen Ergebnissen aufbauenden und zugleich spannenden Überblick.

Was passierte noch seit Erscheinen unseres letzten Mitteilungsheftes? Zwei bemerkenswerte Tagungen – der „5th International Workshop on Crystal Growth Technology (IWCGT-5)“ Ende Juni in Berlin-Köpenick, der das ausdrückliche Lob vieler deutscher und internationaler Kristallzüchter einbrachte, was vor allem an das Tagungskomitee des IKZ unter Leitung von Roberto Fornari ergeht und „The 18th American Conference on Crystal Growth and Epitaxy“ Anfang August in Monterey, California, mit über 15 deutschen Teilnehmern, worüber auch in dieser Ausgabe berichtet wird. Die Vorbereitungen der ICCGE-17 und ISSCG-15 im Jahre 2013 in Warschau bzw. Gdansk unter aktiver Mitwirkung unserer Gesellschaft gehen gut voran. Mein besonderer Dank geht an Wolfram Miller, Albrecht Seidl, Matthias Bickermann, Jochen Friedrich, Peter Gille, Uwe Rehse und weitere beteiligte, die Zeit fanden, den Entwurf einer neuen DGKK-Satzung auszuarbeiten, was schon lange überfällig geworden war. Alle DGKK-Mitglieder werden ihn zur Diskussion vorgelegt bekommen, ehe wir sie sodann auf der nächsten Jahreshauptversammlung verabschieden. Hervorzuheben ist auch Tina Sorgenfrei's nicht nachlassende Mühe, eine Jugendfraktion der DGKK aufzubauen. Unmittelbar vor der nächsten DKT Anfang März 2012 in Freiberg organisiert sie für unsere Nachwuchswissenschaftler/innen eine Firmenbesichtigung bei der FCM GmbH mit anschließender Gesprächsrunde. Ich hoffe, die Jugend wird zahlreich teilnehmen. Ebenfalls haben wir vor, im kommenden Jahr wieder eine „3. DGKK-Schule zur Siliziumherstellung für die Photovoltaik“ durchzuführen, die bisher sehr gut, vorrangig von Mitarbeitern der Industrie, besucht wurde.

Am 25. November traf sich der DGKK-Vorstand in Freiberg zur Übergabe des „Staffelstabes“ an die neue Leitung ab 2012. Auf dieser Beratung wurden von uns auch kritisch diejenigen Aufgaben angesprochen, die wir noch nicht bewältigt haben, wie z.B. die Anfertigung eines Strategiepapiers der DGKK, die neue DGKK-Homepage und eine umfassende Information zu den Aktivitäten der deutschen Kristallzüchtungsunternehmen für das „European Network“. Ich wünsche uns allen, besonders dem neuen Vorsitzenden Jochen Friedrich, dafür viel Kraft und Erfolg!

Euer  
Peter Rudolph

## 4 Editorial

Nach dem recht umfangreichen Sommerheft (MB 92) liegt nun das „Weihnachtsheft“ (ab jetzt mit ISSN-Nummer) in einer etwas schlankeren Form vor. So findet sich die damals aus Platzgründen verschobene Kurzbeschreibung der Promotionsarbeit von Frau Sorgenfrei in diesem Heft. Gerade bei dieser Art von Berichten (über abgeschlossene Promotionen oder Master-/Diplomarbeiten) sind wir auf Ihre Mithilfe angewiesen. Schließlich ist die Nachwuchsarbeit ein wichtiges Anliegen der DGKK. Deshalb möchten wir an dieser Stelle die Aufmerksamkeit auf die im August 2012 in Brasov (Rumänien) stattfindende Schule zur Kristallzüchtung und photovoltaischen Materialien lenken. Weiteres findet sich im Tagungskalender.

Im DGKK-Fokus geht es aus gegebenem Anlass um Quasikristalle, bzw. exakter gesagt: um Kristalle mit aperiodischer Struktur. Im von der Deutschen Physikalischen Gesellschaft herausgegebenen Physik Journal begrüßt einen auf der Titelseite

ein farbenfrohes Penrose-Muster. Wir haben uns entschieden, auf die Titelseite dieses Mitteilungsblattes einen realen Kristall abzubilden: ein AlN-Kristall mit gut sichtbaren Seitenfacetten. Bekanntermaßen gibt es auf diesem Gebiet noch großen Forschungsbedarf.

Gerne erwarten wir Bilder mit Beschreibungstext für die nächste Ausgabe des Mitteilungsblattes. Wir wollen uns an dieser Stelle auch mal bei Allen bedanken, die Beiträge für die letzten Hefte geliefert haben. Ein ganz besonderer Dank geht auch an einen Kollegen, der mit Erfolg und nicht unerheblichem Zeitaufwand uns bei der Suche nach den vielen Fehlerleufelchen zur Seite steht: Klaus Böttcher.

So hoffen wir, dass Sie auch dieses Mal viele Freude am Heft haben und wünschen Ihnen und Ihren Familien eine schöne Weihnachtszeit sowie einen guten Start ins Jahr 2012!

Die Redaktion

### Zum Titelbild

Das Titelbild zeigt einen Aluminiumnitrid-Einkristall (Durchmesser ca. 1“, Dicke ca. 8 mm), der an der Ludwig-Maximilians-Universität München aus der Gasphase gezüchtet wurde. Das Wachstum erfolgte nach der Sublimations-Rekondensationsmethode auf einer (001)-Oberfläche eines Siliziumcarbid-Substrats der SiCrystal AG, Erlangen, bei einer Wachstumstemperatur von ca. 1800°C. Bei diesen Temperaturen, die für die Züchtung von AlN als sehr niedrig gelten, ist die Wachstumsrate mit 30 µm/h gering. Höhere Temperaturen führen jedoch zu einer zu schnellen Zersetzung des SiC-Substrats. Die Kristallmorphologie zeigt deutlich die sechszählige Symme-

trie der (001)-Fläche des in der Wurtzitstruktur kristallisierenden Aluminiumnitrids. An der seitlichen Begrenzung des Kristalls dominieren die Facetten verschiedener Rhomboederflächen {10}. Das Projekt wird von der Bayerischen Forschungsförderung (Projekt-Nr. 860-09) gefördert.

#### Kontakt:

Dr. R. Radhakrishnan Sumathi, Prof. Dr. Peter Gille  
Ludwig-Maximilians-Universität München  
Department für Geo- und Umweltwissenschaften, Sektion Kristallographie  
Theresienstr. 41, D-80333 München.

### Inhaltsverzeichnis

Der Vorsitzende .....	3
Editorial .....	4
Zum Titelbild .....	4
DGKK-intern .....	5
Einladung zur Jahreshauptversammlung 2012 .....	5
Von der „Jungen DGKK“ für junge DGKKler und (Noch-)Nicht-DGKKler .....	8
Bericht DGKK Arbeitskreis: Massive Halbleiterkristalle – Wachstum und Charakterisierung .....	9
Bericht über die DGKK-Vorstandssitzung am 25.11.2011 in Freiberg/Sa. ....	9
DGKK-Personen .....	10
Die Mitglieder des DGKK-Vorstandes 2012 - 2013 .....	10
Neue Mitglieder 2010/2011 .....	11
Eine Ära auf dem Gebiet der Ausbildung von Kristallzüchtern geht zu Ende .....	12
DGKK-Nachrichten .....	12

Forscher von Fraunhofer und Industrie arbeiten an der kostengünstigeren Herstellung für Galliumnitridkristalle .....	12
5th International Workshop on Crystal Growth Technology (IWCGT-5) .....	13
The 18-th America Conference on Crystal Growth and Epitaxy (ACCGE-18) .....	18
Kristalle als Besuchermagnet am Fraunhofer IISB .....	20
Information from the International Organization for Crystal Growth (IOCG) .....	20
DGKK-Fokus .....	21
Unmögliche Kristalle? .....	21
DGKK-Nachwuchs .....	25
Abgeschlossene Promotion am Freiburger Materialforschungszentrum, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg .....	25
Abgeschlossene Promotion an der TU Berlin .....	27
Über die DGKK .....	28
Arbeitskreise .....	29
Tagungskalender .....	29

**DGKK-intern**

5

## **Einladung zur Jahreshauptversammlung 2012**

**An alle Mitglieder**

DGKK-Schriftführerin  
Dr. Christiane Frank-Rotsch  
Leibniz-Institut für Kristallzüchtung  
Max-Born-Str.2  
D-12489 Berlin  
Telefon (030) 6392 3031  
Telefax (030) 6392 3003  
EMAIL frank@ikz-berlin.de  
**24.11.2011**

### **Jahreshauptversammlung 2012 in Freiberg**

Liebe Mitglieder,

der Vorstand lädt Sie herzlich zur Jahreshauptversammlung 2012 ein, die anlässlich der Deutschen Kristallzüchtungstagung 2012 in Freiberg stattfindet.

Ort: Technische Universität Bergakademie Freiberg  
Mehrzwecksaal Alte Mensa  
Petersstraße 5  
09599 Freiberg / Sa.

Zeit: Mittwoch, 07. März 2012, 19:00

Weitere Informationen: <http://www1.dgkk.de/dkt2012/>

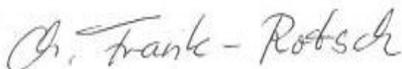
#### **Vorläufige Tagesordnung:**

1. Begrüßung und Feststellung der Beschlussfähigkeit
2. Bericht des Vorsitzenden
3. Bericht des Schriftführers
4. Bericht des Schatzmeisters und der Rechnungsprüfer
5. Entlastung des Vorstandes
6. Diskussion und Abstimmung über beantragte Satzungsänderung
7. Abstimmung zur Bestätigung der Wahl des engeren Vorstandes gemäß neuer Satzung
8. Wahl der Kassenprüfer
9. Wahl der Preiskommission
10. Diskussionen über Tagungen und Symposien:
  - Deutsche Kristallzüchtungstagung 2013
  - Deutsche Kristallzüchtungstagung 2014
  - Abschließende Diskussion und Beschluss über die Deutsche Kristallzüchtungstagung 2013
11. Berichte zu den DGKK – Arbeitskreisen
12. Verschiedenes

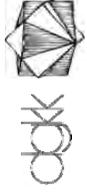
Anträge auf Erweiterung der Tagesordnung sind dem Vorstand rechtzeitig mitzuteilen. Siehe hierzu IV § 12 und VII §§ 6 und 7 der Satzung.

Wir möchten Sie bitten, Ihre Teilnahme an der Jahreshauptversammlung 2012 möglich zu machen.

Mit freundlichen Grüßen



Christiane Frank-Rotsch  
Schriftführerin DGKK



Das Highlight in Freiberg:  
Die weltgrößte Mineralsammlung



Organisation

Deutsche Gesellschaft für  
Kristallwachstum und  
Kristallzüchtung e.V. (DGKK)



Tagungsleitung

Prof. Dr. Dirk C. Meyer  
Institut für Experimentelle Physik  
TU Bergakademie Freiberg

Dr. Ulrike Wunderwald  
Fraunhofer Technologiezentrum  
Halbleitermaterialien THM Freiberg

Veranstaltungsort

Mehrzwecksaal „Alte Mensa“  
Petersstr. 5, 09599 Freiberg

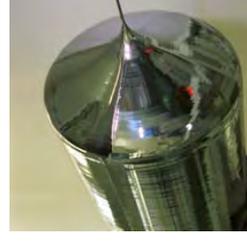
Information

Weitere Informationen unter

[www.dgkk.de/DKT-2012/](http://www.dgkk.de/DKT-2012/)

Deutsche Kristallzüchtungstagung  
2012

- Zweites Zirkular -



07.-09. März 2012

in Freiberg,

dem industriellen und wissenschaftlichen Zentrum der  
Halbleiterkristallzüchtung  
in Deutschland

<p><b>Programmkomitee</b></p> <p>Michael Heuken, Aixtron AG Aachen                  Peter Wellmann, Universität Erlangen                  Wolfgang Löser, IFW Dresden                  Manfred Mühlberg, Universität Köln                  Wolfram Müller, IKZ Berlin                  Albrecht Seidl, Schott Solar Wafer GmbH Alzenau                  Stefan Eichler, Freiburger Compound Materials GmbH</p> <p><b>Themenschwerpunkte</b></p> <p>Neben den Schwerpunktthemen aus den DGKK-Arbeitskreisen</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Epitaxie von III/V-Halbleitern</li> <li>- Herstellung und Charakterisierung von massiven Halbleitern</li> <li>- Intermetallische Verbindung mit Spin- und Ladungskorrelation</li> <li>- Kristalle für Laser und Nichtlineare Optik</li> <li>- Kinetik sowie</li> <li>- Angewandte Simulation in der Kristallzüchtung</li> </ul> <p>bildet die Korrelation von Defekten und Spannungen in kristallinen Halbleitern einen weiteren Themenschwerpunkt der Tagung.</p>	<p><b>Eingeladene Vorträge</b></p> <p>Andrei Vescan, RWTH Aachen, „Heteroepitaxie GaN auf Si für elektronische Bauelemente - herausragend gute Bauelementdaten trotz Defekte und Verspannungen“</p> <p>Peter Wellmann, Universität Erlangen, „Bulk Crystal Growth of SiC for Energy Saving Applications - Current Status and Role of Defect Reduction“</p> <p>Andreas Erb, Walter-Meißner-Institut München-Garching: „Züchtung von CaWO<sub>4</sub> -Massivkristallen für die Suche nach dunkler Materie“</p> <p>Talid Sinno, Univ. of Pennsylvania, USA</p> <p>Martin Bellmann, SINTEF Trondheim, Norwegen, „Modellierung von Kristallisationsprozessen zur Herstellung von Silizium für die Photovoltaik“</p> <p><b>Tagungsablauf und Rahmenprogramm</b></p> <p>07.03.2011, 10.00–12.00Uhr                  Möglichkeit der Besichtigung der Freiburger Halbleiterfirmen (Anmeldung über Online-Formular notwendig)  <b>Für Jugendmitglieder der DGKK bitte separate Anmeldung</b> über Jugend@dgkk.de</p> <p>07.03.2012, 14.30 Uhr bis 09.03.2012, 12.30 Uhr                  Plenar- und Fachvorträge aus den Arbeitskreisen                  Postersitzung</p> <p>07.03.2012, 19.00 Uhr                  DGKK-Mitgliederversammlung</p> <p>08.03.2012, 19.30 Uhr                  Abendveranstaltung im Freiburger Brauhoof</p> <p>09.03.2012, 14.00 Uhr                  Möglichkeit des Besuches der terra mineralia sowie des Fraunhofer THM</p>	<p><b>Programmkomitee</b></p> <p>Michael Heuken, Aixtron AG Aachen                  Peter Wellmann, Universität Erlangen                  Wolfgang Löser, IFW Dresden                  Manfred Mühlberg, Universität Köln                  Wolfram Müller, IKZ Berlin                  Albrecht Seidl, Schott Solar Wafer GmbH Alzenau                  Stefan Eichler, Freiburger Compound Materials GmbH</p> <p><b>Themenschwerpunkte</b></p> <p>Neben den Schwerpunktthemen aus den DGKK-Arbeitskreisen</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Epitaxie von III/V-Halbleitern</li> <li>- Herstellung und Charakterisierung von massiven Halbleitern</li> <li>- Intermetallische Verbindung mit Spin- und Ladungskorrelation</li> <li>- Kristalle für Laser und Nichtlineare Optik</li> <li>- Kinetik sowie</li> <li>- Angewandte Simulation in der Kristallzüchtung</li> </ul> <p>bildet die Korrelation von Defekten und Spannungen in kristallinen Halbleitern einen weiteren Themenschwerpunkt der Tagung.</p>	<p><b>Anmeldung</b></p> <p>Bitte melden Sie sich online an unter <a href="http://www.dgkk.de/DKT-2012/">www.dgkk.de/DKT-2012/</a></p> <p><b>Tagungsgebühr</b></p> <p>DGKK-Mitglied vor/nach 15.01.2012 65,-/100,-€                  Nicht-Mitglied vor/nach 15.01.2012 90,-/125,-€                  Studierende vor/nach 15.01.2012 40,-/50,-€</p> <p>Die Eintrittsgebühr für die terra mineralia ist vor Ort separat zu bezahlen.</p> <p>Mit der Anmeldebestätigung erhalten sie eine Rechnung mit den Angaben zur Bankverbindung.</p> <p><b>Termine</b></p> <p>Anmeldung mit reduzierter Tagungsgebühr bis 15.01.2012</p> <p>Anmeldung Beitrag mit Abstract (Vortrag/Poster) bis 15.01.2012</p> <p>Anmeldung Firmenbesichtigung bis 15.02.2012</p> <p><b>Zusätzliche Information</b></p> <p> <b>Fraunhofer THM</b></p> <p>In Verbindung mit der DKT-2012 findet die offizielle Eröffnung des Kristallisations- und Wafertechnikums am Fraunhofer Technologiezentrum Halbleitermaterialien THM am 07.03.2012 in Freiberg statt.</p>	<p><b>Programmkomitee</b></p> <p>Michael Heuken, Aixtron AG Aachen                  Peter Wellmann, Universität Erlangen                  Wolfgang Löser, IFW Dresden                  Manfred Mühlberg, Universität Köln                  Wolfram Müller, IKZ Berlin                  Albrecht Seidl, Schott Solar Wafer GmbH Alzenau                  Stefan Eichler, Freiburger Compound Materials GmbH</p> <p><b>Themenschwerpunkte</b></p> <p>Neben den Schwerpunktthemen aus den DGKK-Arbeitskreisen</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Epitaxie von III/V-Halbleitern</li> <li>- Herstellung und Charakterisierung von massiven Halbleitern</li> <li>- Intermetallische Verbindung mit Spin- und Ladungskorrelation</li> <li>- Kristalle für Laser und Nichtlineare Optik</li> <li>- Kinetik sowie</li> <li>- Angewandte Simulation in der Kristallzüchtung</li> </ul> <p>bildet die Korrelation von Defekten und Spannungen in kristallinen Halbleitern einen weiteren Themenschwerpunkt der Tagung.</p>	<p><b>Vorläufige Liste der Sponsoren</b></p> <p> <b>Freiberger</b></p> <p> <b>siltronic</b>                  perfect silicon solutions</p> <p> <b>SOLARWORLD</b>                  THE SUNPOWERED COMPANY</p> <p> <b>Freiberg Instruments</b>                  THM</p>	<p><b>Anmeldung</b></p> <p>Bitte melden Sie sich online an unter <a href="http://www.dgkk.de/DKT-2012/">www.dgkk.de/DKT-2012/</a></p> <p><b>Tagungsgebühr</b></p> <p>DGKK-Mitglied vor/nach 15.01.2012 65,-/100,-€                  Nicht-Mitglied vor/nach 15.01.2012 90,-/125,-€                  Studierende vor/nach 15.01.2012 40,-/50,-€</p> <p>Die Eintrittsgebühr für die terra mineralia ist vor Ort separat zu bezahlen.</p> <p>Mit der Anmeldebestätigung erhalten sie eine Rechnung mit den Angaben zur Bankverbindung.</p> <p><b>Termine</b></p> <p>Anmeldung mit reduzierter Tagungsgebühr bis 15.01.2012</p> <p>Anmeldung Beitrag mit Abstract (Vortrag/Poster) bis 15.01.2012</p> <p>Anmeldung Firmenbesichtigung bis 15.02.2012</p> <p><b>Zusätzliche Information</b></p> <p> <b>Fraunhofer THM</b></p> <p>In Verbindung mit der DKT-2012 findet die offizielle Eröffnung des Kristallisations- und Wafertechnikums am Fraunhofer Technologiezentrum Halbleitermaterialien THM am 07.03.2012 in Freiberg statt.</p>	<p><b>Eingeladene Vorträge</b></p> <p>Andrei Vescan, RWTH Aachen, „Heteroepitaxie GaN auf Si für elektronische Bauelemente - herausragend gute Bauelementdaten trotz Defekte und Verspannungen“</p> <p>Peter Wellmann, Universität Erlangen, „Bulk Crystal Growth of SiC for Energy Saving Applications - Current Status and Role of Defect Reduction“</p> <p>Andreas Erb, Walter-Meißner-Institut München-Garching: „Züchtung von CaWO<sub>4</sub> -Massivkristallen für die Suche nach dunkler Materie“</p> <p>Talid Sinno, Univ. of Pennsylvania, USA</p> <p>Martin Bellmann, SINTEF Trondheim, Norwegen, „Modellierung von Kristallisationsprozessen zur Herstellung von Silizium für die Photovoltaik“</p> <p><b>Tagungsablauf und Rahmenprogramm</b></p> <p>07.03.2011, 10.00–12.00Uhr                  Möglichkeit der Besichtigung der Freiburger Halbleiterfirmen (Anmeldung über Online-Formular notwendig)  <b>Für Jugendmitglieder der DGKK bitte separate Anmeldung</b> über Jugend@dgkk.de</p> <p>07.03.2012, 14.30 Uhr bis 09.03.2012, 12.30 Uhr                  Plenar- und Fachvorträge aus den Arbeitskreisen                  Postersitzung</p> <p>07.03.2012, 19.00 Uhr                  DGKK-Mitgliederversammlung</p> <p>08.03.2012, 19.30 Uhr                  Abendveranstaltung im Freiburger Brauhoof</p> <p>09.03.2012, 14.00 Uhr                  Möglichkeit des Besuches der terra mineralia sowie des Fraunhofer THM</p>	<p><b>Vorläufige Liste der Sponsoren</b></p> <p> <b>Freiberger</b></p> <p> <b>siltronic</b>                  perfect silicon solutions</p> <p> <b>SOLARWORLD</b>                  THE SUNPOWERED COMPANY</p> <p> <b>Freiberg Instruments</b>                  THM</p>
--	--	--	---	--	---	---	--	---

