

Tibor Grasser, Erasmus Langer, Siegfried Selberherr

## INSTITUT FÜR MIKROELEKTRONIK INSTITUTE FOR MICROELECTRONICS

**Die Forschungsschwerpunkte des Instituts für Mikroelektronik (I $\mu$ E) sind die Modellierung und Simulation moderner Halbleiterbauelemente, Herstellungsprozesse, Verdrahtungsstrukturen sowie deren Zuverlässigkeit.**

Seit seiner Gründung im Jahre 1988 arbeitet das Institut für Mikroelektronik (I $\mu$ E) an Themen rund um die Simulation von mikro- und nanoelektronischen Bauelementen im Spitzenfeld der internationalen Forschung, sowohl in grundlagen- als auch anwendungsorientierten Bereichen. Während in der Anfangszeit des I $\mu$ E die Themenbereiche stark von der Standard-Silizium-Technologie geprägt waren, hat sich der Themenkanon in den letzten Jahren stark verbreitert. Dies war im Wesentlichen durch die immer weiter fortschreitende Miniaturisierung stimuliert, in deren Zuge zahlreiche neue Material- und Bauelementoptionen erforscht und modelliert werden konnten. Aufgrund der stark gewachsenen Komplexität der Herausforderungen ist für theoretische Untersuchungen in der Regel der Einsatz hochoptimierter Computerprogramme notwendig. Diese sogenannten *Technology-Computer-Aided-Design* (TCAD)-Werkzeuge werden am I $\mu$ E seit seiner Gründung entwickelt und interessierten Kolleginnen und Kollegen weltweit zur Verfügung gestellt. Diese Computerprogramme erlauben mittlerweile nicht nur die Beschreibung von konventionellen Silizium-MOS-Transistoren, Tri-gate- und planaren Nanotransistoren, sondern auch diverser Bauformen von Transistoren basierend auf III-V-Halbleitern, Quantenpunkten, resonanten Tunnelioden und Quantenkaskadenlasern und -detektoren. Des Weiteren wurde in den letzten Jahren im Rahmen eines *ERC Advanced Grants* begonnen, das Verhalten von Spin-basierten Bauelementen, welche spannende Perspektiven für neuartige

**The core research areas of the Institute for Microelectronics (I $\mu$ E) include the modelling and simulation of modern semiconductor devices, production processes, interconnects, and their reliability.**

Since its founding in 1988, the Institute for Microelectronics (I $\mu$ E) has been a leader in international research, working on topics regarding the simulation of micro and nanoelectronic components, both in basic and application-oriented fields. While the subject areas were strongly influenced by standard silicon technology during the early days of the I $\mu$ E, the canon of topics has been considerably expanded recently. It was thoroughly stimulated by ever-progressing miniaturisation, during the course of which numerous new materials and component options were researched and modelled. Due to the stark increase in the complexity of the challenges, highly-optimised computer programmes are generally required for theoretical experiments. These technology computer-aided design (TCAD) tools have been developed at the I $\mu$ E since its founding, and are provided to interested colleagues worldwide. Currently, these computer programmes not only allow for the characterisation of conventional silicon MOS transistors, tri-gate, and planar nanotransistors, but also many different types of transistors based on III-V semiconductors, quantum dots, resonant tunnel diodes, and quantum cascade lasers and detectors. Furthermore, as part of an ERC Advanced Grant, work began on recording and modelling the behaviour of spin-based components, which offer exciting perspectives for new logic components and non-volatile memory. The development of new components with two-dimensional materials was a particularly hot topic even before the 2010 Nobel Prize was awarded to Novoselov and Geim for researching

Logikbauelemente und nichtflüchtige Speicher bieten, zu erfassen und zu modellieren. Ein besonders heißes Thema nicht nur seit der Verleihung des Nobelpreises 2010 an Novoselov und Geim für die Erforschung des Feldeffekts in Graphen ist die Entwicklung von neuartigen Bauelementen mit zweidimensionalen Materialien. Aufgrund der großen Anzahl verschiedener Materialien, allesamt mit hochinteressanten Eigenschaften und einer beinahe beliebigen Kombinierbarkeit, sind für die nächsten Jahre noch viele spannende Aktivitäten zu erwarten. Die Entwicklung von effizienten Softwarewerkzeugen für die Berechnung der elektrischen und thermischen Eigenschaften all dieser Bauelemente ist mit zahlreichen Fragestellungen konfrontiert und wird für die nächste Zukunft ein spannendes Betätigungsfeld bleiben.

