

PDI Institutskonzept (Stand April 2018)

Mission

The Paul-Drude-Institut für Festkörperelektronik (PDI) plays a pathfinding role in pushing the outermost frontiers of materials and nanoscale devices for solid-state electronics and photonics. This exploratory work is firmly grounded on PDI's expertise in molecular beam epitaxy, a materials growth technique with extraordinary control and precision on the atomic scale. In a lively symbiosis between materials science and solid-state physics, PDI investigates the fundamentals of epitaxial growth, novel inorganic materials and nanoscale heterostructures, at the same time exploring the quantum physics of such structures with regard to innovative device concepts.

Scientific and societal context

Solid-state electronics and photonics have enabled much of the technological progress that shaped our society in the 20th century and which now affects everyday life in countless ways. To a large extent this progress is due to the continuous development of semiconductor technologies, most evidently in information technology. As can be illustrated by recent and emerging trends, such developments critically require the employment of novel materials and novel physics:

In microelectronics, an increase in functionality and continuous cost-reduction has for a long time been possible by miniaturization of integrated circuits. Further advances however require the incorporation of a wide range of novel materials including novel semiconductor nanostructures.

Beyond today's technological mainstream, exciting perspectives are seen in a number of entirely novel materials with a range of unique and sometimes even spectacular physical properties. Prominent examples are two-dimensionally layered materials, wide bandgap oxide semiconductors or phase change materials. They show great potential of generating unprecedented functionalities, ranging from extremely low power logic devices to high-voltage switches for electric vehicles and to non-volatile, universal electronic memory units.

Another fascinating trend is related to an inherent combination of novel materials and physical effects in the so-called "quantum materials". Being related to materials mentioned above, they promise the realization of robust quantum states which may exist at ambient conditions and form essential building blocks for quantum technologies, such as quantum information, quantum cryptography and quantum sensing. This "second quantum revolution" is predicted to have an impact far beyond that of the classical supercomputers of today and tomorrow.

While it is generally expected that such developments will lead to further disruptive advances, comparable to the advent of solid-state lighting that was enabled by the group-III nitrides, they obviously involve a multitude of options. The broad scope of promising materials and physical effects therefore necessitates pathfinding activities for opening up routes towards innovative devices. Based on its broad portfolio of competences and research facilities, PDI is in a unique position to actively pursue this pathfinding role.

Scientific concept

PDI strives to take materials, nanostructures, and nanodevices to their outmost frontiers. This exploratory work is grounded in PDI's long-term and internationally leading expertise in molecular beam epitaxy, a technique that allows controlled growth of tailored structures with atomic precision. Since novel and innovative functionalities often arise from the combination of dissimilar materials, investigations on heteroepitaxial growth, the formation of interfaces and their characteristics are an integral part of PDI's work.

Physical properties of structures at the nanoscale inherently depend on quantum phenomena. PDI investigates and manipulates quantum states for novel functionalities and device concepts. Their sensitivity to structural perfection and chemical composition requires a strong interdependence between PDI's materials studies and its activities towards exploiting quantum functionalities.

The pathfinding role of PDI's research typically places it in an early, exploratory phase, roughly 15 years before results may reach the marketplace. In order to ensure a clear orientation towards future devices, PDI selects new projects by their potential for application.

Looking beyond specific materials or physical phenomena, the PDI's research has the following aims:

- Tailoring the synthesis of epitaxial materials and hybrid structures having unprecedented crystalline perfection, precisely controlled chemical composition, and/or nanoscale conformations to produce highly controlled electronic, optical, or magnetic properties
- Understanding the fundamental physical properties of these structures and the relationships between their structure and properties
- Developing new device concepts for emerging markets and further advancing leading-edge device concepts for existing markets
- Devising new concepts for novel device functionalities based on the quantum-mechanical properties of electrons, photons, phonons, and other elementary excitations

Over the past years PDI has exploited its historical core strengths to realize semiconductor heterostructures with the highest level of complexity or in reduced dimensions. The institute has diversified towards novel classes of materials, addressing a widely extended range of applications. Based on this broad expertise, PDI can readily take on new challenges related to novel materials and their physics.

Strategy

PDI maintains and further develops the comprehensive range of technical expertise and state-of-the-art facilities needed to successfully conduct complex, multifaceted scientific research projects. PDI's research encompasses the full range from fundamental growth studies, the understanding of basic inorganic materials properties and fundamental physical effects to the fabrication of devices. The Institute will continue to dedicate resources to ensure it stays at the forefront of methodological developments.

PDI seeks collaboration with industrial partners, typically in third-party funded consortia. However, the institute also lives up to the ambition of exploring paths that are not yet recognized by industry.

PDI is organized in a matrix structure consisting of departments and core research areas that ensures both, the indispensable basis in research infrastructure, and a highly flexible environment that allows a quick adjustment of the research focus.