## 8 Von der „Jungen DGKK“ für junge DGKKler und (Noch-)Nicht-DGKKler

### Firmenbesichtigung der Freiburger Compound Materials GmbH im Rahmen der DKT 2012

Im Rahmen der kommenden Deutschen Kristallzüchtungstagung im März 2012 in Freiberg wird von der „Jungen DGKK“ eine Firmenbesichtigung der Freiburger Compound Materials GmbH organisiert. Eingeladen sind alle Studierenden und Doktoranden/innen, die Interesse an einer solchen Besichtigung haben. Stattfinden wird die Besichtigung am Vormittag des 07.03.12 vor Beginn der DKT.

Da die Teilnehmerzahl bei einer solchen Veranstaltung begrenzt ist, ist eine Vorabanmeldung bis spätestens 15.02.2012 notwendig. Für eine Anmeldung und auch für Fragen wenden Sie sich bitte an:

jugend@dgkk.de

Als Ausklang der Besichtigung und zur Einstimmung auf die Tagung wäre es schön, wenn sich die Teilnehmer/innen anschließend bei einem gemeinsamen Mittagessen in der „Alten Mensa“ zusammenfinden würden. Dort besteht auch die Möglichkeit, mit den Vorstandsmitgliedern der DGKK ins Gespräch zu kommen. Dazu sind natürlich auch all die Interessierten der „Jungen

DGKK“ ausdrücklich und herzlich willkommen, die vorher nicht an der Besichtigung von FCM teilgenommen haben.

Für Studierende kann eine Bescheinigung über die Teilnahme an einer Industrieexkursion ausgestellt werden.

Die „Junge DGKK“ soll zu einer Einrichtung wachsen, in der insbesondere Nachwuchswissenschaftler wie Studierende und Doktoranden/innen zwanglos und ohne Hemmschwelle Kontakte knüpfen, ausbauen und sich austauschen können. Die Idee der „Jungen DGKK“ ist angelehnt an die Organisation studentischer Fachschaften der Universitäten und soll zusätzlich die aktive Mitwirkung und Einbringung in der DGKK ermöglichen.

### Dazu benötigen wir aber Euch!

Deshalb hier nochmal die Bitte an alle „älteren“ DGKK-Mitglieder, dies bei den Studierenden und Doktoranden/innen der eigenen Arbeitsgruppen, Institute etc. kundzutun, da für uns sonst keine Möglichkeit besteht, mit den Nachwuchswissenschaftlern in Kontakt zu treten.

Wir würden uns über eine rege Teilnahme freuen!

# GERO

30-3000°C



KZV Kristallziehanlage 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](http://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](mailto:info@gero-gmbh.com)

## Bericht DGKK Arbeitskreis: Massive Halbleiterkristalle – Wachstum und Charakterisierung 9

P. Wellmann, Institut für Werkstoffwissenschaften 6, Universität Erlangen-Nürnberg, Erlangen

Am 5./6. Oktober 2011 fand das Herbsttreffen des Arbeitskreises „Massive Halbleiterkristalle – Wachstum und Charakterisierung“ auf dem Gelände der Technischen Fakultät der Universität Erlangen-Nürnberg statt. Die Veranstaltung wurde in enger Kooperation zwischen dem Crystal Growth Lab der Universität (P. Wellmann) und dem Department Kristallwachstum des Fraunhoferinstitutes IISB (J. Friedrich) durchgeführt.

Das Programm bestand aus einer bunten Mischung von Themen zum Kristallwachstum, zur Numerischen Modellierung des Züchtungsprozesses und zur Materialcharakterisierung. Als Materialsysteme dominierten dieses Jahr die Halbleiter großer Bandlücke SiC, GaN und AlN sowie Si. Die Öffnung des Arbeitskreises von den Verbindungshalbleitern hin zum „klassischen“ Si im Jahre 2009 hat sich als richtig erwiesen. Im Durchschnitt kamen die letzten Jahre ca. 25% der Fachbeiträge aus dem von der Photovoltaik getriebenen Si-Arbeitsgebiet.

Zwei Highlights auf dem Herbsttreffen stellten die beiden eingeladenen Vorträge dar. Prof. Fiederle (Universität Freiburg) berichtete über den aktuellen Stand des Kristallwachstums von

CdTe und zeigte auf, welche Materialfragen beim Einsatz als Strahlendetektor von Bedeutung sind. Dr. Syväjärvi (University of Linköping, Schweden) referierte über die Anwendung von dotiertem, fluoreszierendem SiC für weiße Leuchtdiodenanwendungen.

Der Arbeitskreis war mit ca. 60 Teilnehmern wieder sehr gut besucht. Sehr erfreulich war wieder die rege Teilnahme junger Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler. Die Vorträge waren durchgängig auf einem fachlich hohen Niveau. Der Arbeitskreischarakter, also der Bericht zu aktuell laufenden Arbeiten, spiegelte sich in einer regen Beteiligung an der Fachdiskussion im Anschluss an die einzelnen Vorträge wider. Sehr erfreulich ist, dass sich eine Reihe von Personen in den Email-Verteiler des DGKK-Arbeitskreises neu eingetragen haben.

Das nächste Frühjahrstreffen des Arbeitskreises wird im Rahmen eines Symposiums auf der Deutschen Kristallzüchtungstagung in Freiberg/Sa. (7.-9. März 2012) stattfinden. Das nächste Herbsttreffen ist für den 10./11. Oktober 2012 in Freiberg/Sa. geplant.

## Bericht über die DGKK-Vorstandssitzung am 25.11.2011 in Freiberg/Sa.

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

Der DGKK-Vorstand behandelte auf seiner Sitzung am 25. November 2011 in Freiberg folgende Schwerpunkte:

1. Vorbereitungsstand der Deutschen Kristallzüchtungstagung (DKT) 2012, 07.-12. März 2012 in Freiberg. Hierzu berichteten Kollegen des lokalen Organisationsteams. Es erfolgten Absprachen zum terminlichen Ablauf und zum Vortragsprogramm. Es wurden weitere Besichtigungsmöglichkeiten bei Freiburger Firmen angeregt.
2. Information zum Stand der Vorbereitung der ICCGE-17 in Warschau und der ISSG-15 in Danzig 2013. Die DGKK ist in allen Gremien vertreten. Es wurde erneut auf die Wichtigkeit der Durchführung von experimentellen Arbeiten im Rahmen der Schule hingewiesen.
3. Seminar zur Siliziumweiterbildung: Ein drittes ist für Herbst 2012 vorgesehen. Zunächst ist der jetzige Bedarf abzufragen.
4. Diskussion zum weiteren Vorgehen bei der Ausarbeitung eines DGKK-Strategiepapiers zur Kristallzüchtung in Deutschland. Es wird ein potenzieller Bearbeiter aus der Mitgliedschaft angesprochen.
5. Aufgabenübergabe an den neu gewählten Vorstand
6. DFG-Fachgutachterwahl, nach Bekanntgabe der Ergebnisse nimmt der Vorstand Kontakt mit den neugewählten Gutachtern der Fachgruppe 406 auf.
7. Diskussion möglicher Kandidaten der zur MV 2012 zu wählenden DGKK-Preiskommission und Kassenprüfer. Die Mitglieder werden aufgefordert, Vorschläge zu unterbreiten.
8. Diskussion des neuen Satzungsentwurfes. Der Vorstand beschloss inhaltlich den Satzungsentwurf, welcher nach juristischer Prüfung den Mitgliedern zugesendet wird.
9. Festlegung der Tagesordnung für die Mitgliederversammlung 2012 in Freiberg
10. Stand der Aktivitäten des European Network of Crystal Growth (ENCG). Die DGKK bringt sich in diese Aktivitäten ein. Gegenwärtig wird ein Anschreiben mit Fragebogen an Unternehmen und Forschungseinrichtungen, die auf dem Gebiet der Kristallzüchtung tätig sind, vorbereitet.
11. Vorbereitungsstand der ECCG-4 am 17. - 20. 06. 2012 in Glasgow
12. Stand „European Master Course on Crystal Growth“. Im Rahmen dieser Aktivität erfolgen erste Austauschaufenthalte von Doktoranden der beteiligten Einrichtungen.
13. Jugendinitiative „Junge Kristallzüchter“. Es wird am Vormittag des 07.03.2012 eine Industrieführung in Freiberg bei der Firma FCM GmbH angeboten. Hierzu wird per Rundmail informiert, um Teilnehmer aus dem Nachwuchsbereich zu gewinnen.

## 10 DGKK-Personen

## Die Mitglieder des DGKK-Vorstandes 2012 - 2013

**Vorsitzender****Jochen Friedrich aus Erlangen**

Jochen Friedrich (Jahrgang 1966) schloss 1992 sein Studium der Werkstoffwissenschaften an der Universität Erlangen-Nürnberg (FAU) ab. Von 1993 bis 1996 promovierte er am Institut für Werkstoffwissenschaften der FAU. 1997 war er wissenschaftlicher Mitarbeiter am ATZ-EVUS in Sulzbach-Rosenberg. 1998 wechselte er zum Fraunhofer-Institut IISB in Erlangen. Seit 2004 leitet er am Fraunhofer IISB die Abteilung Kristallzüchtung und ist seit 2005 seitens des Fraunhofer IISB für das Fraunhofer-Technologiezentrum Halbleitermaterialien THM in Freiberg verantwortlich. Forschungsschwerpunkte sind heute Silizium-Kristallzüchtung, Massivkristallzüchtung und Epitaxie von Halbleitern großer Bandlücke und Entwicklung von neuen Detektor- und Laserkristallen. Diese Entwicklungen werden unterstützt durch Charakterisierung und numerischer Simulation. Von 2006 bis 2010 war Jochen Friedrich Beisitzer im DGKK-Vorstand, seit 2007 ist er stellvertretender Sprecher des DGKK-Arbeitskreises „Massivkristalle“. Jochen Friedrich erhielt 2003 den Stifterverbandspreis, 2005 den GMM/VDE Preis, 2008 den IWCGT Best Lecture Award und 2009 den Georg-Waerber-Innovationspreis.  
Jochen.Friedrich@iisb.fraunhofer.de

**stellvertretender Vorsitzender****Peter Rudolph aus Schönefeld bei Berlin**

1969 Diplom an der TU Lvov (Ukraine) im Fach Elektroniktechnologie; 1972 Dissertation an der Fakultät Festkörperphysik der gleichen Universität; 1973–80 wiss. Assistent am Bereich Kristallographie der Humboldt-Universität zu Berlin; Mitaufbau des Kristallzüchtungslabors; 1978 Weltraumexperimente zur Kristallzüchtung; 1980 Habilitation an der Humboldt-Universität zu Berlin; 1985 Professur für Techn. Kristallographie und Kristallzüchtung an der HUB; 1993-94 und 99 Gastprofessuren am Inst. for Mat. Res. der Tohoku Universität Sendai (Japan); 1994-2011 Mitarbeiter des Institutes für Kristallzüchtung Berlin; Koordinator des Kompetenzfeldes „Technologieentwicklung“; Forschungsschwerpunkte: Czochralski- und VGF-Schmelzzüchtung von III-V- und II-VI-Verbindungshalbleitern, Si, Ge, Einfluss nichtstationärer Magnetfelder, Nichtstöchiometrie, Punktdefekte, Versetzungsdynamik, Formzüchtung; 1999-2009 Leiter des DGKK-AK „Kinetik“; Innovationspreis Berlin-Brandenburg 2001 und 2008; seit 2005 Sub-Editor des J. of Crystal Growth; 2011 Wahl in den Beirat des Solarregion Brandenburg e.V.  
rudolph@ctc-berlin.de

**Schatzmeister****Peter Wellmann aus Erlangen**

Peter Wellmann (Jahrgang 1966) ist seit Oktober 2007 Inhaber der W2-Professur für Werkstoffe der Elektrotechnik am Department Werkstoffwissenschaften der Universität Erlangen-Nürnberg. Forschungsschwerpunkte sind Kristallwachstum und Charakterisierung von Halbleitermaterialien. Die Arbeiten im Kristallzüchtungslabor umfassen Volumenkristallwachstum und Epitaxie von neuen Halbleitern für die Leistungselektronik, Herstellung und Untersuchung von Dünnschichtszellmaterialien sowie das Verdrucken nano-partikulärer elektronischer Schichten. Es besteht eine enge Zusammenarbeit mit der Abteilung Kristallzüchtung des Erlanger Fraunhoferinstitutes. Im Bereich der Lehre wird an der Etablierung eines Europäischen Kristallzüchtungsstudiums gearbeitet.

peter.wellmann@uni-erlangen.de

**Schriftführerin****Christiane Frank-Rotsch aus Berlin**

Studium der Kristallographie an der Humboldt-Universität zu Berlin. Promotion auf dem Gebiet der VGF-GaAs-Züchtung an der TU Bergakademie Freiberg (1996); seit 1998 Beschäftigung mit der Züchtung und Charakterisierung von Halbleiterkristallen sowie der Modellierung von Züchtungsprozessen am Leibniz-Institut für Kristallzüchtung in Berlin; seit 2006 Schriftführerin der DGKK.