Für alle diese Bauelementtechnologien gilt, dass sie immer weiter ausgereizt und an ihre physikalischen Grenzen getrieben werden, wodurch ihre Zuverlässigkeit im Betrieb unter Umständen nicht mehr gewährleistet werden kann. Gerade die Beantwortung dieser Fragestellung durch theoretische Methoden ist aufgrund der zahlreichen Unbekannten ohne eine erstklassige experimentelle Unterstützung nicht möglich, weshalb in den letzten Jahren eine entsprechende Infrastruktur für hochgenaue und ultraschnelle Messungen aufgebaut wurde.

Die am IµE erzielten Erkenntnisse werden systematisch in einschlägigen wissenschaftlichen Journalen und bei relevanten Tagungen publiziert und zusätzlich, so weit möglich, mit Patenten abgesichert.

### **Ladungsträger- und Wärmetransport in Halbleiterbauelementen**

Moderne Halbleiterbauelemente sind mittlerweile so klein beziehungsweise bestehen aus so dünnen Schichten, dass Quanteneffekte im Ladungsträger- und Wärmetransport immer wichtiger werden. Dies gilt sowohl für die akkurate Beschreibung nanoelektronischer Bauelemente, Bauelemente aus 2D-Materialien, als auch z. B. für thermoelektrische Konverter. Reine Quantenmodelle sind jedoch numerisch sehr aufwendig zu lösen, was de-

the field effect in graphene. Due to the large amount of different materials, all of which possess highly-interesting characteristics and can be combined in virtually any manner, many exciting developments can be expected in the coming years. Developing efficient software tools for calculating the electric and thermal characteristics of all these components poses numerous questions and will remain an exciting field of activity in the immediate future.

All of these technologies continue to be expanded and pushed to their physical limits, which is why their operational reliability may, in some cases, no longer be guaranteed. Due to the numerous unknown factors, this question cannot be answered using theoretical methods without first-rate experimental support, which is why the infrastructure necessary for high-precision and ultra-fast measurements has been built up in recent years.

The knowledge obtained at the IµE is systematically published in the relevant scientific journals, presented at important symposia and, when possible, also patented as well.

### **Charge Carriers and Heat Exchange in Semiconductor Devices**

Modern semiconductor devices are now so small or made of such thin layers that quantum effects in charge carriers and heat exchange are becoming increasingly important. This applies to the accurate description of nanoelectronic components, to components made of 2D materials, and to thermoelectric converters as well, for instance. However, numerically solving pure quantum models is very laborious, which often limits their practical application. At the IµE, models that represent a good compromise of precision and computation time are currently being developed for various application fields. The electronic and phononic band structures are first calculated as a basis for these models, whereby either a continuum or an atomistic model is used, depending on the scale of the problem. Electronic and thermal transport characteristics are calculated whenever possi-

ren praktischen Einsatz oft einschränkt. Derzeit werden am IµE aktiv Modelle entwickelt, die einen guten Kompromiss aus Genauigkeit und Rechenzeit für den jeweiligen Einsatzbereich darstellen. Als Grundlage zu diesen Modellen werden zuerst die elektronischen und phononischen Bandstrukturen berechnet, wobei abhängig von der Längenskala des Problems entweder Kontinuumsmodelle oder atomistische Modelle verwendet werden. Die elektronischen und thermischen Transporteigenschaften werden, wenn möglich, semiklassisch durch die Boltzmann-Gleichung oder quantenmechanisch mittels Nichtgleichgewichts-Greens-Funktionen berechnet. Beides ist auch für heutige Hochleistungscomputer eine große Herausforderung und erfordert hocheffiziente Computerwerkzeuge. Ziel dieses Arbeitsschwerpunktes ist es, den Entwurf nanoelektronischer Bauelemente und thermoelektrischer Nanostrukturen zu unterstützen und Möglichkeiten zu deren Optimierung aufzuzeigen. Besonders ausgereifte Werkzeuge werden in Kooperation mit dem TU Wien Spin-off *Global TCAD Solutions* für industrielle Anwendungen verfeinert.

