

## Struktur der Materie 2007

### Zielstellung

Das Programm umfasste im Jahr 2007 die Bereiche „Materialforschung mit Ionen“, „Halbleiterphysik“, „Forschung bei hohen Magnetfeldern“ und „Subatomare Physik“. Es widmet sich einerseits der Entwicklung neuer Materialien, vor allem nanostrukturierter Systeme mit besonderen mechanischen, elektrischen, optischen und magnetischen Eigenschaften, und andererseits dem besseren Verständnis von Atomkernen und deren Bestandteilen, insbesondere der Synthese der chemischen Elemente im Kosmos. Das Programm stützt sich stark auf die großen Forschungsanlagen des FZD: Strahlungsquelle ELBE, Ionenstrahlzentrum, Hochfeldlabor-Magnetlabor Dresden und die Rossendorf Beamline an der ESRF Grenoble.

### Wichtigste Ergebnisse

#### Materialforschung mit Ionen und Halbleiterphysik

Die Umsetzung der potentiellen Energie langsamer hochgeladener Argonionen (Ladungszustände  $q \leq 10$ ) an Festkörper-Oberflächen wurde erstmalig vollständig durch Wärmeeintrag ( $\sim 90\%$ ) und Elektronenemission ( $\sim 10\%$ ) bilanziert [1].

Im Gegensatz zum bisherigen Bild eines Wärmepulses wird der Ioneninduzierte Abbau innerer Spannungen bei der Abscheidung von harten C- und cBN-Schichten quantitativ durch ein kollisionsäres Modell erklärt [2].

Die "Targetvergiftung" bei reaktivem Magnetron-Sputtern variiert entsprechend der Bilanz von Reaktivgas-Adsorption und Ionenbeschuss stark entlang der Target-Oberfläche [3].

Vortex-Kerne in magnetischen Mikrostrukturen können durch Beobachtung ihres dynamischen Verhaltens charakterisiert werden. Vortices können an eingebrachten Defekten eingefangen werden [4, 5].

Durch stehende Plasmon-Polariton-Oberflächenwellen in einem metallischen Substrat können regelmäßige Wellen- und Punktstrukturen in einer aufgetragenen Polymerschicht mit Periodizitäten von 5-10  $\mu\text{m}$  erzeugt werden [6]. Auf Ionen erzeugte Oberflächen-Wellenstrukturen aufgetragene magnetische Exchange-Bias-Schichtsysteme reproduzieren die Welligkeit des Substrats und zeigen einen signifikanten Beitrag von Stufenkanten-Atomen zur magnetischen Anisotropie [7].

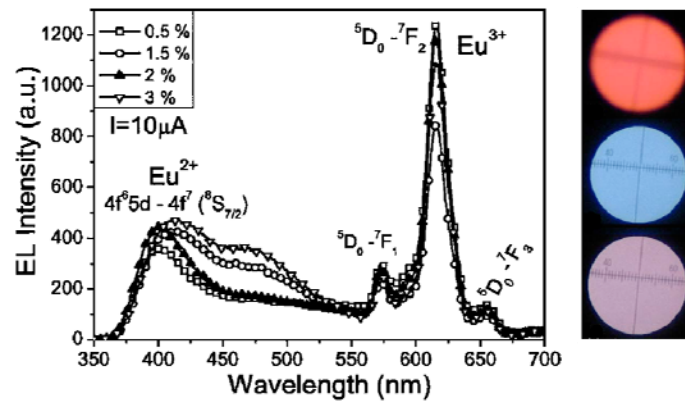
In ZnO kann die Präzipitation implantierter Eisen-Dotieratome durch vorheriges Hochtemperatur ( $1000^\circ\text{C}$ )-Tempern in Sauerstoff verhindert werden. Der resultierende schwache Ferromagnetismus kann der Wechselwirkung isolierter Eisenionen zugeschrieben werden [8]. Weiterhin wurde gefunden, dass in ZnO die Emission von Ladungsträgern aus tiefen Elektronen-Fallen der Meyer-Neldel-Regel mit einer isokinetischen Temperatur von 226 K [9] folgt.