frank@ikz-berlin.de

**Beisitzer**

**Klaus Dupré aus Idar-Oberstein**

Studium der Mineralogie in Bonn, anschließend Promotion zur gerichteten Erstarrung eutektischer Systeme. Seit 1994 am FEE in Idar-Oberstein zuständig für die Czochralski-Züchtung von hochschmelzenden Oxidkristallen für die Lasertechnik und optische Anwendungen.



dupre@fee-io.de

**Beisitzer**

**Bernhard Freudenberg aus Freiberg und Coburg**

Studium der Werkstoffwissenschaften an der TU Berlin, in Erlangen und in Leeds (GB); 1979 – 1982 im Zentrallabor der Rosenthal AG, Selb; 1983 – 1986 Promotion an der ETH Lausanne (CH) über Festkörperreaktionen im System  $Al_2O_3-TiO_2$ ; 1987 – 2001 am CFI Ceramics for Industry, Rödental, erst Entwicklung, dann Produktionsverantwortung für technische Keramik; 2001 – 2002 bei der EPCOS OHG, Deutschlandsberg (A), Produktionsverantwortung für keramische Bauelemente; seit 2003 bei der SolarWorld AG in Freiberg mit verschiedenen Aufgaben: bis 2008 verantwortlich für den Produktionsbereich Kristallisation in der Deutschen Solar AG, ab 2009 Bereichsleiter F&E in der SolarWorld Innovations GmbH



bernhard.freudenberg@sw-innovations.de

**Beisitzer**

**Peter Gille aus München**

Studium der Kristallographie an der Humboldt-Universität zu Berlin; 1984 Promotion über Einkristallzüchtung von Halbleitern (PbTe) nach der travelling heater method an der Humboldt-Universität; 1993/94 mit Habilitationsstipendium der DFG am Institut für Werkstoffwissenschaften, Universität Erlangen-Nürnberg; seit 1995 Prof. für Angewandte Mineralogie an der Universität München; Arbeitsgebiete: Einkristallzüchtung (Czochralski- u. Bridgman-Verfahren) von Quasikristallen und intermetallischen Phasen; Sublimationszüchtung von AlN; Lösungskristallisation; Strukturelle Untersuchungen an Einkristallen.



gille@lmu.de

**Neue Mitglieder 2010/2011**

Wir begrüßen ab dem 01.06.2011 als neue Mitglieder (Stand 30. November 2011):

Herr Dipl.-Phys. Alexander Glacki  
Herr Dipl.-Min. Michael Hahne

IKZ Berlin  
LMU München

## 12 Eine Ära auf dem Gebiet der Ausbildung von Kristallzüchtern geht zu Ende



Professor Müller mit dem „Einkristall am Bande“, den ihm die Mitarbeiter des Fraunhofer IISB anlässlich des Abschlusses seines letzten Promotionsverfahrens für seine herausragenden Verdienste bei der Ausbildung von Kristallzüchtern verliehen haben, zusammen mit Frau Dr. Birgit Kallinger, der letzten Doktorandin von Professor Müller

(Foto: Fraunhofer IISB).

**Eine Ära auf dem Gebiet der Ausbildung von Kristallzüchtern geht zu Ende. Professor Georg Müller hat seine letzte Doktorandin promoviert.**

**In 30 Jahren hat Professor Georg Müller, ehemaliger Leiter der Abteilung Kristallzüchtung am Fraunhofer IISB und ehemaliger Leiter des Kristalllabors am Institut für Werkstoffwissenschaften der Universität Erlangen- Nürnberg, fast 50 Doktorarbeiten, 100 Diplomarbeiten und 100 Studienarbeiten auf dem Gebiet der Kristallzüchtung betreut.**

Einige der von ihm betreuten Arbeiten wurden mit nationalen, aber auch internationalen Preisen ausgezeichnet und unterstreichen die herausragende wissenschaftliche Qualität, die Professor Müller von seinen Studenten und Doktoranden eingefordert hat. Durch seine hervorragende Ausbildung kann Erlangen als die Talentschmiede für die Deutsche Kristallzüchtungsindustrie bezeichnet werden. Erlangen wird auch in Zukunft seinem Ruf als ein nationales Zentrum auf dem Gebiet der Ausbildung von Kristalltechnologien gerecht, denn die nächste Generation an Doktorandinnen und Doktoranden ist bereits kurz davor, ihre Promotionen abzuschließen. Dabei werden die gleichen hohen Maßstäbe an die wissenschaftliche Qualität angelegt wie zu Professor Müllers aktiver Zeit.

### **Ansprechpartner:**

Dr. Jochen Friedrich

Fraunhofer IISB

Schottkystraße 10, 91058 Erlangen

Tel.: +49-9131-761-270

Fax: +49-9131-761-280

E-Mail: [info@iisb.fraunhofer.de](mailto:info@iisb.fraunhofer.de)

## DGKK-Nachrichten

### Forscher von Fraunhofer und Industrie arbeiten an der kostengünstigeren Herstellung für Galliumnitridkristalle



Die Sächsische Staatsministerin für Wissenschaft und Kunst, Prof. Sabine Freifrau von Schorlemer, übergibt den Zuwendungsbescheid für das Verbundprojekt MatGaN an Dr. Jochen Friedrich vom Fraunhofer THM.

Bild: Sächsisches Staatsministerium für Wissenschaft und Kunst.

**Heute noch zehnmal teurer als Gold – Forscher von Fraunhofer und Industrie arbeiten an der kostengünstigeren Herstellung für Galliumnitridkristalle**

**Kristallines Galliumnitrid gilt als Halbleitermaterial der Zukunft. Leider ist der Wunderwerkstoff zurzeit noch extrem**

**teuer. Das Fraunhofer Technologiezentrum Halbleitermaterialien THM und die Freiburger Compound Materials GmbH forschen mit finanzieller Unterstützung des Sächsischen Staatsministeriums für Wissenschaft und Kunst gemeinsam an einer neuen Technologie, die eine kostengünstigere Herstellung von hochwertigen Galliumnitrid-Kristallen ermöglicht. Galliumnitrid-Kristalle sind ein wichtiger Hochleistungswerkstoff für spezielle elektronische Bauelemente, wie sie beispielsweise für energieeffiziente, robuste Elektroantriebe benötigt werden. Die Verringerung der hohen Herstellungskosten ist eine wichtige Voraussetzung für die erfolgreiche Kommerzialisierung des vielversprechenden Halbleitermaterials.**

Galliumnitrid (GaN) wird von den Fachleuten der Mikroelektronik als ein wichtiges Halbleitermaterial der Zukunft angesehen. Bereits heute wird es – in Form weißer und blauer Leuchtdioden – in energiesparenden Lichtquellen eingesetzt. GaN wird auch für den Mobilfunk eine wichtige Rolle beim effizienten Verstärken und schnellen Übertragen von Informationen spielen. Ein sehr großes Marktpotenzial besitzt GaN außerdem für verlustarme, hocheffiziente Leistungsbaulemente zum Wandeln von elektrischer Leistung, zum Beispiel in Computernetzteilen, bei der Photovoltaik oder in künftigen Elektrofahrzeugen.

Nach heutigem Stand der Technik kommt für weiße und blaue Leuchtdioden das GaN in Form einer hauchdünnen kristallinen Schicht, die auf einem Substrat aus Saphir oder Siliziumkarbid abgeschieden wird, zum Einsatz. Wegen der großen physikalischen und chemischen Unterschiede zwischen Substrat und Schicht entsteht jedoch zwangsläufig eine große Zahl von Kristallbaufehlern in der abgeschiedenen Schicht. Obwohl die Dichte der Kristallbaufehler mehr als eine Milliarde pro Quadratzentimeter beträgt, funktionieren die Leuchtdioden.

Bei den Hocheffizienzbauelementen, wie sie in der Leistungselektronik oder im Mobilfunk benötigt werden, können die Leistungsfähigkeit und die Zuverlässigkeit aber bereits bei mehr als tausend Defekten pro Quadratzentimeter in der aktiven Schicht erheblich nachlassen. Deshalb ist es notwendig, für solche Bauelemente die aktiven Schichten auf arteigenen, einkristallinen GaN-Substraten abzuschneiden. Derartige Substrate sind heute noch extrem teuer. Bezogen auf das Gewicht ist ein GaN-Substrat mit einem Durchmesser von 50 mm fast zehnmal teurer als Gold.

Die Hauptursache dafür liegt darin, dass große GaN-Einkristalle bis heute nicht in ausreichenden Mengen verfügbar sind, da deren Herstellung schwierig ist. Aufgrund des hohen Schmelzpunkts, der bei mehr als 2500 °C liegt, und wegen des hohen Dampfdrucks am Schmelzpunkt von mehr als 100 000 bar kann GaN nicht einfach mit der klassischen Schmelzzüchtung hergestellt werden, wie sie beispielsweise von der Freiburger Compound Materials GmbH eingesetzt wird, um tonnenweise hochgradig perfekte Galliumarsenid-Einkristalle zu einem Zehntel des Goldpreises zu produzieren.

GaN-Einkristalle stellt man heute vorwiegend nach dem sogenannten HVPE-Verfahren (Hydride Vapor Phase Epitaxy) her, das weltweit von einer Handvoll Firmen technologisch vorangetrieben wird. Bei der HVPE-Methode reagiert zunächst gasförmiger Chlorwasserstoff mit flüssigem, ca. 880 °C heißem Gallium zu Galliumchlorid. In einer Reaktionszone wird das Galliumchlorid bei Temperaturen zwischen 1000 und 1100 °C in die Nähe eines GaN-Kristallkeims gebracht. Unter Kontakt mit einströmendem Ammoniak verbindet sich das Galliumchlorid mit dem Ammoniak unter Freisetzung von Chlorwasserstoff zu kristallinem GaN. Unter optimalen Bedingungen können mit dem HVPE-Verfahren mittlerweile Kristalle bis zu 50 mm Durchmesser und mit Dicken von einigen Millimetern hergestellt werden. Schon seit einiger Zeit forschen Experten der Freiburger Compound Materials GmbH (FCM) und Wissenschaftler vom Fraunhofer THM in Freiberg sowie vom Fraunhofer IISB in Erlangen, einem Mutterinstitut des THM, am HVPE-Verfahren und der

Analyse des damit hergestellten Materials. "Es ist den Kollegen in Freiberg gelungen, innerhalb kurzer Zeit GaN-Kristalle herzustellen, die bezüglich Kristallgröße, Materialeigenschaften und Herstellungsbedingungen vergleichbar sind mit dem GaN-Material von Wettbewerbern, welche bereits seit über einem Jahrzehnt an dem Material forschen", erklärt Dr. Jochen Friedrich, stellvertretender Sprecher des THM und Leiter der Abteilung Kristallzüchtung am IISB. "Hauptproblem sind die hohen Herstellungskosten. Diese ergeben sich unter anderem dadurch, dass gegenwärtig nur ein geringer Teil der gasförmigen Ausgangsstoffe, also Galliumchlorid und Ammoniak, an der gewünschten Stelle zu GaN reagiert", so Dr. Friedrich.

Genau hier setzen jetzt die FCM- und Fraunhofer-Forscher an. In einem gemeinsamen Projekt entwickeln sie das HVPE-Verfahren weiter, so dass eine effizientere Umsetzung der eingesetzten Materialien zu GaN erfolgt. Dadurch können die Herstellungskosten reduziert und die Kommerzialisierung von GaN vorangetrieben werden. Das Verbundprojekt wird durch das Sächsische Staatsministerium für Wissenschaft und Kunst aus Mitteln des Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) und des Freistaats Sachsen gefördert.

"Als Technologieministerin des Freistaats Sachsen und als Vorsitzende der Arbeitsgruppe Mikroelektronik liegt es mir am Herzen, die Schlüsseltechnologie "Mikro- und Nanoelektronik" in Sachsen, in Deutschland und in Europa zu stärken. Das vorliegende Vorhaben ist ein ganz konkreter Beitrag zum Ausbau der Innovations- und Wertschöpfungskette und ein großartiges Beispiel für die Stärke der technologieoffenen, anwendungsorientierten Forschung im Freistaat Sachsen und für das erfolgreiche Zusammenwirken von außeruniversitären Forschungseinrichtungen mit sächsischen Unternehmen.", erklärte Staatsministerin Sabine von Schorlemer, die Ende September persönlich die Zuwendungsbescheide an die Forscher überreichte.

Knapp 3 Jahre haben die Kristallzüchtungsexperten aus Freiberg nun Zeit, um im Rahmen des Verbundvorhabens die Materialeffizienz bei der HVPE-Züchtung von GaN so zu steigern, dass GaN langfristig billiger als Gold werden kann.

#### **Ansprechpartner:**

Dr. Jochen Friedrich

Fraunhofer IISB

Schottkystraße 10, 91058 Erlangen

Tel.: +49-9131-761-270

Fax: +49-9131-761-102

E-Mail: info@iisb.fraunhofer.de

WWW: www.thm.fraunhofer.de

## **5th International Workshop on Crystal Growth Technology (IWCGT-5)**

The International Workshop on Crystal Growth Technology was founded by Hans Scheel and took place the first time in 1998. The location was a beautiful place in the Swiss mountains, Beatenberg.

Style and place of the workshop became a tradition – except for 2000, when the event was held at Mount Zao in Japan. Oral presentations were by invitation only and the time for talks and discussion was one hour – in strong contrast to the large workshop/conference events with 15 minutes slots. After four times of organizing this workshop Hans Scheel liked to retire from

this duty. Thus, the Leibniz Institute for Crystal Growth took the opportunity and task to organize the 5th issue of the workshop. The general style slightly changed - Berlin is much larger than Beatenberg and also the participants number increased from about 50 in 2008 to about 180 in 2011.

The basic idea is still the same: invitation of experts to speak about the recent developments in crystal growth technology. Roberto Fornari together with David Bliss and Koichi Kakimoto as the chairmen did also underline the teaching character of such an event, which results in the participation of many young people

14 from all over the world. In total, participants from 27 countries attended the workshop. Thanks to IWCGT and the DGKK 8 grants could be given mainly

to young scientists. In the following the three participants with a grant from the DGKK will give reports on the sessions of the workshop, which overlap with their own interests.

## Report on Melt growth technologies (Session T1) and Growth technologies for solar silicon (Session T3)

Dr. Michael Gonik, Centre for Thermophysical properties "Thermo", Alexandrov, Russia.

The 5th International Workshop on Crystal Growth Technology was held in Berlin during June 26 - 30, 2011. I was invited and attended the Workshop for the first time and would like to express my great admiration.

First of all, it was very good organized across-the-board. The venue was a happy choice from the point of view of intensive lecture and poster work, as well as of friendly communication during spare time (lunches, boat trip and others). The IKZ team provided all items on a very high level, seemed to be the best in comparison with a whole number of conferences for the last several years. Many thanks to Workshop Chairs and Steering Committee done much work. They were open for any contact and discussions resulting, for an example, in further access for the participants to most of the lectures presented.

Especially would like to emphasize the successfully determined Workshop subject and selection of lectures which are very attractive to the scientists engaged in practical crystal growth. Taking this in mind, it would be a good tradition to invite the representatives of the companies such as Bruni Consultants (USA), PVA TePla AG (Germany), Cyberstar (France) who are able to demonstrate a current progress in the modern crystal growth equipment, from one hand, and the problems to be solved together with academia, from another hand. The last might be very asked-for.

As regards the lectures themselves, the more interesting ones were those which, besides a background of the problem, included the new approaches in crystal growth technique succeeded in high quality crystals of large dimensions. From my point of view, in some lectures too much time was dedicated to well known things, which were repeated by different lecturers to the prejudice of their own original achievements.

In framework of the section "Melt growth technologies for ultra pure and perfect semiconductors, e.g. silicon and germanium, III-V, II-VI", Dr. M. Neubert from the Institute for Crystal Growth (Berlin, Germany) made a nice presentation on a model based control to be used in Czochralski process. Such an approach

dramatically increases computational efforts for solving time dependent problems in real time, so the key issue is to keep the mathematical models as simple as possible. Hence, the basic idea of the proposed control system is to divide the system under consideration into two coupled parts which can be treated separately - a hydromechanical-geometrical part the model of which is well matured in literature and a thermal part. A model based controller enables one to manipulate the system via the hydromechanical-geometrical part, while the PID controllers allow one to manipulate the system via the thermal part. Experimental verification of the complete single and two loops control system has been presented by authors as being applied in Cz and LEC configurations of InP, GaAs and Ge crystal growth.

Among the presentations at the section "Growth technologies for solar silicon", I would like to mark out a very interesting talk of Prof. C.W. Lan from the National Taiwan University (Taipei, Taiwan) devoted to grain control in directional solidification of photovoltaic silicon, due to which getting the high-quality mc-Si material is provided. The discussed approach includes (i) control of growth front due to both the heater and heat exchange block special configuration, (ii) nucleation control which is determined by dendrite growth of silicon at the initial stage of the process and by temperature regime of further solidification, (iii) growth control influencing the type and the dimensions of grains, and (iv) self-seeded or mono-like seeded growth. Investigations of different crucible insulation, spot cooling, active cooling, notched crucible (self-seeded), and seeded growth have been tested in lab-scale furnace, and also extended to industrial-scale furnaces up to 580 Kg. Interface shape, nucleation, grain competition, as well as seeded growth were found to be crucial to grain control and thus crystal quality, especially in the defect growth rate. As a result, the average mc-Si solar cell efficiency  $\sim 17\%$  has been achieved. The best conversion efficiency of the screen-printed solar cells by using the high-quality wafers with grain control has exceeded 17.5%. The 60-cell module with a power output  $\sim 250$  W was obtained.