PDI maintains a healthy balance between experienced and young researchers and strives to improve its gender balance at all scientific and supervisory levels. Both goals are critical for the environment needed to meet the long-term goals and to benefiting from fresh ideas.

The emphasis on nurturing and refocusing PDIs historical synergy between basic research and the new technologies will continue to position the Institute at the forefront of science in Berlin, in Germany, and in Europe - and to firmly establish its important role in the worldwide scientific community.

Institutskonzept des PDI

(Übersetzung des englischen Originals – es gilt der englische Text)

Aufgabe

Das Paul-Drude Institut für Festkörperelektronik (PDI) nimmt eine Pfadfinder-Rolle dabei ein, die äußersten Grenzen von Materialien und nanoskaligen Bauelementen für Festkörperelektronik und Photonik weiter herauszuschieben. Diese Forschungsarbeit ist dabei fest verankert im Fachwissen des PDI in der Molekularstrahlepitaxie (MBE), einer Technik für Materialwachstum mit außergewöhnlicher Kontrolle und Genauigkeit im atomaren Bereich. In einer lebendigen Symbiose aus Materialwissenschaft und Festkörperelektronik erforscht das PDI die Grundlagen des epitaktischen Wachstums, neuer anorganischer Materialien und Heterostrukturen im Nanobereich, während es gleichzeitig die Quantenphysik solcher Strukturen im Hinblick auf innovative Konzepte von Bauelementen erforscht.

Wissenschaftlicher und gesellschaftlicher Kontext

Ein Großteil des technologischen Fortschritts, der unsere Gesellschaft im 20. Jahrhundert geprägt hat und der sich nun auf vielfältigste Art und Weise auf unser tägliches Leben auswirkt, ist der Festkörperelektronik und der Photonik zu verdanken. Dieser Fortschritt ist in hohem Maße auf die kontinuierliche Entwicklung der Halbleitertechnologie zurückzuführen, was sich am deutlichsten in der Entwicklung der Informationstechnologie zeigt. Wie anhand derzeitiger und sich abzeichnender Trends aufgezeigt werden kann, hängen solche Entwicklungen kritisch vom Einsatz neuer Materialien und neuartiger Physik ab:

In der Mikroelektronik konnte lange Zeit eine Zunahme der Funktionalität bei gleichzeitiger Senkung der Kosten durch eine kontinuierliche Miniaturisierung von integrierten Schaltkreisen erreicht werden. Für weitere Verbesserungen ist allerdings die Verwendung einer großen Bandbreite neuer Materialien inklusive neuer Halbleiter-Nanostrukturen notwendig.

Jenseits des heutigen technologischen Mainstreams zeigen sich aufregende Perspektiven in einer Vielzahl von gänzlich neuartigen Materialien mit einer großen Spanne von einzigartigen und manchmal sogar spektakulären physikalischen Eigenschaften. Herausragende Beispiele hierfür sind zweidimensional geschichtete Materialien, Oxid-Halbleiter mit großer Bandlücke oder Phasenwechselmaterialien. Sie zeigen großes Potenzial in der Entwicklung von noch nie dagewesenen Funktionalitäten, von extrem energieeffizienten logischen Schaltungen über Hochspannungsschalter für elektrische Fahrzeuge bis hin zu nicht-flüchtigen universellen elektronischen Speichereinheiten.

Ein anderer faszinierender Trend steht im Zusammenhang mit einer inhärenten Kombination aus neuen Materialien und physikalischen Effekten in sogenannten „Quantenmaterialien“. Zum Teil in Verwandtschaft zu den oben erwähnten Materialien, versprechen sie die Realisierung von stabilen Quantenzuständen - möglicherweise sogar bei Raumtemperatur - und bilden grundlegende Bausteine für Quantentechnologien, wie z.B. Quanteninformation, Quantenkryptographie und Quantensensorik. Man geht davon aus, dass diese „zweite Quantenrevolution“ weiter reichende Auswirkungen hat als die klassischen Supercomputer von heute und morgen.

Während erwartet wird, dass solche Entwicklungen zu weiteren disruptiven Fortschritten führen werden - vergleichbar der Festkörperbeleuchtung, die durch die Gruppe III-Nitride möglich wurde - eröffnen sie offensichtlich viele weitere Optionen. Die Bandbreite an vielversprechenden Materialien und physikalischen Effekten erfordert daher richtungsweisende Forschung, um die Wege zu innovativen Bauelementen zu erschließen. Dank seines breiten Portfolios an Kompetenzen und seiner Forschungsinfrastruktur ist das PDI in einer einzigartigen Position, um diese Pfadfinder-Rolle einzunehmen.

Wissenschaftliches Konzept

Das PDI strebt danach, Materialien, Nanostrukturen und Nanobauteile auf ihre physikalischen Grenzen hin auszuloten. Diese exploratorische Forschung ist dabei fest verankert in der langjährigen und international führenden Expertise des PDI in der Molekularstrahlepitaxie (MBE), einer Technik, die kontrolliertes Wachstum von maßgeschneiderten Strukturen mit atomarer Genauigkeit erlaubt. Da neuartige und innovative Funktionalitäten häufig aus der Kombination verschiedenartiger Werkstoffe entstehen, sind Untersuchungen an heteroepitaktischem Wachstum, die Bildung von Grenzflächen und ihre Eigenschaften ein wesentlicher Bestandteil der Arbeit des PDI.

