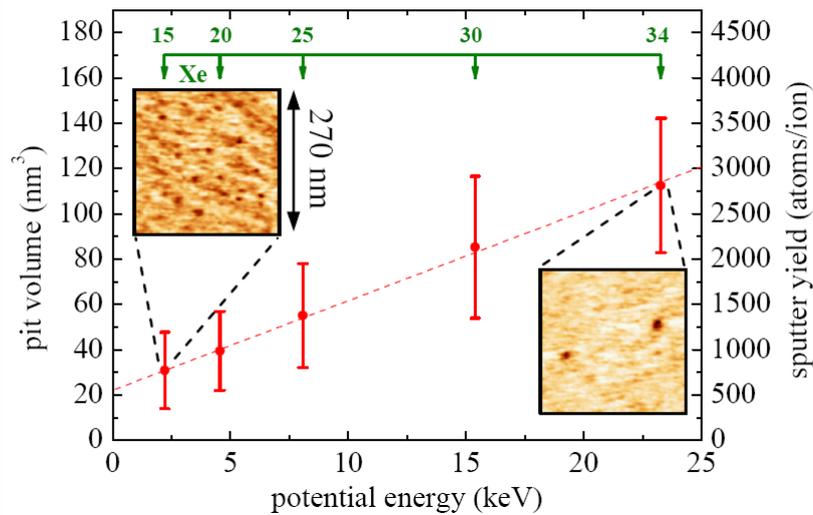
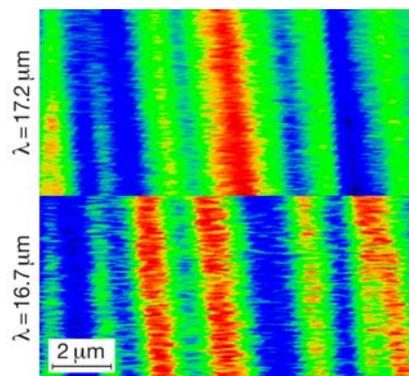


Berichtszeitraum	2008
Programm	<p data-bbox="470 271 730 304">Neue Materialien</p> <p data-bbox="470 338 624 371">Zielstellung</p> <p data-bbox="470 398 1406 857">Das Programm umfasst die FE-Vorhaben des FZD, die auf die Entwicklung und Optimierung neuer Materialien zielen. Ausgehend von der Tatsache, dass sowohl Strukturen auf der Nanometerskala als auch starke elektromagnetische Felder die optischen, elektronischen, magnetischen und mechanischen Eigenschaften kondensierter Materie entscheidend beeinflussen, besteht das Ziel der Arbeiten darin, wesentliche Beiträge zur Aufklärung der jeweiligen Strukturen und der darauf beruhenden Eigenschaften der Materie zu liefern. Dafür bestehen mit den im FZD verfügbaren Methoden - Untersuchung und Veränderung von Materialien mit Ionenstrahlen, Erforschung und Beeinflussung der physikalischen Eigenschaften von Materie in Magnetfeldern, Forschung mit Infrarotstrahlung an der Strahlungsquelle ELBE sowie künftig einem Hochleistungslaser als innovativem Treiber brillanter Teilchen- und Photonenstrahlen - ausgezeichnete Voraussetzungen. Die einzelnen Vorhaben sind jedoch nicht nur auf den unmittelbaren Erkenntnisgewinn, sondern letztlich auf eine möglichst weitgehende praktische Nutzung der Forschungsergebnisse gerichtet.</p> <p data-bbox="470 891 762 925">Wichtigste Ergebnisse</p> <p data-bbox="470 952 1106 985">Materialforschung mit Ionen und Halbleiterphysik</p> <p data-bbox="470 1012 1406 1160">Die Elektronenbeweglichkeit in ZnO:Al-Schichten, die durch reaktives Magnetron-Sputtern abgeschieden wurden, wurde durch eine neuartige Prozessführung auf Werte optimiert, die mit den Bestwerten aus anderen Verfahren, die bezüglich Skalierbarkeit und Kosteneffizienz deutliche Nachteile aufweisen, konkurrieren können /1/.</p> <p data-bbox="470 1193 1406 1408">Auf KBr erzeugen hochgeladene Ionen keine Erhebungen, sondern monoatomar tiefe Löcher. Solche Strukturen wurden bisher nur mit Elektronen erzeugt. Auch für diese Strukturen findet man eine Schwelle für die potenzielle Energie. Diese Schwelle kann damit erklärt werden, dass eine minimale Anzahl von Defekten durch die potenzielle Energie der Ionen erzeugt werden muss, damit die Desorption der Atome aus der Oberfläche initiiert wird. Hierfür wurde ein atomistisches Modell der Defekterzeugung und Strukturentstehung entwickelt /2/.</p> <p data-bbox="470 1442 1406 1532">Es wurde erstmalig gezeigt, dass mittels fokussierter Ionenbestrahlung ferromagnetische Bereiche mit Abmessungen kleiner als 100 nm innerhalb einer paramagnetischen Matrix erzeugt werden können /3/.</p> <p data-bbox="470 1565 1406 1744">An Tunnelkontakten zwischen Co-dotiertem ZnO und Co als ferromagnetischen Elektroden, die durch gepulste Laserabscheidung hergestellt wurden, wurde bei einer Temperatur von 5 K ein Tunnel-Magnetwiderstandsverhalten nachgewiesen. Spinpolarisierte Elektronen wurden aus der Co-dotierten ZnO-Schicht in eine dünne Schicht aus kristallinem Al₂O₃ injiziert und durch eine amorphe Al₂O₃-Barriere transportiert /4/.</p>