## Report on Advances in solution growth (Session T2)

R. Radhakrishnan Sumathi, Ludwig-Maximilians-University, Munich

The topics in the solution growth session covered the materials ranging from non-linear optical crystals to semiconductors and others.

Ammonothermal growth, which is one of the well advanced solution growth method was described by M. Zajac from Ammono Sp. Z.o.o., Poland. He presented the recent achievements in ammonothermal growth of GaN by their group. He gave a gene-

ral overview of the method and its present state-of-the-art. The grown crystals exhibit very narrow XRD RC FWHM of 16 arcsec and low EPD of  $5 \times 10^3 \text{ cm}^{-2}$ . Preparation of polar (c-plane), non-polar (m-plane) and semi-polar (a-plane) substrates from the grown crystals was presented. 2-inch polar GaN substrates were developed by Ammono Sp. z.o.o. and are already available in the market. He pointed out that ammonothermal substrates

fulfill the requirements for the epitaxy of stress free GaN-based optoelectronic devices.

D. Rytz from FEE GmbH, Idar-Oberstein elaborated the historical perspective and complete survey of NLO crystals (BBO, LBO, CLBO, BIBO, KBBF, etc.) which are used to generate 340-360 nm and 250-270 nm UV lasers. The top seeded solution growth of BBO, LBO and CLBO was discussed. He reviewed the brief history of YAB crystal and mentioned that FEE GmbH proposed (RE)YAB as a new NLO material. He presented the effect of self-doubling in Nd doped YAB crystal and described the challenges in producing YAB with high purity and high damage threshold. Various fluxes such as  $K_2Mo_3O_{10}$ ,  $LaB_3O_6$ ,  $Li_2WO_4$  were tried to grow crystals with improved properties.

N. Zaitseva from Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL), USA continued her nice presentation on rapid solution growth of inorganic and organic crystals. The main subject of the presentation was the growth of high optical quality KDP crystals with increased growth rate (25 mm/day) and avoiding spontaneous nucleation. Prevention of solution inclusion was discussed in terms of dislocation control. Growth of world's largest KDP crystals exceeding 0.5 m in length has been demonstrated and these crystals are being used in national ignition facility (NIF) in LLNL. The same technology has been used to grow many organic crystals such as anthracin, aspirin, bibenzyl, etc., for the application in neutron detection.

The last talk in the session was delivered by G. Demazeau from University of Bordeaux and the talk was dedicated to Prof. L. Demyanets†. The history of hydrothermal/solvothermal growth method has been reviewed in this presentation. He also gave the comprehensive overview of the recent development in this method to grow technologically important GaN and ZnO crystals.

Solvothermal growth of thin films and nanoparticles were also discussed.

Posters presented in this session also covered a range of materials. Liquid phase epitaxial growth of semiconductor materials were presented by three authors. LPE growth of InSbBi was presented by Sh.O. Eminov from Institute of Physics, Azerbaijan. A novel sliding boat system with tunable distance has been reported. Investigation on the LPE growth of GaInAsP solid solutions on GaAs substrates was presented by P.V. Seredin, Voronezh State University, Russia. It was reported that small scale domain structures appear on the surface due to the presence of stress within the quaternary layer. H.Susawa from Aichi, Japan, presented the numerical simulation results on LPE growth of InGaP on GaAs substrates. 2D numerical model for the flow patterns was described.

Two posters were discussing about barium based mixed crystals. Growth of large  $Ba_{1-x}K_xFe_2As_2$  superconductor crystal was the topic of Y. Liu, MPI, Stuttgart. Crystal sizes of  $10 \times 5 \times 1 \text{ mm}^3$  were grown using Sn-melt as a liquid encapsulant to seal K and As. Magnetisation and transport properties of the crystals were also presented. Solution-gel technique was used to grow Barium Tartrate ( $BaC_4H_4O_6 \cdot 2H_2O$ ) crystals by A.M.Shah from Gujarat University, India. The crystals grown by this method are stable up to a temperature of  $220^\circ\text{C}$ .

A.P. Revellez (Insitut Néel CNRS/UJF, France) presented his poster on periodically poled KTP crystal growth using PPKTP thin seeds obtained by electric field poling. Growth of KDP and ADP crystals with thallium doping was the subject of A.P. Voronov, NAS of Ukraine. It has been described that these thallium doped crystals perform effective separation of neutron and gamma rays and so find applications in neutron detection.

## 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](mailto: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](http://www.ibs-grafrath.de)

## 16 Report on Melt growth technologies for dielectric crystals (Session T6)

Zhang Cong, RWTH Aachen University, Aachen, Germany

In June of 2011 from 26 – 30, the 5<sup>th</sup> International Workshop on Crystal Growth Technology (IWCGT-5) was organized by the Leibniz Institute for Crystal Growth (IKZ) in Berlin, Germany. This workshop brought many scientists, students and engineers, who are working on the territory of crystal growth from different countries, together to discuss the modern trends of crystal growth and share novel technology and equipment.

In the Session of Melt growth technologies for dielectric crystals, a delightful overview about sapphire, including the development and the properties, was given by Prof. Mark Akselrod from Inc. Stillwater Crystal Growth Division. He pointed out that due to the properties of sapphire, it can be grown in a quite unsophisticated conditions using many crystal growth methodology, such as Verneuil, Czochralski, Bridgman and so on. Specially, he also pointed out that sapphire can not only be treated as passive substrate material but also as an active device, more attention reserved to study the defects and imperfections. He also gave the example of a volumetric disk media for terabyte (TB) capacity optical data storage which made by a new modification of oxygen deficient sapphire doped with carbon and magnesium. Peter G. Schunemann, from BAE Systems of USA, discussed recent advances in infrared nonlinear optical crystal technology. He mentioned that Mid-infrared nonlinear optical (NLO) crystals have widely used in both military and commercial laser systems. A new NLO chalcopyrite, CdSiP<sub>2</sub>, was also reported. This compound was known in the early 1970's though its line-

ar and nonlinear optical properties were unknown because of poor quality. They have successfully grown the CdSiP<sub>2</sub> using the techniques for CdGeP<sub>2</sub>. The optical and thermal properties were studied and found that: band edge of CdSiP<sub>2</sub>, which is from 506nm to 9.5 $\mu$ m, is short enough to allow pumping with 1064nm Nd:YAG; the birefringence is also enough to allow for phase matched frequency conversion of 1 $\mu$ m, 1.5 $\mu$ m, and 2 $\mu$ m lasers into the mid-infrared. What's important is that the nonlinear optical coefficient ( $d_{36}$ ) of this crystal is measured to be 85pm/V.

In the last presentation, Evgeny V. Zharikov (Mendeleev University of Chemical Technology of Russia) talked about recent advances in melt crystal growth technology. He state that the situation for bulk crystal growth have changed for some reasons, including progressive miniaturization of devices and appearance of high quality transparent ceramics and glass-ceramics. However, there are some important inventions and improvements, he presented recent progress in sapphire production at different companies. Also, he offered new methods of existing growth techniques, such like low-thermal gradient Czochralski technique (LTG Cz) applying for growth of Bi<sub>4</sub>Ge<sub>3</sub>O<sub>12</sub> (BGO), which could reach the length 400mm and cross-section 130mm. The combination of different techniques was showed in the presentation and the ones which are suitable for dielectric growth was discussed.

## Report on Wide bandgap semiconductors (Session T7)

R.Radhakrishnan Sumathi, Ludwig-Maximilians-University, Munich

The last session of IWCGT5 was devoted to next generation wide bandgap materials (AlN, GaN and SiC). AlN was the most discussed one in the session. The first presentation starts with AlN by B. Moody from Hexa Tech Inc. USA. He presented the progress and achievements in the PVT (also called as sublimation) growth of bulk AlN single crystals. Critical issues associated with AlN bulk crystal growth, such as diameter enlargement and defect formation were discussed. He pointed out that currently Hexa Tech is growing AlN bulk crystals of 25 mm diameter. He discussed their recent advances in the epitaxial growth of AlGaIn layers on AlN substrates. It was also demonstrated a sub-300 nm optically pumped laser-hetero structures on their AlN substrates.

On the other hand, C. Gugushev from IKZ, Berlin presented the fundamental aspects in AlN sublimation growth. He elaborated the necessities to perform *in situ* analysis of impurities in the vapour phase inside the growth set-up, during growth. He also has presented about the establishment of capillary-coupled mass spectrometer in IKZ. The importance of removing oxygen-related impurities like AlOOH, Al(OH)<sub>3</sub> or Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> was discussed. The process optimization has been done to reduce the oxygen content by adding carbon to the source. He mentioned that presently their group is developing a high temperature mass spectrometer for further analysis.

Preparation of free-standing AlN substrates by HVPE method was the topic of Y.Kumagai from Tokyo University, Japan. AlN growth on sapphire with high growth rate (around 85  $\mu$ m/h) has been presented. He discussed the mechanism of self-separation of AlN from sapphire. Deep-UV transparency at 208 nm has been demonstrated with HVPE grown AlN. He also discussed about the homo-epitaxial growth of HVPE AlN on PVT grown AlN substrates, and the results showed a reduced dislocation density.

After the three presentations in AlN, the last talk of the session by Erwin Schmitt, SiCrystal AG, Erlangen was giving us an overview on the development of SiC crystal growth technology for power electronics. The subject of his main discussion was on the material quality issues caused by imperfections such as defects, dislocations, stacking faults etc., and how the quality can further be improved. It was pointed out in his talk that there should be a feed-back loop necessary between crystal growth and material characterization to improve the crystal quality. He also described that the preparative steps such as crystal machining, polishing are also important steps to get high quality wafers for improved device performance. It was mentioned that in the year 2012 SiCrystal will start its supply of 150 mm (6-inch) SiC wafers.

Apart from the above 4 invited presentations, there were 8 nice

posters presented in this wide bandgap session (Poster session - I on 27<sup>th</sup> June, evening at 20:00-22:00 hrs).

M. Bockowski from Institute of High Pressure Physics, Poland, presented the high nitrogen pressure solution (HNPS) growth of GaN on HVPE GaN seeds. The poster discussed the results on free-standing GaN of 15-20 mm diameter. Two types of surface morphologies such as hillocks and macro step formation has been explained. Chlorine-free PVT growth of GaN was presented by K.Kachel from IKZ, Berlin. It was discussed in the poster that the use of pBN covered graphite parts in the reactor prevents the reaction between ammonia and carbon. Elimination of carbon by using quartz elements based set-up was also discussed. V.I. Nikolaev (Ioffe Physical-Technical Institute, Russia) presented a poster on the shaped crystal growth (SCG) of basal plane sapphire. He presented that the III-N layers grown on sapphire ribbons prepared by SCG technique is comparable to III-N layers grown on standard sapphire substrates.

R.R. Sumathi from Ludwig-Maximilians-University, Munich, presented the sublimation growth of bulk AlN single crystals on 6H-SiC substrates. AlN crystals of 24 mm diameter and of good structural homogeneity were presented. The presented results indicated that high quality and low defect density AlN crystals

can be grown hetero-epitaxially on SiC substrates. B.Gao from Kyushu University, Japan, presented the numerical analyses of AlN sublimation growth on SiC substrates. The polytype stability of SiC was discussed using 2D nucleation theory. Influence of nitrogen pressure on the Al- and N vacancy formation in AlN crystal has also been discussed using numerical model. R. To-gashi from Tokyo University has presented the HVPE growth of AlN on sapphire substrates. It was discussed in the poster that the polarity of AlN can be controlled by the sequence of source gas supply. It was shown that AlCl<sub>3</sub> pre-flowing prior to HVPE growth of AlN is effective to obtain Al-polar growth surface.

The role of surface effects on the polytype stability of SiC has been presented by F. Mercier, NIAIST, Tsukuba, Japan, using theoretical analysis. He correlated the experimental results with the theory. Some methods to improve the polytype stability in SiC crystal growth were also discussed. Other than nitrides and carbides, ZnO has also been the interest of this wide band-gap session. A poster on CVT growth of 2" diameter ZnO single crystals on sapphire templates has been presented by J.L. Santailier from CEA-LETI, France. His results showed that when compared to hydrothermal method, CVT technique is an alternative method to grow high quality ZnO crystals.

## 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 (SrTiO<sub>3</sub>, MgO, YSZ, ZnO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 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](http://www.mateck.de)

## 18 The 18-th America Conference on Crystal Growth and Epitaxy (ACCGE-18)

Peter Rudolph, Crystal Technology Consulting (CTC), Schönefeld

Die Kristallzüchter wissen, dass die ACCGE-Tagungen von einer Wichtigkeit und Dimension sind, die sich mit den aller drei Jahre stattfindenden Internationalen Weltkongressen für Kristallwachstum (ICCG) vergleichen lassen. Die diesjährige, die vom 31. Juli bis 05. August 2011 in Monterey, USA, stattfand, wurde wiederum gemeinsam mit dem „US Biennial Workshop on Organometallic Vapour Phase Epitaxy“ durchgeführt. Beide Veranstaltungen trafen erneut auf großes Interesse, nicht nur im Gastgeberland. Die über 300 Teilnehmer kamen darüber hinaus aus 15 weiteren Ländern. Deutschland war mit ca. 15 Teilnehmern und ebenso vielen Vorträgen, darunter 5 eingeladenen, nach Japan und vor Indien eines der stärksten Gastländer. Dagegen war diesmal die VR China kaum vertreten. Das in fünf Parallelsitzungen abgehaltene Vortragsprogramm umfasste die Schwerpunkte:

- III/V Nitride and Other Wide Bandgap Semiconductors
- Materials for Photovoltaics
- Nanocrystals, Quantum Dots and Nanowires
- Stress Evolution During Growth
- Thin Film Growth, Epitaxy and Superlattices
- Biocrystallization
- Bulk Growth
- Correlated Electron Crystals
- Detector Materials - Scintillators and Semiconductors
- Fundamentals of Crystal Growth
- Modeling
- Nonlinear Optical and Laser Host Materials
- Novel Materials and Techniques and Future Trends.

Auf dem Gebiet der Züchtung von Halbleiterkristallen war die Vortragszahl wie folgt verteilt: 20 zu ternären und quaternären Verbindungen (zumeist III-V und Schichten), 19 zu GaN (InN, Ga<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>N), 19 zu (III-V) multijunction PV solar cells, 10 zu SiC, 9 zu AlN, je 7 zu Si (Cz), Ge (Ge<sub>1-x</sub>Si<sub>x</sub>) und CdTe (Cd<sub>1-x</sub>Zn<sub>x</sub>Te, Cd<sub>1-x</sub>Hg<sub>x</sub>Te), 5 zur Anwendung von Magnetfeldern (Ge, Si, CdTe), 3 zu detached growth (Ge, InSb), 3 zu GaAs-Schichten, 2 zur PbTe Bulkzucht, je 1 zur GaSb- und GaP-Massivzucht. Hervorzuheben war das sehr große Interesse an den fünf Beiträgen (aus USA und Japan) zur Züchtung von Saphirkristallen als Substratmaterial für die GaN-Epitaxie.

Mit den (nur) zwei Plenarvorträgen wurde zum einen ein tragender strategischer Akzent der Tagung, die Erhöhung der Ländersicherheit, und zum anderen eine perspektivische Richtung behandelt (was lernen wir aus der Biomineralisation für die moderne Materialtechnologie?). Die Vorträge wurden von A. Janos vom DNDO (Domestic Nuclear Detection Office), „The Importance of Crystals to Homeland Security and the Mission of the Domestic Nuclear Detection Office“ und Ch. Orme vom LLNL (Lawrence Livermore National Lab.), „Nanoscale Visualization of Morphological Evolution: Additive Impact on Biomineral and Technological Materials“ gehalten. Jonas berichtete, dass im Juni 2010 die DNDO 200 Mio. USD ausgeschrieben hatte, um neue Technologien für die Strahlungsdetektion zu beflügeln. Allein 20 Mio USD fließen davon jährlich in die Materialforschung, insbesondere in die Kristallzüchtung. Gesucht werden hochsensible Substanzen, die entweder als Szintillationszähler oder Halbleiterdetektoren zur Analyse ionisierender Strahlung (Gamma-, Alpha- Beta-, Neutron-, X-ray) einsetzbar sind. Dabei ist die Empfindlichkeit bei einer Elektron-Lochpaar- Erzeugung in Halbleitern prinzipiell bevorteilt, erfordert aber eine hohe Kristallperfektion. Als günstige Szintillatorkristalle werden VB-gezüchtete Cs<sub>2</sub>LiYCl<sub>6</sub> (CLYC), VGF-, VB- und Cz-gezogene NaI (TI), CsI (TI), CsI (Na), SrI<sub>2</sub> (Eu), LaBr<sub>3</sub> und hochreine Germaniumkristalle untersucht. Geeignete neuere Materialien sind auch Cs<sub>2</sub>LiYBr<sub>6</sub>, Cs<sub>2</sub>LiYCl<sub>6</sub>, CsLiLaCl<sub>6</sub> und aus Lösungen gezüchtete organische Kristalle, wie Stilben (C<sub>14</sub>H<sub>12</sub>). Bevorzugte Halbleitermaterialien sind aus dem Dampf gezüchtete HgI<sub>2</sub>- und TlBr-Kristalle, sowie VGF- und THM-kristallisiertes InI, CdTe und Cd<sub>0,9</sub>Zn<sub>0,1</sub>Te. Neuere Materialien sind B<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>, InBAs und LiInSe sowie Diamantschichten. A. Ostrogorsky vom Illinois Institute of Technology berichtete über die „Vapor Pressure Controlled Czochralski (VCz)“ - Züchtung von InI-Kristallen (T<sub>m</sub> = 360 C°) mit einer Masse von 25-50 g und einer Länge von 5 cm, die einen ähnlich hohen Photonenbremsgrad wie das favorisierte, aber immer noch nicht perfekt erhältliche CdTe aufweisen. Von zunehmender Bedeutung sind Sender und Empfänger im THz-Wellenbereich, in welchem organische Gewebe durchstrahlt werden, jedoch nicht Metalle, Flüssigkeiten und Plaste. Neben LiNbO<sub>3</sub>- und LiTaO<sub>3</sub>- sind ZnTe- und CdTe-Kristalle favorisiert.



