

Das Institut für Festkörperphysik besteht aus acht Arbeitsgruppen, die sich einem breiten Spektrum festkörperphysikalischer Fragestellungen widmen. Zu den Forschungsgebieten gehören das epitaktische Wachstum von Halbleiterhetero- und Nanostrukturen, die Erforschung neuer Materialien wie Kohlenstoff-Nanoröhren und Graphen, sowie die Entwicklung nanophotonischer und elektronischer Bauelemente und Systeme. Ein weiterer Schwerpunkt ist die elektrische, optische und strukturelle Charakterisierung und die

Entwicklung nanoskopischer Messtechniken, wie die Rastertunnelmikroskopie, die Mikrolumineszenzspektroskopie, die optische Rasternahfeldmikroskopie und die Mikroramanspektroskopie. Die Forschungsaktivitäten am IKFP spannen eine Brücke von der Grundlagenforschung bis hin zur Anwendung und haben bereits zu mehreren erfolgreichen Ausgründungen geführt. Die Arbeiten werden unterstützt durch zentrale Einrichtungen, wie dem Nanophotonikzentrum (NPZ) und der feinmechanischen sowie der glastechnischen Werkstatt. Insgesamt forschen am IFKP ca. 150 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter (Hochschullehrerinnen und Hochschullehrer, wissenschaftliche/technische Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter und Studierende). Weiterhin gehören drei S-Professuren dem IFKP an: Prof. Dr. Norbert Esser (Leibniz-Institut für Analytische Wissenschaften), Prof. Dr. Bella Lake (Helmholtz-Zentrum Berlin für Materialien und Energie) und Prof. Dr. Martin Schell (Fraunhofer Heinrich-Hertz-Institut). Ein Großteil der Forschungsarbeiten findet im Rahmen von nationalen und internationalen Projekten und Netzwerken statt. Besonders hervorzuheben ist der hier ansässige Sonderforschungsbereich 787 „Halbleiter-Nanophotonik“. Weiterhin existieren weltweite Kooperationen mit anderen Hochschul- und Forschungsinstituten, u.a. im Rahmen des "Joint Lab GaN Optoelectronics" mit dem Ferdinand-Braun-Institut, Leibniz-Institut für Höchstfrequenztechnik. Der geschäftsführende Direktor ist Prof. Dr. Michael Kneissl (Sekretariat EW 5-1).

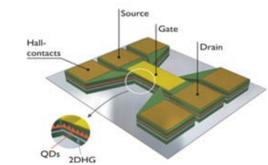
Angewandte Physik

Prof. Dr. Dieter Bimberg

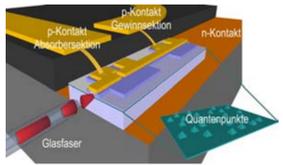
Sekretariat EW 5-2

Die faszinierende Welt der Nanostrukturen, insbesondere von Quantenpunkten in III-V-Verbindungen und deren Anwendung in der realen Welt steht im Mittelpunkt unserer Forschung. Unsere Arbeiten reichen vom Wachstum der Nanostrukturen, über experimentelle und theoretische Grundlagenforschung zu deren optischen und elektronischen Eigenschaften, bis hin zur Modellierung, Entwicklung und Erforschung zukunftsweisender und neuartiger elektronischer und photonischer Bauelemente. Auf der Grundlage unserer Simulationen stellen wir in unseren Reinsträumen neuartige Bauelemente her. Hierzu gehören Hochleistungslaser hoher Brillanz zur Materialbearbeitung, kantenemittierende modengekoppelte Laser und Verstärker, schmalbandige DFB-Laser zur optischen Nachrichtenübertragung bei hohen Bitraten ebenso wie Oberflächenemitter (VCSEL) für energieeffiziente optische Rechnerverbindungen und schließlich der Nanoflash, ein Hybrid aus DRAM und Flash. Unsere Epitaxie, Reinsträume und Höchstfrequenz-Labore für Übertragungsraten jenseits 50 Gb/s gehören zu den modernsten der Welt.

Experimentelle Techniken: MOCVD Epitaxie, Tripelkristall-Röntgendiffraktometrie, frequenz aufgelöste Autokorrelationsmessungen, Streakkammermessungen, opt. und elektr. Spektralanalyse, Bifehlerratenmessungen, Klein- und Großsignalanalyse, Nah- und Fernfeldmessungen, Rasterelektronenmikroskopie, Elektronenstrahl- und Photolithographie, zeitaufgelöste Kapazitätsspektroskopie, Kathodo- und Photolumineszenzspektroskopie, Sekundärionenmassenspektroskopie, u.v.a.