Die Dissipation der potenziellen Energie langsamer hochgeladener Ionen führt auf bestimmten Ionenkristallen (hier: Xe-Ionenbeschuss von KBr bei einer kinetischen Energie von 39 keV und Ladungszuständen zwischen 15 und 34) zu Erosionsausbeuten von einigen Tausend pro Ion (rechte Skala) und zur Ausbildung von Nano-Löchern einatomarer Tiefe (linke Skala). Ursache sind elektronische Defekte, die innerhalb der Eindringtiefe der Ionen (ca. 10 nm) erzeugt wurden, zur Oberfläche diffundieren und dort zur Desorption führen /2/.

Mittels optischer Nahfeldmikroskopie unter Verwendung der intensiven Strahlung des Freie-Elektronen-Lasers (FEL) gelang es, ferroelektrische Domänen in Bariumtitanat mit höchster Ortsauflösung abzubilden. Hierzu wurde die FEL-Strahlung auf eine Metallspitze fokussiert, die in nächster Nähe über die Probenoberfläche gerastert wurde, und das gestreute optische Signal vermessen. Dabei führten Anisotropien der dielektrischen Funktion von Bariumtitanat in der Nähe einer Phononresonanz zu einem orientierungsabhängigen Kontrast. Die Abbildung zeigt Falschfarbendarstellungen dieser Domänen. Die Domänen sind als Streifen klar erkennbar. Diese zeigen eine Kontrastumkehr, falls die Wellenlänge des FEL über eine Vibrationsresonanz des Kristalls verfahren wird /5/.



Falschfarbendarstellungen elektrischer Domänen auf der Oberfläche eines Bariumtitanat-Kristalls. Das obere Bild wurde bei einer Wellenlänge von 17,2 μm gemessen, das untere bei 16,7 μm . Rot bedeutet ein starkes Signal. Die Inversion des Farbkontrasts jedes Streifens vom oberen zum unteren Bild ist klar erkennbar. Die Ortsauflösung von ca. 150 nm ist um zwei Größenordnungen kleiner als die Wellenlänge, was nur bei der Nahfeldmikroskopie möglich ist.

Auf dem Gebiet der Silizium-basierten Lichtemitter wurde ein entscheidender Fortschritt erzielt: Durch Verwendung einer SiON-Schutzschicht gelang es, die Stabilität von Seltenerd-dotierten SiO₂ Lichtemittern um viele Größenordnungen zu verbessern /6/.