### Spin-basierte Elektronik: Spintronik

Für neuartige Logikbauelemente und nichtflüchtige Speicher steht der Elektronenspin als Alternative zur bis heute genutzten Elektronenladung im Fokus der Forschungstätigkeit. Als Material ist Silizium aufgrund seiner physikalischen Eigenschaften bestens geeignet und neue Bauelemente können damit relativ einfach in der heute etablierten CMOS-Technologie verwirklicht werden, wie jüngste Untersuchungen beeindruckend bestätigen. Um diese Forschungsergebnisse in der Industrie einsetzen zu können, müssen sie in existierende TCAD-Programme implementiert werden. Daher wird am IµE eine Simulationsumgebung für Spin-basierte Bauelemente entwickelt, die mit präzisen mikroskopischen Modellen ausgestattet ist. Damit werden besonders wichtige Fragestellungen, wie die Erhöhung der Spin-Lebensdauer, die Spin-Bahn-Wechselwirkung und die Reduzierung des Energieverbrauchs untersucht.

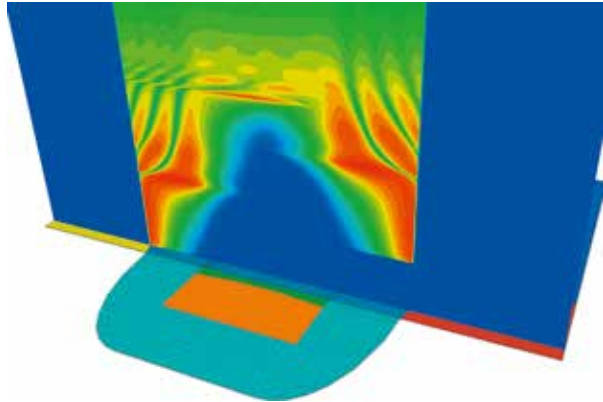


Abb. 1: Der am IµE entwickelte Vienna Schrödinger-Poisson Solver (VSP) ist in der Lage, das Elektronendichtespektrum in einem Dünnschicht-Silicon-On-Insulator-Feldeffekttransistor zu berechnen.

Figure 1: Developed at the IµE, the Vienna Schrödinger Poisson (VSP) solver is able to calculate the electron density spectrum in a thin-layered silicon-on-insulator field effect transistor.

ble using the Boltzmann equation or quantum mechanics using non-equilibrium Green's functions. Both these methods pose a considerable challenge to even today's high-performance computers, and require highly efficient computing tools. The focus of this work is to support the development of nanoelectronic components and thermoelectric nanostructures, and to demonstrate ways in which they can be optimised. Highly-sophisticated tools are refined for industrial applications in collaboration with the TU Wien spin-off, Global TCAD Solutions.

### Spin-Based Electronics: Spintronics

Electron spin, an alternative to the conventional electron-charge-based approaches for new logic and non-volatile memory devices, is at the focus of this research activity. As a material, silicon is highly suited due to its physical characteristics, and new components made with it can be implemented relatively easily into well-established CMOS technology, as recent experiments have impressively confirmed. In order for them to be used in the industry, these research findings must be implemented in



Abb. 2: Siegfried Selberherr  
Figure 2: Siegfried Selberherr

Spintronik ergänzt somit die Möglichkeiten der modernen Mikroelektronik, sodass die elektronischen Systeme der Zukunft für viele Lebensbereiche eine Reihe von Verbesserungen bringen werden.

**Siegfried Selberherr** studierte Elektrotechnik an der TU Wien: 1978 war er Diplom-Ingenieur, 1981 Doktor der technischen Wissenschaften und bereits 1984 erfolgte die Habilitation zum Dozenten. Nach Aufenthalt in den USA, als Gastwissenschaftler in den Bell-Laboratorien, kehrte Siegfried Selberherr an die TU Wien zurück und wurde 1988 als Ordinarius für Softwaretechnologie für Mikroelektroniksysteme berufen. Von 1998 bis 2005 stand er der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik als Dekan vor. Siegfried Selberherr ist Träger zahlreicher Auszeichnungen (u. a. des Ehrendoktors der Universität Niš, des Großen Ehrenzeichens für Verdienste um die Republik Österreich, des Silbernen Komturkreuzes für Verdienste um das Land Niederösterreich, der Marin-Drinov-Medaille der Bulgarischen Akademie der Wissenschaften), seit 1993 ist er IEEE-Fellow.