Teststruktur für eine Quantenpunkt (QD) Flashspeicherzelle, die über ein 2D-Lochgas (2DHG) beschrieben und ausgelesen werden kann.



Quantenpunktbasierter modengekoppelter Laser mit elektrischer Zuleitung und Glasfaserkopplung zur Erzeugung von Femto- und Pikosekundenpulsen.

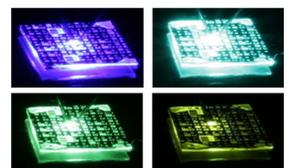
Experimentelle Nanophysik und Photonik

Prof. Dr. Michael Kneissl

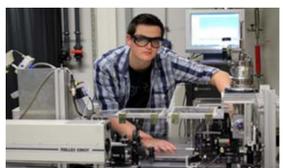
Sekretariat EW 6-1

Unsere Arbeitsgruppe befasst sich mit der Erforschung der strukturellen, optischen und elektronischen Eigenschaften von Gruppe-III-Nitrid Halbleiternanostrukturen und der Entwicklung von nanophotonischen Bauelementen. Unsere Forschungsarbeiten zielen darauf ab, die Bildung von Nanostrukturen auf atomarer Skala mittels metallorganischer Gasphasenepitaxie zu kontrollieren und damit deren optoelektronische Eigenschaften für Anwendungen in neuartigen Lichtemittern maßzuschneidern. Unser besonderes Interesse gilt der Entwicklung von AlGaIn Quantenfilm-Leuchtdioden und Lasern für den ultravioletten Spektralbereich, GaN-Quantenpunkt-basierten Einzelphotonenemittern, InGaIn Quantenfilm-Laserdioden im blauen und grünen Spektralbereich und Galliumnitrid-basierten oberflächenemittierenden Laserdioden mit externen Kavitäten. Anwendungen finden diese optoelektronischen Bauelemente u.a. bei der Desinfektion von Wasser, der Phototherapie, 3D-Druckern, in der Umweltsensorik und bei der Steuerung des Pflanzenwachstums.

Experimentelle Techniken: Epitaxie (MOVPE), UV-Photolumineszenz-, Elektrolumineszenz- und Elektrottransmissions-Spektroskopie, Photostromspektroskopie, Verstärkungsspektroskopie an Laserdioden, Hall-Effekt- und Kapazitätsspannungs-Messungen, hochauflösende Röntgenbeugung (XRD), Rasterkraft- und Rastertunnelmikroskopie (AFM, STM), XPS, Augerspektroskopie.



Violette, blaue und grüne InGaIn-Quantenfilm LEDs. Durch das Wachstum auf semipolaren Oberflächen lassen sich die Polarisationsfelder in der LED-Heterostruktur kontrollieren.



Messplatz für die UV-Photolumineszenzspektroskopie. Die AG hält momentan den Weltrekord für die kürzeste Emissionswellenlänge bei AlGaIn Quantenfilm-Lasern.

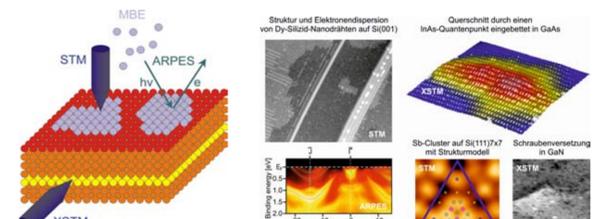
Festkörpernanoskopie

Prof. Dr. Mario Dähne

Sekretariat EW 4-1

Der Schwerpunkt unserer Forschungsarbeiten liegt bei der Untersuchung der atomaren Struktur sowie der individuellen elektronischen Eigenschaften von Nanostrukturen, Oberflächen und atomar dünnen Filmen. Von besonderem Interesse sind III-V-Halbleiter-Quantenpunkte sowie oberflächengebundene Cluster und Nanodrähte. Aktuell untersuchen wir zum Beispiel InAs- und InGaAs-Quantenpunkte eingebettet in GaAs- und GaP-Matrixmaterial, Nanostrukturen aus Nitridhalbleitern wie GaN oder InN, Nanocluster bestehend aus nur wenigen Metallatomen auf Siliziumoberflächen sowie selbstorganisiert wachsende Silizid-Nanodrähte auf Siliziumoberflächen. Ein wichtiges Ziel der Arbeiten ist es zu verstehen, wie sich die Wachstumsprozesse auf die atomare Struktur der Nanostrukturen auswirken und welche physikalischen Eigenschaften sich daraus ergeben. Die Proben stellen wir zum Teil selbst durch Epitaxie im Ultrahochvakuum her, zum Teil werden sie uns von einer Vielzahl nationaler und internationaler Kooperationspartner zur Verfügung gestellt.