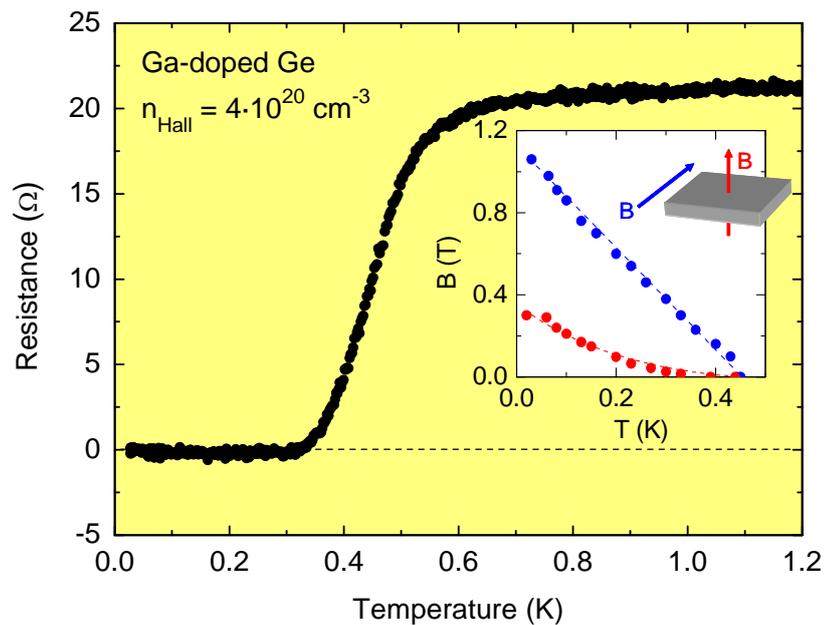
Neue, aussichtreiche Prozesse für zukünftige Mikroelektronik-Anwendungen wurden demonstriert: Mittels Blitzlampenausheilung wurde erstmals ein vergrabener aufgeschmolzener Bereich in Si-Wafern erzeugt /7/. Dies gelang durch lokale Schmelzpunktniedrigung nach Germanium-Implantation. Auf dem Gebiet der SIMOX (Separation by Implanted Oxygen)-Technologie wurde durch kombinierte Wasserstoff-Helium-Implantation eine Getterung von Sauerstoff erreicht /8/.

Forschung bei hohen Magnetfeldern

An dieser Stelle sollen ausgewählte Ergebnisse auf dem Gebiet der Supraleitung in dotierten Halbleitern vorgestellt werden. Eine der großen Überraschungen der Festkörperphysik war die Entdeckung, dass auch Materialien mit sehr geringer Ladungsträgerdichte, wie z. B. dotierte Halbleiter, supraleitend werden können. Um ein tieferes Verständnis der Mechanismen der Cooper-Paarbildung in dotierten elementaren Halbleitern zu erlangen, haben das Ionenstrahlzentrum und das Hochfeld-Magnetlabor Dresden (HLD) des FZD sowie externe Partner (darunter die Universitäten Bayreuth, Heidelberg und Leipzig, das GeoForschungsZentrum Potsdam und die ESRF in Grenoble) gemeinsame Untersuchungen an stark dotierten Halbleitern bis zu sehr tiefen Temperaturen durchgeführt. Dabei wurde gezielt nach Supraleitung in neuen Materialien gesucht. Erstmals wurde dabei Germanium verwendet.

Projektpartner an der Universität Bayreuth haben mit einer der weltweit stärksten Hochdruckpressen isopenangereicherte Bor-dotierte Diamanten hergestellt, die am HLD anschließend mittels elektrischer Leitfähigkeits- und Wärmekapazitätsuntersuchungen als Supraleiter mit Übergangstemperaturen von etwa 2 K identifiziert wurden. Es wurde dabei ein deutlicher Isotopeneffekt beobachtet, der auf einen Elektron-Phonon-Kopplungsmechanismus bei der Cooper-Paarbildung hindeutet /9/. Mittels Transmissions-Elektronen-Mikroskopie wurde an polykristallinen Proben festgestellt, dass die Supraleitung in Bor-dotierten Diamanten wahrscheinlich auf amorphe Bor-reiche intergranulare Bereiche im Gefüge der Diamant-Mikrokristallite zurückzuführen ist /10/. Diese Beobachtung deckt sich mit dem Ergebnis einer begleitenden Untersuchung, dass ionenstrahlimplantierte Diamanten mit homogener Bor-Atomverteilung keine Supraleitung ausbilden /11/.

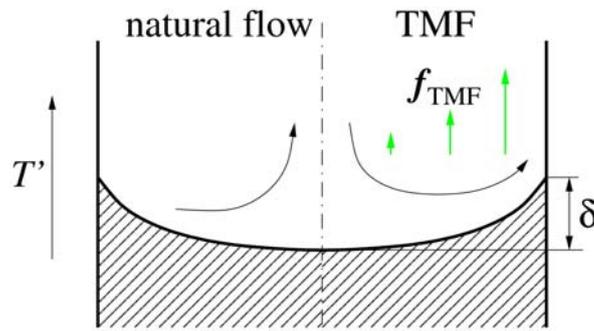
Durch Implantation einer hohen Dosis von Gallium-Atomen in Germanium gelang es erstmals, Supraleitung in diesem Halbleiter zu realisieren /12/. Dazu müssen jedoch die durch die Implantation verursachten Gitterfehler thermisch (mittels intensiver, nur Millisekunden langer, von Blitzlampen erzeugter Lichtblitze) ausgeheilt werden. Supraleitung bildet sich dann in einer hauchdünnen (~ 60 nm dicken) Gallium-dotierten Germaniumschicht aus. Diese Geometrie führt zu einem stark anisotropen und sehr hohen kritischen Magnetfeld (Inset in der Abbildung). Die supraleitende Übergangstemperatur kann mittels der Einstellung der Ladungsträgerdichte gezielt beeinflusst werden.