Die Intersubband-Dynamik in Quantentrögen aus verspannten InGaAs/AlAs/AlAsSb-Schichtsystemen zeigt, dass die Seitentäler im Fall von Einzel-Quantentrögen keinen Einfluss auf die Relaxation haben, während für Doppel-Quantentröge eine erhöhte Absorption durch Besetzung des zweiten Subbandes beobachtet wird [10].

Bei Femtosekunden-Anregung erzeugt resonanzverstärkte nichtlineare Absorption zwischen Leitfähigkeits-Subbändern in InGaAs/AlGaAs-Quantentrögen einen Zwei-Photonen-Photostrom, mit dessen Hilfe Intersubband-Relaxations- und -Dephasing-Zeiten bestimmt werden können [11].

Auf der Basis von stickstoffimplantiertem GaAs wurde eine neuartige photoleitfähige, nicht-resonante Antenne entwickelt, mit der fokussierte und unfokussierte Terahertz-Strahlung nachgewiesen werden kann [12].

Eine lichtemittierende Diode aus thermisch gewachsenem und mit einer transparenten Elektrode versehenem Oxid auf Silizium kann durch Eu-Ionenimplantation so eingestellt werden, dass sich das Leuchten durch Variation der angelegten Spannung zwischen UV und Rot verschiebt. Eine besonders intensive Elektrolumineszenz im UV-Bereich erhält man durch Gd-Dotierung und F-Koimplantation [13].



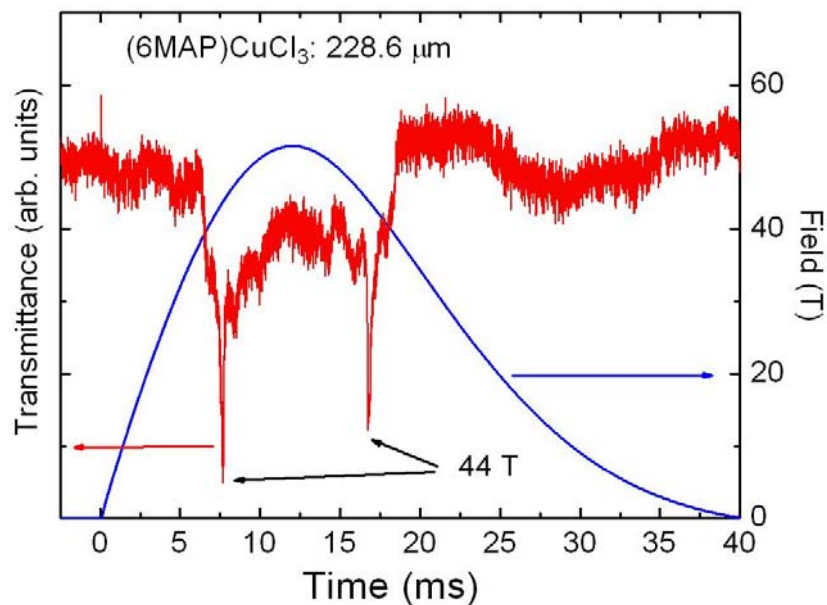
Links: Elektrolumineszenz-Spektren von Eu-dotierten SiO<sub>2</sub>-MOSLED's mit 200 μm Durchmesser, bei verschiedenen Eu-Konzentrationen und einem Anregungsstrom von 10 μA. Rechts: Photographien bei verschiedenen Anregungsströmen (oben: 20 μA; Mitte: 1 mA; unten: 2.5 mA) für eine Eu-Konzentration von 0,5 %.

Das hohe Niveau der Publikationstätigkeit in diesem Programmbereich wurde mit insgesamt 154 Publikationen in referierten Fachzeitschriften (darunter 1× Nature Nanotechnology, 2× Physical Review Letters, 16× Applied Physics Letters, 8× Physical Review B und 15× Journal of Applied Physics) im Berichtszeitraum bestätigt.