Experimentelle Techniken: Rastertunnelmikroskopie an der Wachstumsfläche (STM) sowie an Querschnittsflächen (XSTM), die hierauf basierenden lokalen Spektroskopien (STS/XSTS), winkelaufgelöste Photoelektronenspektroskopie (ARPES), Beugung niederenergetischer Elektronen (LEED) sowie Molekularstrahlepitaxie (MBE).



Übersicht über die von uns verwendeten Methoden. Beispiele für aktuelle Forschungsergebnisse unserer Arbeitsgruppe.

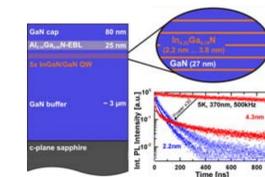
Optische Charakterisierung von Halbleitern

Prof. Dr. Axel Hoffmann

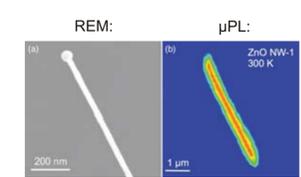
Sekretariat EW 5-1

Die Schwerpunkte der AG Hoffmann liegen auf der strukturellen und optischen Charakterisierung von Halbleitern. Zur Untersuchung kommen dabei nicht nur 3D-Halbleitersysteme, sondern auch Quantenfilme (2D), Nanodrähte (1D) und Quantenpunkte (0D). Während die Untersuchung von hochentwickelten Volumenhalbleitern und Quantenfilmen meist in direkten Industriekooperationen erfolgt (Osram, Siemens, Laytec, Hexatec, etc.), und damit Doktoranden den späteren Einstieg in eine industrielle Laufbahn erleichtert, ist die Untersuchung von ein- und nulldimensionalen Systemen mehr auf die Grundlagenforschung ausgerichtet. Zur Untersuchung kommen dabei immer weniger arsenidbasierte Strukturen, als vielmehr neuartige nitrid- und oxidbasierte Halbleitersysteme, die das Vordringen in neue Spektralbereiche für Raumtemperaturanwendungen bei gleichzeitig geringer Toxizität („green photonics“) ermöglichen. Es steht eine breite Auswahl von Austauschprogrammen mit renommierten Institutionen (Berkeley National Lab, University of Tokyo, North Carolina State University, etc.) bereits auch für Masterstudenten zur Verfügung.

Experimentelle Techniken: Verfahren wie Nano- und μ Ramanspektroskopie, μ Photolumineszenz (μ PL), zeitaufgelöste Spektroskopie (fs - ms), Pump-Probe-Techniken, Spektroskopie in Magnetfeldern / unter Druck und Photonstatistikanalysen von Einzelphotonemittern sind nur eine Auswahl aus der Vielfalt der verfügbaren Messverfahren.



Struktur einer „grünen“ LED basierend auf 2D InGaIn Quantenfilmen. Durch den quantum-confined Stark Effekt kommt es zu einer Verlängerung der Lebenszeiten.



REM Bild eines 1D ZnO Nanodrahts neben einer zugehörigen, hochauflösenden μ PL Aufnahme zwecks Untersuchung der auftretenden Kavitätseigenschaften.