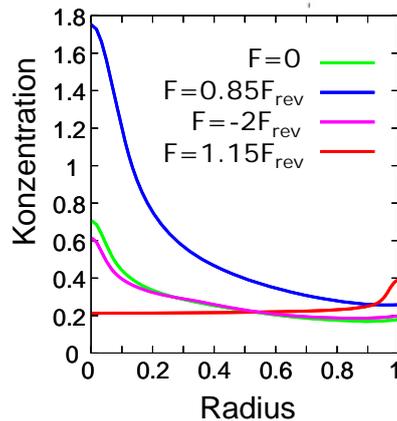
Supraleitender Übergang im elektrischen Widerstand von Gallium-dotiertem Germanium mit einer Ladungsträgerdichte von $4 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}$. Das kritische Feld (Inset) in paralleler Orientierung zur Gallium-dotierten Schicht ist beträchtlich größer (blau) als in senkrechter Orientierung (rot).

Magnetohydrodynamik

Ein interessanter Beitrag zur Forschung im Programm Neue Materialien besteht in der gezielten Strömungsumkehr, hervorgerufen durch ein magnetisches Wanderfeld, in der Kristallzüchtung: Die Vertical-Gradient-Freeze (VGF)-Kristallzüchtung hat sich für bestimmte Halbleiter wie GaAs auch industriell zunehmend durchgesetzt. Für wachsende Kristalldurchmesser und höhere Züchtungsgeschwindigkeiten werden aber sowohl die Durchbiegung der Phasengrenze als auch die strömungsbedingte Ansammlung von Dotierstoffen auf der Achse inakzeptabel groß. Eine attraktive Möglichkeit, beide Effekte zu kontrollieren, besteht im Einsatz eines magnetischen Wanderfeldes (TMF), das der Auftriebsströmung entgegen wirkt (siehe oberes Bild). Die Stärke F_{rev} des TMF, bei dem die Auftriebsströmung nahezu ausbalanciert wird und vor der Erstarrungsfront nur noch geringe Strömung besteht, wurde numerisch berechnet [13]. Ohne TMF bzw. mit einem die Auftriebsströmung verstärkenden TMF ($F = -2F_{\text{rev}}$) bildet sich strömungsbedingt ein deutlicher Konzentrationspeak auf der Achse aus (siehe unteres Bild). Wird der Auftriebströmung zu wenig entgegen gewirkt ($F = 0.85F_{\text{rev}}$), wird der Peak sogar noch verstärkt, da die reduzierte Strömung schlechteres Mischen des Dotierstoffs bedeutet. Erst die Dominanz der TMF-Strömung ($F = 1.15F_{\text{rev}}$) liefert eine nahezu homogene Dotierstoffverteilung. Ein TMF kann folglich die gewünschten Effekte erzielen, muss aber genau auf die Züchtungsparameter eingestellt werden.



Auftriebströmung (links) und durch ein magnetisches Wanderfeld (TMF) erzeugte Strömung (rechts) an der konvexen Phasengrenze einer VGF-Kristallzuchtung



Radiale Si-Verteilung in einem mit 12 mm/h gezogenen Ge-Kristall für verschiedene Stärken des TMF.