Beim Tagungsempfang. Im Vordergrund K. Kakimoto und F. Dupret.  
Foto: P. Rudolph



T. Fukuda in Diskussion über die Saphirkristallzüchtung  
Foto: P. Rudolph

Einen umfassenden Überblick über den Stand der Kristallzüchtung für den mittleren Infrarotbereich gab P. Schunemann vom BAE System, Inc. Zwei Wege werden beschrieben. Zum einen wird nach optisch nichtlinearen ternären Halbleiter-Bulkmaterialien entsprechender Bandbreite gesucht, wie z.B.  $ZnGeP_2$ ,  $AgGaSe_2$ ,  $CdGeAs_2$ , die bisher vorrangig nach dem horizontalem Bridgmanverfahren gezüchtet werden. Als spektakuläre Substanz erweist sich  $CdSiP_2$  mit einem relativ hohen NL-Koeffizienten  $d_{14}$  von 84.5 pm/V. Zum anderen werden bis zu 1.5 mm dicke 2-3 inch  $In_{1-x}Ga_xAs$ ,  $InP_{1-x}As_x$  u.a. Schichten mit der „Low Pressure Hydride Vapor Phase Epitaxy“ (in einem AIXTRON-Reaktor) abgeschieden, um das leidliche Problem der Segregation und Konzentrationsunterkühlung in Bulkmaterial zu umgehen. Die Transmission solcher Schichten ist weit höher als bei Schmelztemperaturen gezüchtetem Material (z.B. GaAs), wegen der geringen  $EL_2^*$ -Konzentration, die besonders im Bereich des Nd:YAG - Lasers (1064 nm) absorbieren. Übrigens reduziert D. Bliss vom US Air Force Research Laboratory die beim massiven Zonenzüchten von  $In_{0.5}Ga_{0.5}Sb$  - Kristallen ebenfalls entstehende Diffusionsgrenzschicht durch erzwungene Durchmischung mittels wanderndem Magnetfeld (100 Hz). Ein Poster von G. Zhang der Shandong University PR China berichtete von der  $ZnGeP_2$ -Züchtung ähnlicher Zielstellung nach der vertikalen ACRT-Bridgman-Technik.

Mittlere Infrarotstrahlung und -detektion wird auch mit Quasi-Phasen Anpassung (engl: QPM) unter Nutzung der Frequenzsubtraktion  $f_{idler} = f_{pump} - f_{signal}$  erzielt. Solche Materialien müssen z.B. aus parallelen periodischen Domänenstreifen hergestellt werden, die etwa eine Kohärenzlänge breit sind. BAE Systems, Inc. und die Stanford University mit seinem Pionier der NL-Optik, M. Fejer, bringen dazu eine in der Domäne gegenüber dem GaAs-Substrat invertierte polare GaAs-Schicht auf eine nichtpolare dünne Ge-Zwischenschicht auf. Durch anschließende Fotolithographie und hiernach stattfindendes MBE „regrowth“ wird eine parallele Aneinanderreihung von Plus (Substrat) - und Minusdomänen (Schicht) erzielt. Neben „orientation patterned (OP)“ GaAs wird v.a. OP GaP favorisiert. Sowohl P. Schunemann als auch J. Hite vom Nasal Res. Lab. berichteten auch von ersten erfolgreichen Versuchen mit OP GaN-Schichten auf GaN-Substraten mit einer „grating period“ von etwa 40  $\mu m$ .

Die Beiträge zur gerichteten Kristallisation von mc-Silizium für die Fotovoltaik wurden von K. Kakimoto's Team der Kyushu University in Japan, J. Friedrich's Gruppe vom Fraunhofer IISB Erlangen, F. Dupret's Modellierungskreis von der Université

Catholique de Louvain, Belgium, GT Solar (ausgefallen) und der Projektgruppe des Autor's am IKZ bestimmt. Es sei noch hinzugefügt, dass J. Derby von der Univ. Minnesota über eine numerisch gestützte Prozessanalyse bei der horizontalen Si-Bänderzüchtung vortrug. Während K. Kakimoto von einer einkristallinen Plattenkeimung am Ingotboden und der Optimierung der Seitenheizer berichtete, konzentrierte sich J. Friedrich auf die erforderliche Aufklärung des Phänomens des Versetzungsclusterns. J. Seebeck (Fraunhofer IISB Erlangen) umriss die zukünftigen Herausforderungen einer 3D-Simulation, wenn die zu kristallisierenden Si-Massen 1000 kg betragen. R. Rolinski (Univ. Catholique de Louvain) simulierte den Einbau von Sauerstoff und Kohlenstoff bei der Normalerstarrung mit einem „FEMAG-DS 3D time-dependent model“. Der Autor demonstrierte neben der Kristallisation von G1 Si-Ingots im Wandermagnetfeld auch Ergebnisse zur Cz-Züchtung von Si-Kristallen mit quadratischem Querschnitt nach dem KRISTMAG®-Prinzip. Ch. Frank-Rotsch vom IKZ Berlin züchtete nach diesem Konzept nahezu perfekte 110 mm VGF Ge-Einkristalle, die zunehmend auch als Substratmaterial für photovoltaische „multijunction“ III-V-Schichten an Bedeutung gewinnen. Auch an der University of South Dakota (Vortrag G. Wang zu 150 mm Cz Ge-Kristallen) und seit langem an der Tohoku Univ. Sendai, Japan (Vortrag T. Taishi zur  $B_2O_3$ -LEC-Züchtung von Ge, um die lästige  $GeO_2$ -Schwimmteilbildung zu vermeiden) werden intensive Untersuchungen dazu durchgeführt. Den größten Raum auf dem Gebiet photovoltaischer Materialien nahmen aber Beiträge zur epitaktischen Herstellung von Solarzellen mit „multijunction“-Struktur ein. Ph. Chiu von Spire Semiconductor berichtete über die Zurückerobung des Weltrekordes in der Solarzelleneffizienz (42.3 %) mit „bifacial epigrown“  $InGaP/GaAs/InGaAs$  n-p-Tandemkonzentratorzellen.

Natürlich spielte auch die Züchtung von GaN (AlN) eine zentrale Rolle. Sowohl für den „grünen LED-Markt“ als auch den Bedarf an „pico projectors“ im Handy werden alsbaldige Marktsummen von 500 Mio und 1.1 Bio USD respektive prognostiziert (siehe hierzu auch Hardy et al., Materials Today 14 (2011) 408). F. Scholz von der Universität Ulm eröffnete die Session mit dem Beitrag „Studies about wafer bow of freestanding GaN substrate grown by hydride VPE“. Die am meisten gestörte Rückseitenschicht wird nach der Epitaxie mit dem polaren Ätzmittel KOH abgetragen und somit die Krümmung der GaN-Plättchen wesentlich abgebaut. B. Wang vom AFRL, USA, setzt dagegen auf die Ammonothermalsynthese und zeigt, dass solche GaN-Kristalle



Von rechts: J. Derby (Präsident der AACG), A. Ostrogorsky, P. Schunemann  
Foto: P. Rudolph



A. A. Chernov mit Gattin und P. Rudolph während des Tagungsbanketts  
Foto: P. Rudolph

20 eine homogene Verteilung geringer RC FWHM von  $\leq 65$  arc-sec auszeichnet. Auch die Gruppe um T. Fukuda der Asahi Kasei Corp., Japan, favorisiert diese Züchtungsmethode wegen der deutlich verringerten intrinsischen Spannungen. Die beste strukturelle Qualität wird mit basischen Mineralisatoren (z.B.  $\text{KNH}_2$ ) erzielt, was allerdings sehr hohe Drücke um 300 – 500 MPa erfordert. Dagegen sind geringere Drücke bei Verwendung saurer Mineralisatoren (z.B.  $\text{NH}_4\text{Cl}$ ) ausreichend. Fukuda's Lab. entwickelte einen Autoklaven für 150 MPa bei einer Arbeitstemperatur von 1073 K. S. Rao, von der Crystal IS Inc., N.Y., wohl dem führenden Hersteller von UV LEDs auf AlN-Basis, stellte 2-Zoll PVT-gezüchtete AlN-Kristalle recht guter Qualität vor, die als Substrat für die Abscheidung von pseudomorphen  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ -Schichten geringer Versetzungsdichten dienen. Die erzielte UV-Leistung einer solchen Struktur erreichte 5 mW. Schließlich sorgte T. Fukuda's Vortrag "Growth of large diameter Sapphire single crystals by the Czochralski method for LED application" für Furore, als er neben den bereits publizierten 6-Zoll-Kristallen nun erstmals auch Cz-gezüchtete 8-Zoll-Saphirkristalle mit hoher Durchmesserkonstanz vorstellte. C-, a- und R-Orientierung sei möglich. Dafür wird in einer KDN-Anlage aus Südkorea ein Ir-Tiegel mit 330 mm Durchmesser eingesetzt. Nach einer Ziehrate von 10 mm/h betrug die Versetzungsdichte 5000 – 7000  $\text{cm}^{-2}$ .

Im Jahr 2012 findet vom 03. bis 06. Juni die „Twenty-third Conference on Crystal Growth and Epitaxy“ als ACCGE-West-Meeting im Stanford Sierra Camp, Fallen Leaf Lake, CA, statt. Kurz danach, vom 17. bis 20. Juni 2012 sind die Kristallzüchter zur ECCG-4 in Glasgow, Scotland, eingeladen. Also, rechtzeitig einplanen und anmelden!



Konferenzausflug ins Carmelital. Links in der Mitte die Tagungsleiterin E. Bourett, rechts Th. Duffar  
Foto: P. Rudolph

## Lange Nacht der Wissenschaft

### Kristalle als Besuchermagnet am Fraunhofer IISB

Über 28 000 Besucher wandelten am Samstag, dem 22. Oktober 2011, während der 5. Langen Nacht der Wissenschaft in Nürnberg, Fürth und Erlangen unter klarem Sternenhimmel auf den Spuren von Wissenschaft und Forschung.

Rund 2 000 Schaulustige aller Altersstufen fanden dabei zwischen 18:00 Uhr und 1:00 Uhr den Weg zum Fraunhofer-Institut für Integrierte System- und Bauelementtechnologie IISB. Dicht umlagert war dort die Ausstellung zur Kristallzüchtung. Anhand von Schautafeln, Mineralien, technischen Exponaten und Filmen erklärten die Fraunhofer-Forscher dem wissbegierigen Publikum zwischen 6 und 80 Jahren, was Kristalle sind, wozu man sie braucht, wie man sie züchtet, was man aus den Kristallen macht und woran man forscht. Auch wenn bei dem einen oder anderen

nach mehreren Stunden ununterbrochenen Redens die Stimme weggeblieben ist, es tat spürbar gut, das Faszinosum unserer Arbeit mal wieder ins breite Volk tragen dürfen. Deshalb werden wir wieder dabei sein, wenn es in zwei Jahren wieder eine derartige Veranstaltung geben soll.

#### Ansprechpartner:

Dr. Jochen Friedrich  
Fraunhofer IISB  
Schottkystraße 10, 91058 Erlangen  
Tel.: +49-9131-761-270  
Fax: +49-9131-761-102  
E-Mail: info@iisb.fraunhofer.de

### Information from the International Organization for Crystal Growth (IOCG)

Roberto Fornari, President of IOCG, Leibniz Institute for Crystal Growth (IKZ), Berlin

The restyling and update of the IOCG website ([www.iocg.org](http://www.iocg.org)) was one of the important points of the agenda 2010-13 deliberated at the last Council meeting in Beijing in August 2010. The Executive Committee became active in this sense and the web site has been completely re-designed with the professional help of Iwona Rozko from McMaster University. The IOCG web page will be used more extensively than in the past, in order to sharpen the international profile of IOCG and provide a useful source of information for the crystal growth community.

The national crystal growth groups/organizations are kindly requested to check if the corresponding link on the IOCG webpage and the names of their delegates are correct. Should you find mistakes of any type, please inform me. We shall eliminate them very quickly. IOCG would also appreciate if you could link your national website to the IOCG one.

You will see that the section "Crystal gallery" is still empty. It

would be great to receive from you nice pictures of crystals, nanocrystals, defects, micrographs...to make the site even more attractive.

As a second point please note that the European Network on Crystal Growth, established in October 2010, has started to operate. The first concrete step consists in the organization of the Europ. Conf. on Crystal Growth in June 2012 (<http://www.eccg4.org/>). Thanks to Kevin Roberts and other British colleagues for the outstanding work made for re-activating the ECCG series after many years of silence. The European Network also supports the Summer School on Crystal Growth in Brasov (Romania) in August 2012 (<http://rocam.unibuc.ro/intschool/index.html>) organized by Horia Alexandru. Both events are held under the auspices of IOCG, according to the Council's decision of reinforcing the regional activities on crystal growth.

DGKK-Fokus

Nobelpreis für Chemie 2011 an Dan Shechtman für die Entdeckung der Quasikristalle

Unmögliche Kristalle?

Peter Gille, Sektion Kristallographie, Department für Geo- und Umweltwissenschaften, Ludwig-Maximilians-Universität München

Als am 5. Oktober die Königliche Schwedische Akademie der Wissenschaften verkündete, dass der diesjährige Nobelpreis für Chemie an Daniel Shechtman für die Entdeckung der Quasikristalle verliehen würde [1], hat die breite Öffentlichkeit damit sicher nicht allzu viel anfangen können. Die Wissenschaftsseiten guter Tageszeitungen haben am nächsten Tag ein paar hübsche Abbildungen veröffentlicht, die die Schönheit quasiperiodischer Muster oder Atomanordnungen veranschaulichen sollten, und Kristallographen sowie die Kristallzüchtergemeinschaft konnte sich über Überschriften wie „Nobelpreis für Kristallforscher“ (Süddeutsche Zeitung vom 6.10.11) auf den Titelseiten freuen. Aber schon der nächsten Ausgabe der Wochenzeitung „Die Zeit“ – der ersten Ausgabe nach der Verkündung dieses Nobelpreises – waren die Quasikristalle und Dan Shechtman nicht einmal eine Kurzmeldung wert. Worin besteht also das Bahnbrechende, das mit dieser Auszeichnung gewürdigt werden soll? Ist das tatsächlich ein ganz neuer Zustand der festen Materie? Und hat diese Entdeckung die Festkörperwissenschaften erweitert oder gar revolutioniert?