### Forschung bei hohen Magnetfeldern

Im Rahmen einer Kooperation des Hochfeld-Magnetlabors Dresden (HLD) mit Arbeitsgruppen aus Genf, Braunschweig, Osaka und Grenoble gelang 2007 der erste experimentelle Nachweis des Fulde-Effekts in einem organischen Supraleiter. Prof. Peter Fulde vom Max-Planck-Institut für Physik komplexer Systeme in Dresden veröffentlichte im Jahr 1964 zusammen mit Dr. Richard Ferrell eine Arbeit über einen besonderen Zustand supraleitender Materialien. Etwa zeitgleich wurde dieser Zustand auch von zwei weiteren Forschern vorhergesagt, weshalb man heute vom Fulde-Ferrell-Larkin-Ovchinnikov-Effekt (FFLO) der Supraleitung spricht. Der Zustand der Supraleitung wird normalerweise durch ein hohes Magnetfeld zerstört, d. h. jedes supraleitende Material wird jenseits eines kritischen Magnetfelds zu einem Normalleiter. Legt man jedoch an bestimmte Materialien ein hohes Magnetfeld an, so tritt zwischen Supraleitung und Normalleitung ein neuer Zustand auf. Ein Teil des Materials hält hierbei die Supraleitung fest, während der andere Teil des Materials örtlich normal leitend wird. Dieser Zustand kann bevorzugt in Materialien auftreten, die auf der Nanometerskala aus leitfähigen und isolierenden Schichten aufgebaut sind. Prof. Peter Fulde beschrieb dies 1964 mit einer räumlich periodischen Modulation des supraleitenden Zustands. Die Experimente wurden am Hochfeldlabor in Grenoble in statischen Feldern unter Beteiligung von Forschern der Universitäten Genf, TU Braunschweig, TU Dresden und Osaka durchgeführt und inzwischen veröffentlicht [14].

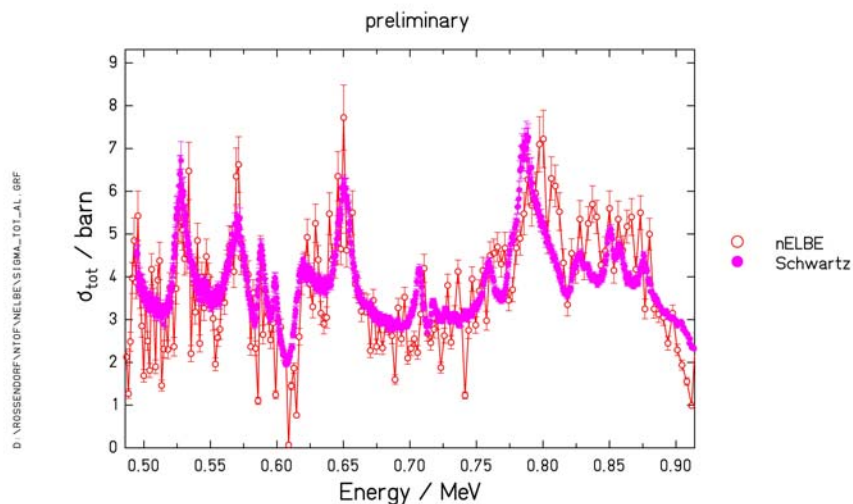
Eine weitere spektakuläre Beobachtung gelang durch die erstmalige erfolgreiche Terahertz-Elektronenspinresonanz (ESR)-Spektroskopie in gepulsten Magnetfeldern. Dadurch sind im HLD ESR-Messungen in einem einmalig großen Frequenz- und Magnetfeldbereich möglich und für interne und externe Forschungsvorhaben nutzbar. Die ESR ist eine hervorragende Methode zur Untersuchung elementarer Anregungen in magnetischen Materialien. Dabei wird durch die Einstrahlung elektromagnetischer Strahlung eine resonante Anregung des Elektronenspins detektiert. Bisher wurde dazu Strahlung im GHz-Bereich bei Magnetfeldern von wenigen Tesla benutzt. Mit den neuen Freielektronen-Lasern an ELBE stehen seit kurzem sehr leistungsstarke Strahlungsquellen (bei mittleren Leistungen von einigen Watt) im Wellenlängenbereich von 4-230 μm zur Verfügung. Dies entspricht etwa einem Frequenzbereich von 1,3-70 THz. Durch die Verbindung mit den gepulsten Magneten des HLD und einem jüngst fertig gestellten ESR-Messaufbau wurden weltweit einmalige experimentelle Möglichkeiten zur Messung der ESR geschaffen. Eine erste erfolgreiche Testmessung bei 1,3 THz an der Substanz (6MAP)CuCl<sub>3</sub>, die ungepaarte Kupferspins mit der Quantenzahl  $S = 1/2$  enthält, zeigt die Abbildung.