- [1] S. Cornelius et al., Applied Physics Letters 94 (2009) 042103
- [2] R. Heller et al., Physical Review Letters 101 (2008) 096102
- [3] E. Menendez et al., Small 5 (2009) 229
- [4] Q. Y. Xu et al., Physical Review Letters 101 (2008) 076601
- [5] S. C. Kehr et al., Physical Review Letters 100 (2008) 256403
- [6] J. M. Sun et al., Applied Physics Letters 92 (2008) 071103
- [7] M. Voelskow et al., Applied Physics Letters 93 (2008) 151903
- [8] X. Ou et al., Applied Physics Letters 93 (2008) 161907
- [9] N. Dubrovinskaia et al., Applied Physics Letters 92 (2008) 132506
- [10] N. Dubrovinskaia et al., Proc. Natl. Acad. Sci. 105 (2008) 11619
- [11] V. Heera et al., Diamond and Related Materials 17 (2008) 383
- [12] T. Herrmannsdörfer et al., zur Veröffentlichung eingereicht
- [13] I. Grants, G. Gerbeth, Journal of Crystal Growth 310 (2008) 3699

Zusammenarbeit mit externen Partnern (Auswahl)

Materialforschung mit Ionen und Halbleiterphysik

TU Dresden (gem. DFG-Projekt, gem. Publikationen)
 IFW Dresden (gem. Publikationen)
 Qimonda AG, Dresden (gem. BMBF-Projekt, Industrieservice)
 AMD Saxony, Dresden (Industrieservice)
 Universität Leipzig (gem. Publikationen)
 Universität Halle-Wittenberg (EPOS-Projekt)
 TU Chemnitz (gem. DFG-Projekt)
 TU Ilmenau (gem. EU-Projekt und Publikationen)
 Advanced Light Source, Berkeley, USA (Messzeit, gem. Publikationen)
 Swiss Light Source, Paul-Scherrer Institut, Villigen, Schweiz (Messzeit, gem. Publikationen)
 TU Wien, Österreich (gem. EU-Projekt, gem. Publikationen, Nutzung des Ionenstrahlzentrums)
 University of Linköping, Schweden (gem. EU-Projekt, FZD Fellow)
 University of Sydney, Australien (Wissenschaftleraustausch, FZD-Fellow)

Universidad Autonoma de Madrid, Spanien (gem. EU-Projekt, gem. Publikationen)
 Universidad Autonoma de Barcelona, Spanien (gem. Publikationen, Nutzer des Ionenstrahlzentrums)
 Universität Oslo, Norwegen (gem. Publikationen)
 Pacific Northwest National Laboratory, Richland (WA), USA (gem. Publikationen)
 National Research Council, Ottawa, Canada (gem. Publikationen, FZD-Fellow)
 IMEC, Leuven, Belgien (gem. Publikationen)

Hochfeld-Magnetlabor Dresden

TU Dresden (gem. Publikationen)
 IFW Dresden (gem. DFG-Projekt, gem. Publikationen)
 MPI für Chemische Physik fester Stoffe, Dresden (gem. Publikationen)
 IPF Dresden (gem. Publikationen)
 Fraunhofer-Institut IWS, Dresden (gem. SMWK-Projekt)
 Universität (TH) und Forschungszentrum Karlsruhe (gem. Publikationen)
 Hiroshima University, Japan (gem. Publikationen)
 NHMFL, Tallahassee und Los Alamos, USA (gem. Publikationen)
 Argonne National Laboratory, Argonne, USA (gem. Publikationen)
 Universität Bayreuth (gem. Publikationen)
 Universität Heidelberg (gem. Publikationen)
 Ames Laboratory, Ames, USA (gem. Publikationen)
 CNRS-LNCMP, Toulouse, Frankreich (gem. EU-Projekte)
 CNRS-GHMFL, Grenoble, Frankreich (gem. EU-Projekte)
 HFML, Radboud University, Nijmegen, Niederlande (gem. EU-Projekte)
 University of Oxford, UK (gem. EU-Projekte)

Magnetohydrodynamik

TU Hannover
 TU Ilmenau
 RWTH Aachen
 Institut für Kristallzüchtung, Berlin
 Weierstraß-Institut für Angewandte Stochastik, Berlin
 Universität + Fraunhofer-Institut für Integrierte Systeme und Bauelementetechnologie, Erlangen (mit allen gem. Projekte und Publikationen)

Statistische Angaben

Mitarbeiter (Planstellen)			
Gesamt	118,8	Wissenschaftler	50,2
Annexpersonal (Personenjahreskapazität)*			
Postdoc	6,1	Doktoranden**	11,9
Gastwissenschaftler	6,3		
Drittmittelfinanziertes Personal (Personenjahreskapazität)*			
Wissenschaftler	25,3	Technisches Personal	6,7
Doktoranden	12,9	Gastwissenschaftler	4,0

* Personenjahre mit Berücksichtigung der VZÄ (Personenjahreskapazität)
 ** Doktoranden werden mit 0,5 Stellen berücksichtigt.