„Verbotene“ Symmetrie

Wer einmal Mineralogie/Kristallographie, Chemie oder Physik studiert hat, ist seit dem Grundstudium mit dem Gitterbegriff, d.h. mit dem dreidimensional periodischen Aufbau der Kristalle vertraut. Diese Grundvorstellung vom Aufbau der Kristalle geht schon auf René-Just Haüy (1743 - 1822) zurück, der zeigte, wie sich die äußere Gestalt eines Kristalls aus periodisch aneinandergereihten Parallelepipeden aufbauen lässt. Endgültig wurde diese Gitterhypothese erst durch Max von Laue bewiesen, dessen berühmtes Experiment zu den Röntgenstrahlinterferenzen an Kristallen sich im nächsten April zum 100. Mal jährt. Mit diesem Gitteraufbau zwingend verbunden ist die Beschränkung auf kristallographisch erlaubte Rotationen. Ausschließlich 2-, 3-, 4- und 6-zählige Rotationen können in Kristallen vorkommen, und der elementare Beweis ist leicht erbracht (Abb. 1): Sind A und B zwei benachbarte Gitterpunkte, d.h. die Entfernung zwischen ihnen eine Basistranslation  $t$ , und  $\phi_n$  (und damit auch  $-g\phi_n$ ) Drehwinkel der Zähligkeit  $n$ , so erzeugen die damit verbundenen Rotationen die Gitterpunkte C bzw. D in der

zur Drehachse senkrechten Ebene. Der translationsperiodische Aufbau dieser Ebene erzwingt, dass der Abstand zwischen den Punkten C und D ein ganzzahliges Vielfaches der Basistranslation sein muss, also  $m \cdot t$ . Wird dieser Abstand  $m \cdot t$  über die Drehwinkel auf die Basistranslation bezogen, also  $m \cdot t = t + 2 \cdot t \cdot \sin(g\phi_n - 90^\circ) = t \cdot (1 - 2 \cdot \cos \phi_n)$ , so erfüllen - wegen der begrenzten Funktionswerte der  $\cos$ -Funktion - nur wenige Werte für  $m$  diese Gleichung und es ergeben sich die erlaubten Rotationen, einschließlich der trivialen Lösung einer  $360^\circ$ -Drehung:

$m$	-1	0	1	2	3
$\cos g\phi_n$	1	$1/2$	0	$-1/2$	-1
$\phi_n$	$360^\circ$	$60^\circ$	$90^\circ$	$120^\circ$	$180^\circ$
$n$	1	6	4	3	2

Das alles war Dan Shechtman ebenfalls geläufig, als er am 8. April 1982 bei der elektronenmikroskopischen Untersuchung einer Al-Mn-Legierung ein 10-zähliges Beugungsbild sah und diese Beobachtung mit drei Fragezeichen in seinem Laborbuch notierte. Er hatte gesehen, was eigentlich nicht sein konnte, und teilte seine Beobachtungen seinen Kollegen mit, die ebenfalls wussten, dass dies unmöglich ist. Vielleicht ist die größte Leistung Shechtmans darin zu sehen, dass er seinem experimentelle Befund traute, hartnäckig dafür nach einer Erklärung suchte und dabei auch nicht davor zurückschreckte, sicher geglaubtes Wissen infrage zu stellen. Der oben skizzierte Beweis lässt tatsächlich kein Schlupfloch für Ausnahmen. Das wusste er so gut wie die zahlreichen Kritiker, denen er sich bald ausgesetzt sah. Aber der Beweis fällt natürlich – wie jeder Beweis – in sich zusammen, wenn die Voraussetzungen nicht erfüllt sind. Was ist also, wenn dieser untersuchten Al-Mn-Probe aus irgendeinem Grund – über den noch heute diskutiert wird – trotz der im Beugungsbild sichtbaren Fernordnung kein periodischer Aufbau zugrunde liegt? Diesen Gedanken hat Dan Shechtman konsequent verfolgt, seine Probe intensiv weiter untersucht und schließlich alle gefundenen Beugungsbilder widerspruchsfrei mit einer ikosaedrischen Symmetrie, d.h. mit der nichtkristallographischen Punktsymmetriegruppe  $m\bar{3}5$ , beschrieben. Die erste Veröffentlichung, die schon im Titel den vermeintlichen Widerspruch benennt (*Metallic Phase with Long-Range Orientational Order and No Translational Symmetry*) [2], musste jedoch noch bis November 1984 warten. Frühere Publikationsversuche wurden mit Hinweis auf die verbotenen Symmetrien abgelehnt. Einer der schärfsten Kritiker war übrigens Linus Pauling, der der festen Meinung war, dass sich Shechtmans Beobachtung auf vielfache Verzweigung zurückführen ließe.

Nichtperiodische Ordnung und höherdimensionale Kristallographie

In einer nur sechs Wochen nach dieser Erstveröffentlichung erschienenen Arbeit von Levine und Steinhardt [3] wird der Begriff „Quasikristalle“ vorgeschlagen (*Quasicrystals: A New Class of Ordered Structures*). Eine Erklärung der beobachteten Phänomene war letztlich über den Nachweis einer *aperiodischen*

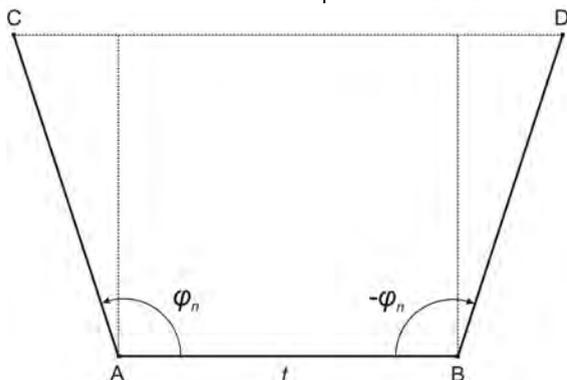


Abb. 1: Grafische Darstellung des Beweises, dass nur 2-, 3-, 4- und 6-zählige Rotationsymmetrien mit dem Gitter verträglich sind.

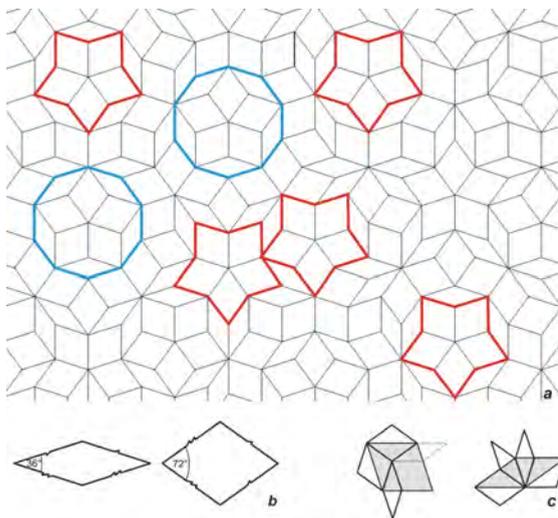


Abb. 2:

- (a) Penrose tiling als Beispiel für eine zweidimensionale quasikristalline Ordnung;
- (b) die zwei elementaren tiles („dicke“ und „dünne“ Raute) dieses tilings mit Signatur der Kanten, die bestimmte Anlegeregeln erzwingen;
- (c) Substitution der Rauten durch analoge Rauten, die mit  $\tau$  skaliert sind.

Fernordnung in diesen Quasikristallen möglich, in denen die atomaren Positionen zwar wohlgeordnet sind, aber nach einem anderen Ordnungsprinzip als der simplen Translationsperiodizität. Damit gab es auch keinen Grund mehr, die beobachteten nichtkristallographischen Rotationen für verboten zu erklären. Neben den periodisch geordneten Kristallen und den amorphen (nur nahegeordneten) Festkörpern etablierte sich so der aperiodisch (fern-)geordnete Quasikristall als ein dritter Zustand von Festkörpern.

Mathematiker hatten mit ihrer Freude an abstrakten Überlegungen das Terrain für die Beschreibung dieser aperiodischen Ordnung längst bereitet. Am berühmtesten ist sicher das von Roger Penrose 1974 beschriebene Muster (*Penrose tiling*) [4], das mit zwei verschiedenen Rauten die Ebene lückenlos, aber nicht überlappend bedeckt, dabei feste Anlegevorschriften erfüllt und lokal 5-zählige Symmetrien erzeugt (Abb. 2). Die Anlegevorschriften werden in der Zeichnung durch die Signaturen der Kanten angedeutet, die nur „passende“ Kombinationen erzwingen und damit zu einer aperiodischen Ordnung in diesem Muster führen. Der Konstruktionsprozess ist jedoch nicht deterministisch. Wie aus Abb. 2c ersichtlich, kann das tiling mittels zweier selbstähnlicher Rauten „vergrößert“ werden: Es tritt eine Skalierungssymmetrie („Selbstähnlichkeit“) auf. Ein weiterer Blick auf das *Penrose tiling* zeigt immer wiederkehrende Bereiche („Cluster“) mit gleicher lokaler Symmetrie (beachte z.B. „Sterne“ aus Rauten in Abb. 2a). Dies betrifft nicht nur relativ kleine Cluster, sondern auch größere Bereiche, die allerdings umso seltener auftreten, je ausgedehnter sie in dem unendlichen *Penrose tiling* sind. Mathematisch wird dies mit lokalen Isomorphismenklassen beschrieben.

Für eine anschauliche Erklärung der quasiperiodischen Ordnung von Quasikristallen sei als ein Beispiel die Abstandssequenz entsprechend einer Fibonacci-Folge genannt: Zwei elementare Abstände S und L, deren Längenverhältnis dem „Goldenen Schnitt“  $\tau = L/S$  mit  $\tau = 1/2(1 + 5^{1/2}) = 1.618\dots$  entspricht, definieren einen geordneten, aber nicht translationsperiodischen, eindimensionalen Quasikristall (Abb. 3).

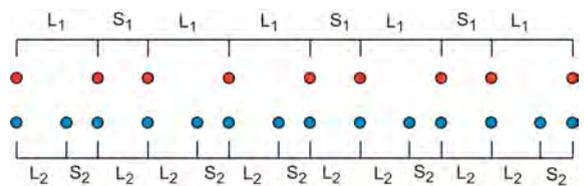
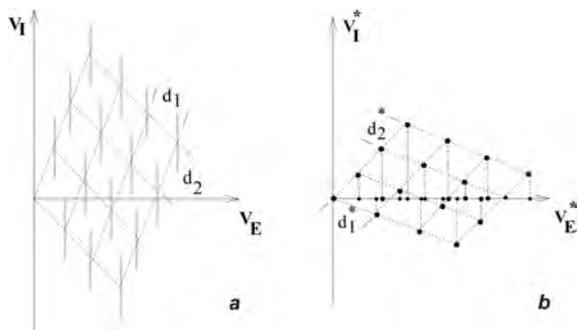


Abb. 3: Die Fibonacci-Kette als Beispiel eines aperiodisch geordneten eindimensionalen Quasikristalls: Aufbau aus zwei elementaren Strecken L und S mit einem Längenverhältnis  $\tau = L/S$ , wobei  $\tau$  die Zahl des Goldenen Schnitts ist. Aus der roten Fibonacci-Sequenz kann z.B. über die Substitutionsregel  $S \rightarrow L$  und  $L \rightarrow L+S$  eine weitere Fibonacci-Sequenz erzeugt werden (blau). Inhärentes Merkmal dieser Regel ist die Selbstähnlichkeit (Skalierungssymmetrie): Die Folge  $L_1S_1$  wird mit  $\tau$  skaliert und ergibt die Folge  $L_2S_2$ .

Für eine nicht nur anschauliche, sondern auch quantitative Behandlung des quasikristallinen Zustandes sind die aus der klassischen Kristallographie bekannten Disziplinen der Symmetriegruppen, Morphologie, Kristallgeometrie, Beugungstheorie, Strukturforchung etc. zu erweitern. Dies kann hier natürlich nicht vertieft werden, ist aber in entsprechenden Monographien nachzulesen [5]. Es sei nur kurz das Konzept der Einbettung in höherdimensionale Räume erläutert. Dieses Konzept ist keineswegs neu oder gar speziell für Quasikristalle entwickelt worden, sondern wird routinemäßig bei der Strukturforchung an modulierten Kristallen eingesetzt. Als einfaches Beispiel möge wieder der eindimensionale (1D) Quasikristall „Fibonacci-Kette“ dienen. Die in Abb. 3 gezeigte aperiodische Folge von (atomaren) Positionen kann man sich auch als Schnitt des realen (hier 1D) Raumes ( $V_E$ ) in einem 2D-Hyperraum vorstellen, in dem ein translationsperiodisches (Hyper-)Gitter existiert (Abb. 4a). Entscheidend ist dabei, dass dieser Schnitt außer durch den Nullpunkt durch keinen weiteren Gitterpunkt geht, also irrational ist. Der für das Beispiel der Fibonacci-Kette nötige Schnittwinkel  $\alpha$  ergibt sich aus der irrationalen Zahl des Goldenen Schnitts:  $\tan \alpha = 1/\tau$ . Zur Darstellung der Fibonacci-Kette wird also eine zusätzliche Dimension benutzt, die den sog. „internen“ Teilraum  $V_I$  aufspannt (Abb. 4a). Eine Konsequenz dieses Verfahrens ist, dass die realen Atome (Punkte auf der Kette) durch atomare „Hyperflächen“ mit einer Dimension entsprechend der des internen Teil-Raums ersetzt werden (hier „Striche“). Schnittpunkte der atomaren Hyperfläche mit dem Realraum  $V_E$  (Fibonacci-Kette) definieren die „wahren“ atomaren Positionen. Im Falle des *Penrose tilings* oder eines realen 2D-Quasikristalls (z.B. der quasiperiodischen Schicht einer dekagonalen Phase), benötigt man einen 4D-Hyperraum, ( $V_E+V_I$ ), in dem der  $V_I$  mit 2D-„Atomen“ dekoriert ist. Zur Beschreibung von dekagonalen Phasen wird also ein (4+1)D-Hyperraum benötigt, wobei sich die hinzugefügte Dimension auf die eine periodische Richtung bezieht. Man kann sich somit bei der Analyse von Quasikristallen auf periodische Gitter im Hyperraum beziehen und Ebenen und Richtungen mit ganzzahligen Indizes beschreiben. Für dekagonale Quasikristalle werden deshalb fünf (4+1) Indizes benutzt. Darüber hinaus lassen sich übliche kristallographische Verfahren der Strukturforchung (Schnitte und Projektionen im Beugungsraum) anwenden. In der Praxis ist dies allerdings durchaus aufwändig, da man z.B. zuerst die Form und die chemische Dekoration der atomaren Hyperflächen bestimmen muss.

Wie man sich anhand von Abb. 4a vorstellen kann, führen schon kleine Veränderungen des Schnittwinkels dazu, dass der Kristallraum das Hypergitter doch in einem zweiten Punkt und damit auch in weiteren Vielfachen dieser u.U. sehr großen Periode schneidet. Es resultiert dann eine normale kristalline, wenn auch langperiodische Ordnung. Es ist plausibel, dass solche Struktu-



**Abb. 4:** Beschreibung einer 1D-quasikristallinen Ordnung durch Einbettung in einen 2D-Hyperraum, der von den beiden (eindimensionalen) Räumen  $V_E$  und  $V_I$  aufgespannt wird:

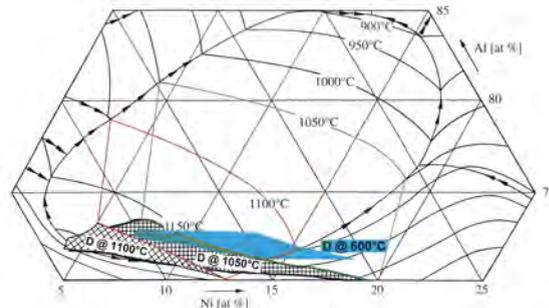
- (a) Darstellung der aperiodischen Kette als irrationaler Schnitt längs  $V_E$ : Die 1D-Hyperatome (Striche parallel  $V_I$ ) schneiden  $V_E$  an den Positionen der Kette.
- (b) Zugehöriger Beugungsraum ( $V_E^*$ ,  $V_I^*$ ) in dem sich die Beugungsreflexe als Projektionen aus dem Hyperraum  $V^*$  auf den  $V_E^*$  ergeben.

ren den „benachbarten“ Quasikristall strukturell gut approximieren. Das haben Strukturanalysen bestätigt. Die moderne Strukturforschung an Quasikristallen beschäftigt sich daher auch mit Strukturen von solchen sog. Approximanten-Phasen, wobei zwar bekannte kristallographische Methoden genutzt werden können, andererseits aber riesige Elementarzellen (u.U. Tausende Atome pro Elementarzelle) eine erhebliche Herausforderung in der experimentellen Praxis darstellen.

Unter den realen Quasikristallen finden sich auch 1- und 2-dimensionale Beispiele, d. h. die quasiperiodische Ordnung ist in diesen Fällen nur auf eine oder zwei Raumrichtungen beschränkt, während ansonsten die klassische Translationsperiodizität beobachtet wird. Das gilt z. B. für die wichtige Klasse der dekagonalen Phasen, bei denen eine aperiodische Ordnung von Atomen innerhalb von Schichten realisiert ist, während die Schichtstapelung periodisch erfolgt. Neben diesen dekagonalen Phasen, in denen eine nichtklassische 5- oder 10-zählige Rotationssymmetrie senkrecht zu den Schichten (also längs der „periodischen“ Richtung) auftritt, zeichnen sich die ikosaedrischen Quasikristalle durch eine Kombination von 3- und 5-zähligen Rotationsachsen „wie in einem Ikosaeder“ aus. Dekagonale und ikosaedrische Quasikristalle sind die am besten untersuchten aperiodischen Phasen, auf die sich die Strukturforschungsarbeiten konzentriert haben. Grund hierfür ist u.a. die Verfügbarkeit von Proben mit ausgezeichneter Qualität. Es wurden aber inzwischen auch schon quasikristalline Phasen mit 8-, 12-, und 18-zähliger Rotationssymmetrie gefunden.