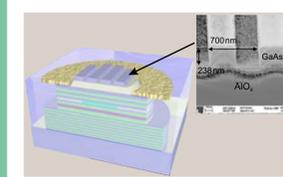
Technologie nanophotonischer Bauelemente

Prof. Dr. Werner Hofmann

Sekretariat EW 5-2

Unser Ziel ist es, Fragestellungen der Festkörperphysik im Bauelement nachzugehen, und somit Innovationen direkt zur Anwendung zu bringen. Herausforderungen stellen die technologische Umsetzung sowie das tiefe Verständnis der jeweiligen Bauelemente. Oberflächenemittierende Laser ermöglichen mit ihrer extrem kleinen Grundfläche einen sehr kompakten Aufbau, erlauben die Herstellung von Arrays und sind integrierbar mit Siliziumtechnologie. Die Verwendung von nanophotonischen Metastrukturen eröffnet neue Möglichkeiten. Eine der zentralen Fragestellungen ist, in wie weit sich nanophotonische Bauelemente herstellen lassen, die auf kleinster Fläche höchsteste Datenmengen bei niedrigstem Energieverbrauch übertragen können. Die Hochfrequenzeigenschaften können sehr genau mit Mitteln der Kleinsignalanalyse ermittelt werden. Die Eignung für Datenübertragung kann letztendlich nur das Experiment beweisen, dessen Ergebnis sowohl von den Bauelementen, als auch dem Übertragungsmedium und dem Kodierungsverfahren abhängt.

Experimentelle Techniken: Reinsträume der Klassen ISO 6 bis ISO 4, Trockenchemie (RIE, ICP, PECVD), Kontaktolithographie, Nasschemie, Metallisierung, Elektronenstrahlolithographie, Elektronenmikroskopie, automatischer Messplatz für ganze Wafer mit tausenden von Bauelementen und statistischer Auswertung, Hochfrequenzcharakterisierung, Kleinsignal (40 GHz), Großsignal (55 Gbps NRZ), ...



Nanophotonische Strukturen können bei Oberflächenemittierenden Lasern dicke Bragg-Spiegel ersetzen. Gleichzeitig lässt sich das Modenprofil beeinflussen.



Systematische Variation der Bauelemente und automatisierte Messtechnik ermöglichen es, viele Fragestellungen parallel zu untersuchen.

Neue Materialien

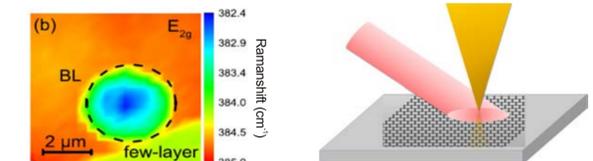
Prof. Dr. Janina Maultzsch

Sekretariat EW 5-4

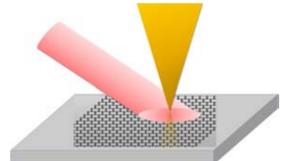
Die optischen, elektronischen und vibronischen Eigenschaften neuer Materialien wie Graphen und Kohlenstoff-Nanoröhren, Diamantoid, atomar dünne Dichalcogenide, hexagonales BN, sowie Heterostrukturen aus zweidimensionalen Materialien stehen im Fokus unserer Arbeitsgruppe. Eine zentrale Frage bei diesen freistehenden niederdimensionalen Strukturen liegt in der Wechselwirkung mit der Umgebung, wie sie in technischen Anwendungen relevant ist (Substrate, Dielektrika, Metall-Kontakte, usw.). Darüber hinaus untersuchen wir sogenannte van-der-Waals Heterostrukturen, die aus einzelnen, übereinander liegenden Schichten der genannten zweidimensionalen Materialien bestehen. Neben konventioneller optischer Spektroskopie steht uns mit der spitzverstärkten Ramanspektroskopie (TERS) eine moderne Methode zur Verfügung, die optische Spektroskopie auf der Nanometer-Skala mit Informationen über die Struktur der Probe korreliert. Über die genannten Materialien hinaus verwenden wir TERS auch zur Charakterisierung einzelner Halbleiterquantenpunkte bzw. -drähte hinsichtlich Verspannungen, Materialfluktuationen und Dotierung.

Experimentelle Techniken: Resonante Ramanspektroskopie, spitzverstärkte Ramanstreuung (TERS) mit AFM/STM, UV-Raman, Photolumineszenz

Theoretische Methoden: Dichtefunktionaltheorie, numerische Simulationen, Tight-Binding-Rechnungen



Raman-Mapping über eine zweilagige MoS₂-Schicht auf Si/SiO₂. Die gestrichelte Linie zeigt den freistehenden Teil der MoS₂-Schicht an.



Prinzip der spitzverstärkten optischen Spektroskopie: eine Metallspitze im Laserfokus verstärkt das Signal lokal und ermöglicht eine räumliche Auflösung von ~ 10 nm.