Physikalische Eigenschaften von Strukturen im Nanobereich sind grundsätzlich von Quantenphänomenen bestimmt. Das PDI untersucht und manipuliert Quantenzustände für neuartige Funktionalitäten und für Bauelement-Konzepte. Die Empfindlichkeit dieser Zustände auf strukturelle Perfektion und chemische Zusammensetzung erfordert eine starke Wechselbeziehung zwischen den Materialstudien des PDI und seinen Aktivitäten im Hinblick auf die Nutzung von Quantenfunktionalitäten.

Die Pfadfinder-Rolle des PDI positioniert die Forschung des Instituts typischerweise in eine frühe, explorative Phase - ungefähr 15 Jahre, bevor Ergebnisse den Markt erreichen können. Um eine klare Ausrichtung auf zukünftige Bauelemente zu gewährleisten, wählt das PDI neue Projekte anhand ihres Anwendungspotenzials aus.

Jenseits spezifischer Materialien oder physikalischer Phänomene, verfolgt die Forschung des PDI die folgenden Ziele:

- Maßgeschneiderte Synthese von Werkstoffen und hybriden Strukturen mit beispielloser kristalliner Perfektion, exakt gesteuerter chemischer Zusammensetzung und/oder Konfiguration im Nanobereich, um präzise kontrollierte elektronische, optische oder magnetische Eigenschaften zu erzielen
- Das Verständnis der grundlegenden physikalischen Eigenschaften dieser Strukturen und der Beziehungen zwischen Struktur und Eigenschaften
- Entwickeln neuer Bauelementkonzepte für aufkeimende Märkte und das Vorantreiben von leading-edge Bauelementkonzepten für bestehende Märkte
- Die Entwicklung neuer Konzepte für neuartige Bauelementfunktionalitäten basierend auf den quantenmechanischen Eigenschaften von Elektronen, Photonen, Phononen und anderen elementaren Anregungen.

Über die letzten Jahre hat das PDI seine historischen Kernkompetenzen und Stärken erweitert um Halbleiter-Heterostrukturen mit dem höchsten Grad an Komplexität oder reduzierten Dimensionen zu verwirklichen. Das Institut hat seine Forschungsgebiete in Richtung neuartiger Materialklassen diversifiziert, womit es eine stark erweiterte Bandbreite an Anwendungen adressiert. Basierend auf dieser breiten Expertise kann das PDI jederzeit neue Herausforderungen bezüglich neuartiger Materialien und ihrer Physik annehmen.

Strategie

Das PDI unterhält ein umfassendes Spektrum an technischem Wissen und modernster Forschungsinfrastruktur, wie sie für die erfolgreiche Durchführung von komplexer, facettenreicher wissenschaftlicher Forschung unabdingbar sind, und entwickelt es kontinuierlich weiter. Die Forschung des PDI adressiert die gesamte Bandbreite, von fundamentalen Wachstumsstudien, zum grundlegenden Verständnis von Eigenschaften und physikalischen Effekten anorganischer Materialien bis hin zur Herstellung von Bauelementen. Das Institut wird weiterhin Mittel aufwenden, um sicherzustellen, dass es in Sachen methodologischer Entwicklungen führend bleibt.

Das PDI strebt die Zusammenarbeit mit der Industrie an, typischerweise in Form von Drittmittel-finanzierten Konsortien. Das Institut verfolgt aber auch die Zielsetzung, Wege zu erkunden, die von der Industrie noch nicht erkannt werden.

Das PDI ist in einer Matrix-Struktur organisiert, die aus Abteilungen und Kern-Forschungsgebieten besteht. Diese garantiert die unentbehrliche Grundlage der Forschungsinfrastruktur und bildet gleichzeitig eine hoch-flexible Umgebung, die rasche Anpassungen des Forschungsfokus erlaubt.

Das PDI baut auf eine gesunde Balance zwischen erfahrenen und jungen Forschern und bemüht sich darum, die Gender-Ausgewogenheit auf der wissenschaftlichen wie auf

den Leitungsebenen zu verbessern. Beide Ziele sind entscheidend für eine Umgebung, die sowohl die Erreichung langfristiger Ziele wie auch die Nutzung von frischen Ideen ermöglicht.

Das Verfolgen und die kontinuierliche Weiterentwicklung der historische Synergie des PDI zwischen Grundlagenforschung und neuen Technologien, wird dem Institut weiterhin eine Spitzenposition in der Wissenschaft in Berlin, in Deutschland und in Europa sichern – und seine bedeutende Rolle in der weltweiten Wissenschaftsgesellschaft fest etablieren.