**Wachstum stabiler Quasikristalle**

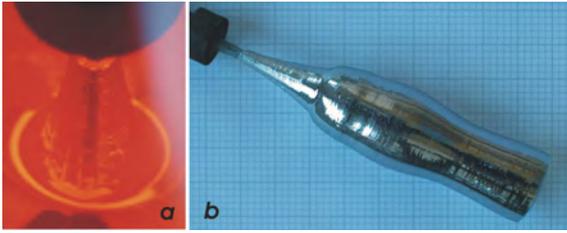
Am Anfang stand wie oben beschrieben der experimentelle Befund. Insofern stellt sich die Frage nicht, ob solche Symmetrien, die dem Verständnis der klassischen Kristallographie widersprechen, in festen Phasen wirklich beobachtet werden können. Shechtman et al. [2] haben die zunächst suspekten Elektronenbeugungsbilder der ikosaedrischen Phase erstmals an einer Probe gefunden, die sie durch Schnellerstarrung (typ.  $10^6$  K/s) aus einer Al-Mn-Schmelze hergestellt hatten. Bei derart hohen Abkühlungsgeschwindigkeiten können die Gesetze der Gleichgewichtsthermodynamik wenig erklären. Es bilden sich häufig metastabile Phasen, die nur deshalb nicht in einen stabilen Zustand übergehen, weil den Atomen nach dem Abschrecken die für diese Umwandlung nötige Mobilität fehlt. Bei der zuerst gefundenen  $Al_{86}Mn_{14}$ -Phase und vielen verwandten



**Abb. 5:** Ausschnitt aus dem ternären Phasendiagramm Al-Co-Ni (nach [6]). Die Temperaturen markieren die Liquidus-Isothermen im Primärstarrungsgebiet bzw. die temperaturabhängige Lage des Existenzgebietes dekagonaler Quasikristalle (D).

quasikristallinen Proben in binären Systemen aus Al und einem Übergangsmetall handelt es sich um solche metastabilen Quasikristalle. Sie sind herstellungsbedingt von geringer Korngröße (typ.  $1 \mu m$ ) und in die Al-reiche Restmatrix eingebettet und erlauben deshalb kaum ein systematisches Studium ihrer intrinsischen Eigenschaften. Besonderes Interesse hat deshalb die Entdeckung der ersten stabilen ikosaedrischen Quasikristalle in den Systemen Al-Li-Cu und Al-Cu-Fe und der ersten stabilen dekagonalen Phasen in den Systemen Al-Co-Cu und Al-Co-Ni gefunden. Damit gab es prinzipiell die Möglichkeit, größere Quasikristalle gleichgewichtsnah wachsen zu lassen, und es musste die Antwort auf die Frage gefunden werden, aus welchen physikalischen Prinzipien quasikristalline Strukturen ihre Stabilität beziehen. Dafür werden zwei Erklärungen herangezogen, die für die verschiedenen quasikristallinen Materialien in unterschiedlichem Maße gelten. Quasikristalle können durch einen besonderen Typ von Fehlordnung, sog. Phasonen, auf die hier nicht näher eingegangen werden kann, eine Vielzahl von „Zufallskonfigurationen“ einnehmen, was zu einer gegenüber periodischen Festkörpern höheren Entropie führen kann. Eine erhöhte Entropie  $S$  verringert die Gibbs'sche Freie Enthalpie  $G = H - TS$ ; diese Quasikristalle werden als *entropisch* stabilisiert bezeichnet. Eine *elektronische* Stabilisierung kann sich ergeben, wenn ein spezifisches Verhältnis  $e/a$  von Valenzelektronen pro Atom der Verbindung oder Legierung erreicht wird. Das knüpft an die Hume-Rothery-Theorie an, nach der sich aus dem  $e/a$ -Verhältnis einer intermetallischen Verbindung Prognosen für die sich ausbildende Kristallstruktur ableiten lassen. Diese elektronisch stabilisierten Quasikristalle werden deshalb auch als Hume-Rothery-Phasen bezeichnet. In mehreren ternären Systemen aus Al, Cu und einem Übergangsmetall (Fe, Ru, Os) gibt es z. B. ikosaedrische Quasikristalle, für deren Zusammensetzung sich ein Quotient von  $e/a \approx 1,75$  ergibt.

Die Existenz thermodynamisch stabiler Quasikristalle eröffnet den Weg, konventionelle Methoden der Kristallzüchtung für die Präparation großer einkristalliner Proben einzusetzen. Die dafür erforderlichen Phasendiagramme wurden in einigen wichtigen ternären Systemen exakt gemessen. Abb. 5 zeigt als Beispiel einen Ausschnitt des ternären Diagramm Al-Co-Ni, dessen Kenntnis für die erfolgreiche Züchtung der wohl am besten untersuchten dekagonalen Phase D-AlCoNi eine wesentliche Voraussetzung war. Das temperaturabhängige Existenzgebiet der dekagonalen Quasikristalle zeigt eine große Ausdehnung bzgl. des Co:Ni-Verhältnisses, aber nur eine geringe Al-Variation. In diesem, wie in allen bekannten ternären Systemen entsteht



**Abb. 6:** Dekagonaler AlCoNi-Quasikristall, gezüchtet nach dem Czochralski-Verfahren durch Ziehen aus einer Al-reichen Schmelze.

- (a) Beim Züchten parallel [00001] kann die 10-zählige Symmetrie beobachtet werden;  
 (b) derselbe Kristall nach der Entnahme.

die quasikristalline Phase erst unterhalb einer ternären peritektischen Reaktion. Die primäre Erstarrung eines Quasikristalls – und damit die Möglichkeit der gezielten Kristallzüchtung – ergibt sich in dem Temperaturbereich unterhalb der peritektischen Temperatur bis zur eutektischen Reaktion. D.h. die quasikristalline Phase lässt sich direkt aus einer inkongruenten Schmelze züchten, und alle dafür bekannten Kristallzüchtungsmethoden könnten zum Einsatz kommen. Unter allen erprobten Techniken hat die Czochralski-Methode die meisten Vorteile, wozu u.a. die gute Beobachtungs- und Manipulationsmöglichkeit während des Experiments zählen [7]. Abb. 6a zeigt einen Blick durch das Sichtfenster einer Czochralski-Apparatur während der Züchtung eines dekagonalen AlCoNi-Quasikristalls. Die zu beobachtende Morphologie des wachsenden Kristalls lässt erkennen, dass der Quasikristall parallel zu seiner 10-zähligen Achse wächst. Abb. 6b zeigt die typische Gestalt eines dekagonalen Quasikristalls nach der Züchtung. Die heute existierenden Proben von stabilen Quasikristallen haben typische Größen von einigen  $\text{cm}^3$  und sind damit ausreichend groß und in vielen Fällen auch von hoher struktureller Güte, um eine Vielfalt von physikalischen Grundlagenuntersuchungen zu ermöglichen.

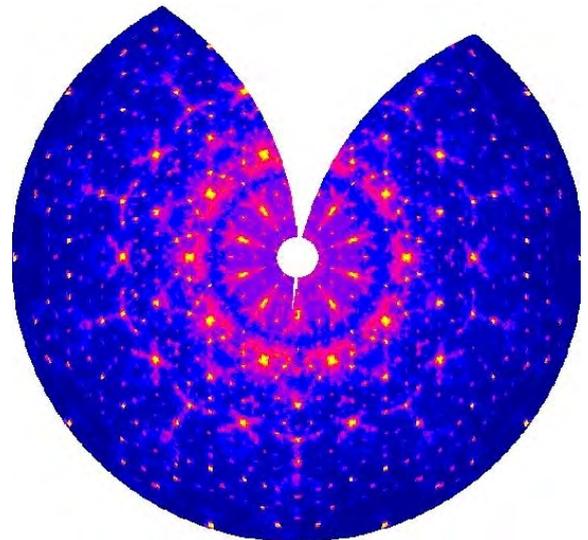
Stabile Quasikristalle zeigen beim Wachstum kaum Besonderheiten gegenüber periodischen Kristallen von vergleichbar komplexer Struktur. Die verschiedenen sog. Approximanten-Phasen, die in den Phasendiagrammen in unmittelbarer Nachbarschaft zu den Quasikristallen auftreten, lassen sich deshalb im Wesentlichen nach den gleichen Rezepten züchten. Daraus lässt sich schließen, dass das Fehlen der Translationsperiodizität, ja selbst die Existenz einer Elementarzelle offenbar keine Kategorien sind, die für die Wachstumskinetik relevant sind. Das Auftreten großer Atomcluster in diesen Strukturen – sowohl in den Quasikristallen als auch in ihren Approximanten – könnte indes die gemeinsame Ursache für die geringen Wachstumsgeschwindigkeiten dieser Phasen sein.

Ein weiterer großer Fortschritt für das Verständnis und die Untersuchungsmöglichkeiten von Quasikristallen war im Jahr 2000 die Entdeckung der ersten stabilen *binären* quasikristallinen Phase im System Cd-Yb durch Tsai [8]. Die Struktur des ikosaedrischen Kristalls der Zusammensetzung  $\text{Cd}_{5,7}\text{Yb}$  konnte inzwischen sehr genau bestimmt werden, und diese Phase wurde zum Ausgangspunkt einer ganzen Serie von quasikristallinen Phasen, die durch klassische kristallchemische Argumente systematisch erweitert wurde. Ebenso interessante Fragestellungen, die intensiv untersucht werden, betreffen Probleme der Epitaxie auf quasikristallinen Oberflächen. Unter welchen Bedingungen und bis zu welchen Oberflächenbelegungen lässt sich die kristallographische Information einer aperiodischen Ordnung dem Fremddesposit (z.B. Pb oder Bi) aufzwingen?

Und wenn das nicht möglich ist, kann es dann eine epitaktische (gesetzmäßige geometrische) Beziehung zwischen einer periodischen Kristallschicht und einem quasiperiodischen Substrat geben? [9,10]

### Beugung an quasikristallinen Phasen

Beugungsbilder von Quasikristallen zeigen unmittelbar die fehlende Periodizität und – bei näherer Analyse – die mit dem Goldenen Schnitt verknüpfte aperiodische Ordnung, die sich in der Anordnung von starken und vielen schwachen, aber scharfen Reflexen manifestiert (Abb. 7) [11]. Beispielsweise lässt sich die nullte Schicht der zur periodischen Richtung [00001] gehörigen Zone einer dekagonalen Phase in Bezug auf vier Basisvektoren  $a_i^*$  ( $i=1 \dots 4$ ) ganzzahlig indizieren als  $(h_1, h_2, h_3, h_4, 0)$ . Der „Umweg“ über den Hyperraum ( $V_E+V_I$ ) und den zugehörigen reziproken Hyperraum ( $V_E^*+V_I^*$ ) (Abb. 4b) ermöglicht einen einfachen Zugang zum Verständnis der Reflexpositionen. Es ist nur das aus der kristallographischen Strukturforschung bekannte Prinzip zu beachten, dass Schnitte in einem (Hyper-)Raum zu Projektionen im Fourier-(Hyper-)Raum korrespondieren. Es sei allerdings auf die Skalierungssymmetrie auch der Beugungsbilder hingewiesen, die keine Auswahl *eines* elementaren, d. h. *kleinsten* Basisvektors zulässt. In der Praxis benutzt man die Position eines starken Reflexes in der Nähe des Ursprungs des reziproken Raumes zur Definition eines solchen Basisvektors. Über die Existenz von diskreten Beugungsmaxima wird heutzutage die quasikristalline Ordnung präzise definiert. Eine Strukturanalyse mit Beugungsintensitäten – prinzipiell analog zum Verfahren in der klassischen Kristallographie, in der Praxis aber sehr aufwändig – führt auf die Modellierung der atomaren Hyperflächen und die Extrahierung der wahren atomaren Positionen aus den Schnitten der Hyperflächen mit dem realen Kristallraum. Dieses Verfahren wurde bis heute nur an einer sehr kleinen Auswahl von quasikristallinen Phasen durchgeführt. Grund hierfür ist dabei nicht nur die Komplexität der Strukturanalyse, sondern auch der Mangel an guten Datensätzen. Letzterer Aspekt hängt nicht so sehr von dem aus der klassischen Kristallographie bekannten Problem großer Mosaikereffekte und daraus resultierenden großen Reflexbreiten ab, sondern bezieht sich auf vielfach auftretende komplexe Fehlordnungssphänomene.



**Abb. 7:** Röntgenbeugungsbild einer dekagonalen Phase ( $\text{Al}_{72,5}\text{Ni}_{11,0}\text{Co}_{16,5}$ ). Der Primärstrahl ist längs der periodischen Richtung [00001] orientiert; das Beugungsbild zeigt eine 10-zählige Rotations-symmetrie. (nach [11])

## Nützliche Quasikristalle?

Natürlich vorkommende Quasikristalle wurden lange Zeit nicht gefunden. Wenn man sich der Tatsache bewusst ist, dass das notwendige Werkzeug einer solchen Suche eigentlich nur ein Transmissionselektronenmikroskop sein kann, lag es auch nahe, diese Suche für aussichtslos zu halten. Außerdem gab es genügend geochemische Argumente, die typischen Metallzusammensetzungen der bisher synthetisierten Quasikristalle nur an sehr wenigen natürlichen Lokalitäten für möglich zu halten. Nach jahrelanger systematischer Suche und einem immer mehr verfeinerten Kriterienkatalog wurde schließlich im Naturhistorischen Museum Florenz in einer von der Halbinsel Kamtschatka stammenden und als Khatyrkit katalogisierten Probe eine natürlich entstandene quasikristalline Phase aus dem schon bekannten System Al-Cu-Fe gefunden [12].

Quasikristalle sind aber auch unter materialwissenschaftlichen Aspekten ein interessanter Forschungsgegenstand. Das Fehlen der Translationsperiodizität in mindestens einer Raumrichtung nimmt der klassischen Festkörperphysik eine ihrer wesentlichen Voraussetzungen, nämlich die periodischen Potentiale, wodurch sich viele Fragen nach den physikalischen Eigenschaften neu stellen. Das war eines der Anliegen eines DFG-Schwerpunktprogramms [13], in dem basierend auf der Züchtung von „großen“ Quasikristallen ihre Eigenschaften systematisch studiert wurden. Dabei bestätigte sich, dass sich Quasikristalle z.T. völlig anders verhalten können als die bisher bekannten periodischen Kristalle. Sie zeigen z.B. eine mit der Temperatur zunehmende mechanische Festigkeit. Auch die elektrische Leitfähigkeit nimmt abweichend von normalen intermetallischen Phasen bei höheren Temperaturen zu. Die generell geringe thermische und elektrische Leitfähigkeit lässt sich ebenfalls auf das Fehlen von periodischen Potenzialen zurückführen.

Derartige Auffälligkeiten, aber vor allem die Kombination von ungewöhnlichen Eigenschaften haben Quasikristalle für verschiedene Anwendungen interessant gemacht. Die geringe Oberflächenenergie, die vergleichbar mit jener von PTFE ist, verbunden mit der großen Härte von Quasikristallen wird ausgenutzt, um z.B. Pfannen mit quasikristallinen Legierungen zu beschichten, die den Anti-Haft-Effekt mit einer hohen Kratzfestigkeit verbinden. Auch in Schneidwerkzeugen (z.B. Rasierklingen) wird die große Härte beigemengter quasikristalliner Phasen bereits ausgenutzt. Das sind natürlich im Augenblick reine Nischenanwendungen, und es wäre unredlich, dem in diesem Jahr verliehenen Nobelpreis für Chemie bereits einen überzeugenden wirtschaftlichen Nutzen für die Menschheit zu bescheinigen, auch wenn die-

ser in einschlägigen Publikationen in Aussicht gestellt wird [14]. Diese genannten Beispiele zeigen, dass nach jetzigem Erkenntnisstand technische Anwendungen möglicherweise ausschließlich auf dünnen polykristallinen Schichten basieren werden und ein technischer Bedarf an großen Einkristallen dieser neuen Substanzklasse noch nicht absehbar ist. Um die intrinsischen Eigenschaften von Quasikristallen zu studieren – die Voraussetzung für jede Idee einer späteren technischen Verwertung – sind „große“ und wohldefinierte Proben jedoch unverzichtbar.

Aus Sicht des Autors dieser Zeilen wurde mit dem Nobelpreis für Dan Shechtman vor allem sein Mut ausgezeichnet, das Weltbild der klassischen Kristallographie zu zertrümmern, sowie seine Hartnäckigkeit, mit der er seinen experimentellen Befunden vertraute. Die *International Union for Crystallography* hat übrigens 1992 ihre Definition dessen, was wir einen Kristall nennen sollten, so erweitert, dass nun die Quasikristalle nicht nur quasi, sondern uneingeschränkt Kristalle sind: *By "Crystal" is meant any solid having an essentially discrete diffraction diagram* [15]. Diese Definition lässt ausreichend Platz für weitere Entdeckungen auf dem Gebiet der Festkörperforschung.

## Literatur:

- [1] [http://www.nobelprize.org/nobel\\_prizes/chemistry/laureates/2011/advanced-chemistryprize2011.pdf](http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/chemistry/laureates/2011/advanced-chemistryprize2011.pdf)
- [2] D. Shechtman et al., Phys. Rev. Lett. **53** (1984), 1951.
- [3] D. Levine, P.J. Steinhardt, Phys. Rev. Lett. **53** (1984), 2477.
- [4] R. Penrose, Bull. Inst. Math. Appl. **10** (1974), 266.
- [5] z.B.: W. Steurer, T. Haibach, *Crystallography of Quasicrystals*, in: Z.M. Stadnik (Ed.), *Physical Properties of Quasicrystals*, Springer Series in Solid-State Science, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg 1999, pp. 51.
- [6] T. Gödecke et al., Z. Metallkd. **89** (1998), 687.
- [7] B. Bauer et al., Philos. Mag. **86** (2006), 317.
- [8] A.P. Tsai et al., Nature **408** (2000), 537.
- [9] K.J. Franke et al., Phys. Rev. Lett. **89** (2002) 165104.
- [10] W. Theis, K.J. Franke, J. Phys.: Condens. Matter **20** (2008), 314004.
- [11] E. Weidner et al., Philos. Mag. A **81** (2001), 2375.
- [12] L. Bindi et al., Science **324** (2009), 1306.
- [13] H.-R. Trebin, *Quasicrystals. Structure and Physical Properties*, Wiley-VCH, Weinheim 2003.
- [14] J.-M. Dubois, *Useful Quasicrystals*, World Scientific, 2005.
- [15] Acta Cryst. A **48** (1992), 922.

## DGKK-Nachwuchs

### Abgeschlossene Promotion am Freiburger Materialforschungszentrum, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg

**Tina Sorgenfrei: "Untersuchungen zum Dotieren mit Molekülen an ZnO-Schichten gewachsen mittels MBE"**

In ihrer Promotion untersuchte Tina Sorgenfrei den Einfluss der Wachstumsparameter und der Dotierung auf die Eigenschaften von Zinkoxid-Schichten. Motiviert wurde diese Arbeit durch das zunehmende Interesse an den direkten Halbleitern mit großer Bandlücke für optoelektronische Anwendungen im blauen und

ultravioletten Spektralbereich. Neben dem aktuell verwendeten GaN stellt ZnO aufgrund seiner passenden Materialeigenschaften einen vielversprechenden Kandidaten für diese Anwendung dar, jedoch ist es bislang nicht gelungen, eine erfolgreiche p-Leitung stabil und reproduzierbar herzustellen.