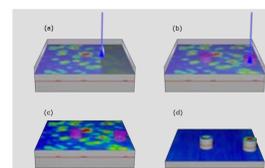
Optoelektronik und Quantenbauelemente

Prof. Dr. Stephan Reitzenstein

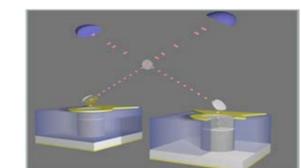
Sekretariat EW 5-3

Unser Fokus liegt in der Untersuchung grundlegender quantenoptischer Effekte in Halbleiternanostrukturen sowie in der Entwicklung von deterministischen optoelektronischen und quantenmechanischen Bauelementen. Von besonderer Bedeutung ist hierbei die Licht-Materie-Wechselwirkung von Halbleiter-Quantenpunkten mit ihrem photonischen Umfeld. Durch die Einbettung in photonische Resonatoren lassen sich die Emissionsrate und die Abstrahlcharakteristik der Quantenemitter kontrollieren. Zusammen mit dem quantenmechanischen Ursprung der Lichtemission lassen sich nicht-klassische Lichtemitter, wie z.B. Einzelphotonenemitter und Emittoren von verschränkten Photonenpaaren, realisieren. Als Nanostrukturen kommen vorrangig III-V-Quantenpunkte zum Einsatz. Die wichtigsten Anwendungsfelder für unsere Untersuchungen finden sich in der externen Quantenkontrolle von nanophotonischen Systemen, der Quantenkryptografie, der Quanteninformationsverarbeitung und in der Erzeugung von nicht-deterministischen Zufallszahlen.

Experimentelle Techniken: Hochauflösende Mikro-Photolumineszenz-, Elektrolumineszenz- und Kathodolumineszenz-Spektroskopie, Anregungs- und Resonanzfluoreszenz-Spektroskopie, (Kreuz-) Korrelationsmessungen, Quantentomografie, Interferenztechniken (Michelson, Hong-Ou-Mandel), Elektronenstrahlolithografie, ...



Mit Hilfe der Kathodolumineszenz-Spektroskopie lassen sich nanophotonische Strukturen gezielt am Ort eines einzelnen Quantenpunktes platzieren.



Schematische Anordnung zur Quanteninterferenz zwischen zwei Quantenpunkt-Mikrokavitäten für die Verschränkungsverteilung.

Experimentalphysik und Festkörperphysik

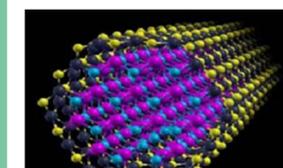
Prof. Dr. Christian Thomsen

Sekretariat EW 5-4

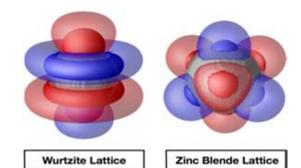
Die physikalischen Eigenschaften von Kohlenstoff-Nanoröhren, kolloidalen Nanokristallen, inorganischen Nanoröhren, sowie Diamantoiden und Ferrofluiden bilden einen Forschungsschwerpunkt der Arbeitsgruppe. Es werden Untersuchungen mit optischen Methoden (Ramanspektroskopie, integrierte und zeitaufgelöste Lumineszenz- und Ferninfrarotspektroskopie) sowie Berechnungen der elektronischen, vibronischen und optischen Eigenschaften durchgeführt. Wert wird dabei auf die dimensionsbezogenen Besonderheiten der elektronischen Struktur von niederdimensionalen Systemen gelegt. Die Modellierung nimmt neben den experimentellen Methoden einen besonderen Platz ein. Je nach Strukturgröße verwenden wir ab-initio Methoden, wie die Dichtefunktionaltheorie (DFT), oder mesoskopische Methoden, wie die k-p Theorie.

Experimentelle Methoden: Resonante Ramanspektroskopie, integrierte und zeitaufgelöste Lumineszenz- und Ferninfrarotspektroskopie.

Theoretische Methoden: Dichtefunktionaltheorie zur Berechnung der elektronischen und optischen Eigenschaften, k-p-Theorie für mesoskopische Systeme inklusive Verzerrung, Piezo- und Pyroelektrizität, Konfigurations-WW für Coulomb Effekte.



Struktur eines core-shell nanorods aus CdSe mit einer ZnS-Hülle.



Berechnung des piezoelektrischen Feldes von kolloidalen CdSe/CdS Quantenpunkten.