Hier ist neben dem zeitlichen Verlauf des Magnetfelds bei einem 52 Tesla-Puls die gleichzeitig durch die Probe transmittierte Lichtleistung dargestellt. Deutlich sind bei 44 Tesla, sowohl bei ansteigendem als auch bei fallendem Feld, die ESR-Linien zu erkennen.

### Subatomare Physik

Mit dem ersten Elektronenstrahl der neuen supraleitenden HF-Gun [15] als primäre Quelle für die weitere Beschleunigung in den Kavitäten von ELBE im November 2007 wurde die Voraussetzung für deutlich verbesserte Experimentiermöglichkeiten an nELBE geschaffen. nELBE stellt eine gepulste Photonen-induzierte Neutronenquelle dar, die ihren Betrieb im November 2007 aufgenommen hat. Die folgende Abbildung zeigt ein mit dem Flüssigmetall-Photoneutronentarget gemessenes Neutronen-Flugzeit-Spektrum.



Preliminärer totaler Streuquerschnitt der Neutronen an Aluminium im Vergleich mit Daten von Experimenten am National Institute of Standards and Technology, USA

Bei nELBE handelt es sich um ein institutsübergreifendes Vorhaben (Institute für Strahlenphysik und für Sicherheitsforschung des FZD sowie TU Dresden), in dem wichtige Beiträge zur Transmutation erbracht werden. Die Expertise für die kernphysikalischen Arbeiten an nELBE ist aus den Untersuchungen zur nuklearen Astrophysik hervorgegangen. Die Untersuchungen nutzen sekundäre Bremsstrahlung von ELBE, um Reaktionen zu studieren, die für das Verständnis der Entstehung der

chemischen Elemente im Kosmos wichtig sind. Dabei werden ausgewählte Reaktionen von Atomkernen mit Photonen untersucht. Das Verhalten von Bestandteilen von Atomkernen durch das Studium von emittierten virtuellen Photonen wird dagegen mit dem HADES-Detektor an der GSI Darmstadt untersucht. Hier ist die Frage zu klären, wie die Kernbestandteile zu ihren spezifischen Eigenschaften, u. a. deren Massen, kommen. Wichtige instrumentelle Beiträge zu HADES und zum NeuLAND-Projekt sind durch den geplanten Einsatz im Rahmen von FAIR motiviert. Die Forschung zeichnet sich durch eine sehr enge Zusammenarbeit von Theorie und Experiment aus.

- [1] D. Kost et al., Physical Review Letters 98 (2007) 225503
- [2] B. Abendroth et al., Applied Physics Letters 90 (2007)181910
- [3] D. Güttler et al., Applied Physics Letters 90 (2007) 263502
- [4] K. Küpper et al., Physical Review Letter 99 (2007) 167202
- [5] K. Kuepper et al., Applied Physics Letters 90 (2007) 062506
- [6] L. Röntzsch et al., Applied Physics Letters 90 (2007) 044105
- [7] O. Liedke et al., Physical Review B 75 (2007) 220407
- [8] K. Potzger et al., Applied Physics Letters 91 (2007) 062107
- [9] H. Schmidt et al., Applied Physics Letters 91 (2007) 232110
- [10] C. Villas-Boas-Grimm et al., Applied Physics Letters 91 (2007)191121
- [11] H. Schneider et al., Applied Physics Letters 91 (2007) 191116
- [12] F. Peter et al., Applied Physics Letters 91 (2007) 081109
- [13] S. Prucnal et al., Applied Physics Letters 90 (2007)181121; ibid. 91 (2007) 181107
- [14] R. Lortz et al., Physical Review Letters 99 (2007) 187002
- [15] A. Arnold et al., Nuclear Instruments and Methods A 577 (2007) 440

**Redaktion: Gudrun Zwicker (Vorstandsreferentin)**  
**g.zwicker@fzd.de**