26 Aufgrund der Ergebnisse aus vielen Untersuchungen zur Dotierung von ZnO werden den Gruppe-V-Elementen P, As und Sb die besten Chancen zugeschrieben, als flache Akzeptoren in ZnO zu wirken. Dennoch kann in den meisten Fällen, trotz nachweislich hohem Dotierstoffeinbau, keine p-Leitfähigkeit gemessen werden, in anderen Fällen verschwindet die p-Leitung nach einer gewissen Zeit wieder. Dies und die Tatsache, dass in vielen Schichten, die mit unterschiedlichen Gruppe-V-Elementen dotiert wurden, Akzeptorniveaus der selben energetischen Lage entstehen (ca. 130 meV), zeigen, dass der Einbau der Dotierstoffe bis heute weitestgehend unverstanden ist.

Um zu prüfen, ob die Dotierstoffe in Form oxidischer, molekularer Komplexe eingebaut werden, wurde aus Ausgangsmaterial sowohl elementarer (As) als auch oxidischer ( $\text{As}_2\text{O}_3$ ) Dotierstoff eingesetzt.

Da für einen maximalen Dotierstoffeinbau, neben anderen Einflüssen, auch eine bestmögliche kristalline Qualität gewünscht ist, eignet sich unter Berücksichtigung verschiedenster Faktoren (z.B. Qualität, Verfügbarkeit, chemische und physikalische Stabilität usw.) c-orientiertes  $\text{Al}_2\text{O}_3$  trotz seiner Gitterfehl-anpassung von letztendlich 18% sehr gut. Im Rahmen dieser Arbeit konnte zum einen gezeigt werden, dass die Verwendung eines nicht c-orientierten  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Substrates, trotz resultierendem c-orientierten Aufwachsens des ZnO, zu einer Verminderung der kristallinen Qualität der Schicht und auch zu einem reduzierten Dotierstoffeinbau gegenüber der Verwendung eines c-orientierten Substrates führt. Zum anderen ist es erstmals, entgegen vieler Publikationen, gelungen, die Bildung der  $30^\circ$ -Rotationsdomänen auf c- $\text{Al}_2\text{O}_3$  ohne jegliche Vorbehandlung des Substrates, nur durch Einstellen des II/VI-Verhältnisses während der Epitaxie, reproduzierbar zu unterbinden.

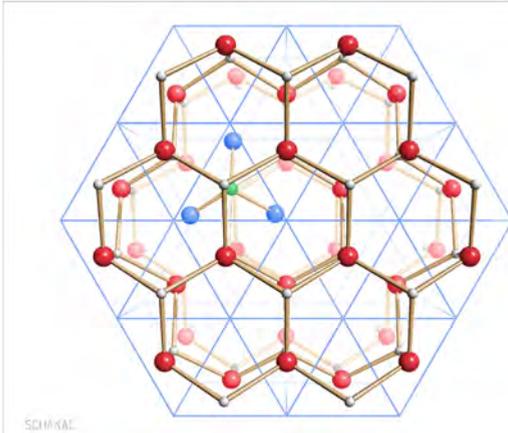
Laut Effektiver-Masse-Theorie besitzt ein  $\text{MO}_3$ -Komplex mit  $M=P, As, Sb$  in ZnO eine Aktivierungsenergie von 132 meV und agiert unabhängig von der Art des Zentralkations als flacher Akzeptor. Um die Vermutung zu prüfen, ob nun oxidische Molekülkomplexe, statt substituierender Atome, in das ZnO-Gitter eingebaut werden und diese dann die Akzeptorniveaus mit einer Aktivierungsenergie von ca. 130 meV bilden, wurden  $\text{As}_4\text{O}_6$ -Molekülfragmente in der Gasphase angeboten.

Mittels SIMS-Messungen wurde hierbei ein maximaler Dotierstoffeinbau von  $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  nachgewiesen. Allerdings zeigen

sowohl elektrische Hall-Messungen als auch Photolumineszenzuntersuchungen die Anwesenheit eines oder mehrerer Donatoren im Material. Über temperaturabhängige Hallmessungen und chemische Analyse konnte Al als verantwortliche Verunreinigung identifiziert werden. Als Quelle des Al wurde der Kern der Plasmaquelle, in dem das Sauerstoffplasma für das Wachstum gezündet wird, gefunden. Um dieser Verunreinigung vorzubeugen, wurde ein MgO-Kern angefertigt und in die Plasmaquelle eingesetzt. Mit diesem Kern konnten Schichten mit deutlich höherem spezifischen Widerstand gewachsen werden, allerdings wiesen diese Schichten immer noch persistente n-Leitfähigkeit auf. Da im Laufe dieser Arbeit nahezu alle extrinsischen Verunreinigungen ausgeschlossen werden konnten, liegt die Quelle der vorhandenen Donatoren wahrscheinlich in intrinsischen Defekten. Da im Zn-reichen Regime gewachsen wurde, um der Bildung der  $30^\circ$ -Rotationsdomänen vorzubeugen und die Konkurrenz von As und O um den O-Gitterplatz zu minimieren, ist die Existenz von interstitiellem Zn und O-Vakanzen im ZnO anzunehmen. Aus diesem Grund wurden post-growth Temperversuche an den ZnO-Schichten in O-Atmosphäre bei verschiedenen Temperaturen zwischen 600 und 1000 °C unternommen. Vor und nach dem Tempern wurden die Widerstände der Proben über kontaktlose Wirbelstrommessungen bestimmt.

Dabei wurde eine maximale Zunahme des Widerstandes bei einer Annealing-Temperatur von 700 °C gefunden. Bei höheren Temperaturen sinkt der Widerstand wieder exponentiell mit der Temperatur ab, was vermutlich an der Bildung von institiellem O liegt. Während bei 700 °C-getemperten, molekular dotierten Proben weiter n-Leitung, bei jedoch hohem Widerstand, ermittelt wurde, konnte in einer getemperten, As-dotierten ZnO-Schicht schwache p-Leitung mit einer Ladungsträgerkonzentration von  $4 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$  reproduzierbar gemessen werden.

Untersuchungen mittels PL, HRXRD und elektrische Messungen zeigen in allen Fällen unterschiedliche Ergebnisse von As- und  $\text{As}_2\text{O}_3$ -dotierten Schichten, während die Daten innerhalb einer solchen Gruppe immer reproduzierbar und vergleichbar sind. ODMR-Messungen könnten nun Aufschluss über den genauen Einbau der Dotanden in das Gitter und ihrer Position und Form geben, waren allerdings bislang nicht möglich. Somit kann die Theorie zum Einbau von oxidischen Komplexen hier weder bestätigt noch widerlegt werden. Allerdings konnten im Laufe der Arbeit bislang nicht zugeordnete PL-Übergänge identifiziert werden, und es wurden wichtige Erkenntnisse gewonnen, die Konzentration von extrinsischen und intrinsischen Defekten zu minimieren.



Schematische Darstellung eines  $\text{MO}_3$ -Komplexes im Wurtzitzitter (Ionenradien sind zur besseren Veranschaulichung verkleinert dargestellt)

Name	Tina Sorgenfrei
Geburtsdatum	21.01.1981
Geburtsort	Lahr/Schwarzwald
9/91 - 6/01	Scheffelgymnasium Lahr
10/01 - 05/06	Studium Mineralogie, Fachrichtung Kristallographie/Materialwissenschaften (Diplom) an der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg
06/06 - 03/07	Diplomarbeit „Optimierung von epitaktischen AlN-Schichten durch Substratvorbehandlung“
04/07 - 04/11	Doktorarbeit „Untersuchungen zum Dotieren mit Molekülen an ZnO-Schichten gewachsen mittels MBE“ am Freiburger Materialforschungszentrum
seit 05/11	wissenschaftliche Mitarbeiterin am Kristallographischen Institut der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg

## Abgeschlossene Promotion an der TU Berlin

### Michael Wünscher: Crucible-free Crystal Growth of Germanium – Experiments and Simulations

Während seiner Promotion untersuchte Michael Wünscher aus der Themengruppe Silizium & Germanium am Leibniz-Institut für Kristallzüchtung die tiegelfreie Kristallzüchtung von Germanium nach der Floating-Zone und der Pedestal Methode. Diese wurden sowohl experimentell als auch numerisch untersucht und die Ergebnisse miteinander verglichen.

Es stellte sich heraus, dass der typische Aufbau eines Floating-Zone Prozesses für Silizium beim Germanium zu einem instabilem Wachstum für Germanium führte. Die Kristalle wuchsen spiralförmig. Dieses Wachstumsverhalten ließ sich unterdrücken, indem Helium anstatt von Argon als Schutzgas verwendet wurde. Der viermal größere Wärmeübergangskoeffizient von Helium verstärkt die Kühlwirkung der Atmosphäre auf den Kristall und reduziert das Schraubenwachstum. Beim Vorratsstab führte dies jedoch zu einem ungleichmäßigen Abschmelzen und machte einen längeren Prozess unmöglich. Um diese beiden unterschiedlichen Bedingungen gleichzeitig zu erfüllen, wurden beide Gase im Prozess eingesetzt, Helium in der Umgebung des Kristalls und Argon am Vorratsstab (vgl. Abb. 1). Mit dem Programm Elmer ließ sich die stärkere Kühlwirkung von Helium im Vergleich zu Argon durch den Vergleich der Wärmeverluste durch Strahlung mit denen durch Gaskonvektion bestätigen.

Als Grundlage für die numerische Untersuchung des FZ Prozesses diente das von Dupret et.al. entwickelte numerische Modell, welches mit früheren numerischen und experimentellen Ergebnissen für Silizium verglichen wurde. Das quasistationäre axialsymmetrische Modell zeigte dabei eine gute Übereinstimmung. In einem neuen Experiment wurde die Ziehgeschwindigkeit schrittweise von 5.0 mm/min auf 8.0 mm/min erhöht und zeigte bis 6.5 mm/min eine gute Übereinstimmung mit den Rechnungen.

Für höhere Geschwindigkeiten driften die experimentellen und numerischen Ergebnisse auseinander, was nicht vollständig erklärt werden konnte.

Für die Nutzung des Floating-Zone Modells für Germanium konnte gezeigt werden, dass die Berechnung der Abschmelzfront notwendig ist.

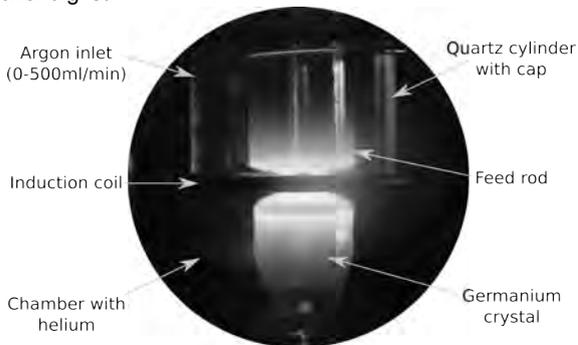


Abb. 1: Züchtungsaufbau mit gleichzeitigem Einsatz von Helium und Argon zum Stabilisieren des Kristallwachstums

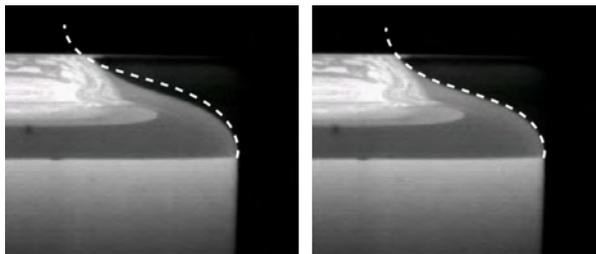


Abb. 2: Vergleich der Lösung der Laplace-Young Gleichung mit dem Experiment für Silizium. (links) Ohne Berücksichtigung des elektromagnetischen Druckes und (rechts) mit elektromagnetischem Druck für einen Wachstumswinkel von 11°.

Mit diesem Modell wurde der Einfluss der Induktorparameter auf den Prozess untersucht. Berechnungen der Schmelzenbewegung zeigte die Dominanz der elektromagnetisch getriebenen Strömung gegenüber der Auftriebs- und Marangoni-Strömung. Der Einfluss der Rotation auf die Schmelzenbewegung war klein, was mit den experimentellen Beobachtungen übereinstimmt.

Im Rahmen der Arbeit wurde das Floating-Zone Modell an den Pedestal Prozess angepasst. Damit ließen sich gute Übereinstimmungen zu den experimentell bestimmten Abschmelz- und Kristallisationsphasengrenzen erhalten. Des Weiteren konnten die qualitativen Voraussagen des Modells benutzt werden, um das Experiment zu verbessern und insbesondere das Einfrieren zu reduzieren.

Die Berechnungen der Laplace-Young Gleichung wurden mit Fotos vom Floating-Zone Prozess verglichen, dabei konnte gezeigt werden, dass sowohl der elektromagnetische Druck als auch der Wachstumswinkel berücksichtigt werden müssen (vgl. Abb. 2). Für Germanium wurde ein Optimierungsalgorithmus benutzt, um die Lösung an die Messwerte anzupassen. Durch die Schwankungen des Kristallradius ist die Annahme von Rotationssymmetrie und stationärem Verhalten nicht mehr erfüllt.

Weiterhin wurden direkte Messungen des Wachstumswinkels durchgeführt, dazu wurden hochaufgelöste Fotos der Schmelzzone ausgewertet. Der gemessene Wachstumswinkel von  $11^\circ \pm 2^\circ$  für Silizium und  $14^\circ \pm 6^\circ$  für Germanium stehen in guter Übereinstimmung mit den Literaturwerten, die durch verschiedene andere Methode erhalten wurden.

Name	Michael Wünscher
Geburtsdatum	23.01.1981
Geburtsort	Berlin
1993 – 2000	Gauß-Gymnasium Berlin
2001 – 2007	Studium der Physik an der TU-Berlin mit Abschluss Diplom-Physiker
2007 – 2011	Doktorand in der Gruppe „Silizium & Germanium“ am Leibniz-Institut für Kristallzüchtung (IKZ)
seit 2011	Postdoc am Leibniz-Institut für Kristallzüchtung (IKZ)

## 28 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.

### 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

### Stellvertretender Vorsitzender

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: frank@ikz-berlin.de

### Schatzmeister

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

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](http://www.dgkk.de)). Die Arbeit der Gesellschaft ist in Arbeitskreisen organisiert.

### 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  
Solarworld Innovations GmbH  
Berthelsdorfer Straße 111 A  
09599 Freiberg  
Tel.: 03731 / 301-4387  
Fax: 03731 / 301-1690  
E-Mail: 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 0100 1043 0619  
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 2011  
ISSN 2193-374X (Druck)  
**ISSN 2193-3758 (Internet)**  
Gesetzt mit pdfL<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X.

### Nachrichten der DGKK, Stellenangebote, Stellengesuche:

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

### Internetauftritt:

Dr. Andreas Danilewsky  
Kristallographisches Institut  
Albert-Ludwigs-Universität  
Tel.: 0761 / 203 6450  
Fax: 0761 / 203 6434  
E-Mail: a.danilewsky@krist.uni-freiburg.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.

## Arbeitskreise

### 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

#### „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

#### „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

#### „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

#### „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: miller@ikz-berlin.de

### 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

### 2012

#### 7. - 9. März 2012

*Deutsche Kristallzüchtungstagung (DKT)*

#### **Freiberg**

*Leitung:* Prof. Dr. Dirk Meyer (TU Bergakademie Freiberg),  
 Dr. Ulrike Wunderwald (Fraunhofer THM)

#### 17. - 20. Juni 2012

*European Conference on Crystal Growth (ECCG-4)*

#### **Glasgow, UK**

*Leitung:* Prof. Alistair Florence (University of Strathclyde),  
 Prof. Kevin Roberts (University of Leeds)  
<http://eccg4.org>

#### 27. August - 1. September 2012

*Romanian Conference on Advanced Materials (ROCAM)*

<http://rocam.unibuc.ro>

and

*Summer School on Crystal Growth*

<http://rocam.unibuc.ro/intschool/index.html>

#### **Brasov, Romania**

*Leitung:* Prof. Horia Alexandru (Universitatea din București)

#### 10. - 11. Oktober 2012

*Workshop AK „Herstellung und Charakterisierung von massiven Halbleitern“*

#### **Freiberg**

#### 28. - 31. Oktober 2012

*7th International Workshop on Modeling in Crystal Growth*

#### **Taipeh, Taiwan**

*Leitung:* Prof. Chung-Wen Lan (National Taiwan University)  
<http://iwmcg7.ntu.edu.tw/>

#### 19. - 21. November 2012

*gemeinsamer Workshop: AK „Angewandte Simulation in der Kristallzüchtung“ und AK „Kinetik“*

#### **Potsdam**

### 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>

### 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

DGK-Mitteilungsblatt Nr. 93 / 2011

# linn High Therm

info@linn.de

www.linn.de



## 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. GaIn. 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:  $\varnothing = 0,2 - 2,0 \text{ mm}$ ,  $l_{\text{max}} = 250 \text{ mm}$ . 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.



## Induction heating

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

**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.**