Für das Projekt „Modeling Silicon Spintronics“ wurde Siegfried Selberherr mit dem ERC *Advanced Grant* ausgezeichnet.

### Zuverlässigkeit

Da mikroelektronische Bauelemente aus Gründen der Kostenersparnis und der Leistungssteigerung nicht nur

existing TCAD programmes. This is why the IµE is developing a simulation environment equipped with precise, microscopic models for spin-based components. It will be used to examine particularly important questions, such as increasing spin lifespan, spin-orbit coupling effects, and reducing energy consumption. Spintronics expands the possibilities of modern microelectronics, which will allow future electronics systems to bring about an array of improvements in many facets of life.

**Siegfried Selberherr** studied Electrical Engineering at the TU Wien. In 1978, he became a *Diplomingenieur* (graduate engineer), in 1981 Doctor of Technical Sciences, and habilitated in 1984, becoming an Associate Professor. After staying in the USA as a guest scientist at Bell Laboratories, Selberherr returned to the TU Wien and was appointed Full Professor for Software Technology for Microelectronics Systems in 1988. He was Dean of the Faculty of Electrical Engineering and IT from 1998 to 2005. Selberherr is the recipient of numerous awards (an Honorary Doctorate from the University of Niš, the Grand Decoration of Honour for Services to the Republic of Austria, the Silver Commander's Cross for Services to the State of Lower Austria, the Marin Drinov Medal from the Bulgarian Academy of Sciences, and many others). He has been an IEEE fellow since 1993.

Selberherr was awarded the ERC *Advanced Grant* for his project, “Modeling Silicon Spintronics”.

### Reliability

Due to the fact that microelectronic components are not only being made smaller and smaller in order to save costs and enhance performance, but are also being driven closer and closer to their carrying capacity, error rates are increasing during operation. When it comes to MOS transistors, this is mainly due to the fact that defects are created and charged in certain sensitive locations, which decreases performance. Similar reliability problems surface when implementing modern 3D-ICs using new interconnects such as through-silicon vias (TSV) and

immer weiter verkleinert, sondern auch immer näher an ihre Belastbarkeitsgrenzen getrieben werden, erhöht sich die Fehleranfälligkeit im Betrieb. Bei MOS-Transistoren liegt dies vor allem daran, dass an bestimmten empfindlichen Stellen Defekte erzeugt und geladen werden, wodurch das Bauelementverhalten verschlechtert wird. Ähnliche Zuverlässigkeitsprobleme treten bei der Realisierung von modernen 3D-ICs in neuen Verdrahtungsstrukturen wie Through-Silicon-Vias (TSV) und Solder Joints/Micro-Bumps auf. Die dahinterliegenden Degradationsprozesse sind heute auch in ausgereiften Technologien noch immer nicht hinreichend genau verstanden und Vorhersagen bezüglich der Lebensdauer dementsprechend schwierig. All diese Zuverlässigkeitssaspekte werden durch die Einführung immer neuer Materialien erschwert, da eine genaue Erforschung der Materialeigenschaften sehr zeitaufwändig ist. Um nun ein Fehlverhalten innerhalb einer praktikablen Zeit zu provozieren, werden die zu testenden Bauelemente und Strukturen extremen Stressbedingungen ausgesetzt. Mit Hilfe von theoretischen Modellen können aus diesen Experimenten Lebensdauern unter relevanten Bedingungen extrapoliert werden. Das IµE ist eine der weltweit führenden Forschungsstätten in der Entwicklung solcher Modelle, wobei zahlreiche experimentelle und theoretische Methoden, von *Ab-initio*- bis zu konventionellen TCAD-Werkzeugen, zur Anwendung kommen.

### Scientific Computing

Für die oben beschriebenen Themenbereiche werden am IµE seit Jahrzehnten quelloffene wissenschaftliche Software-Werkzeuge entwickelt, wodurch Forschungsgruppen aus der ganzen Welt auf direktem Weg auf den erzielten Forschungsergebnissen aufbauen können. Als Antwort auf die Herausforderungen der Entwicklung von Software für aktuelle, parallele Rechenarchitekturen wurden die freien und quelloffenen *Vienna\**-Programm-pakete ins Leben gerufen, die an die internationalen Erfolge der MINIMOS-Simulatoren anschließen sollen. Dies geschieht mit Hilfe zahlreicher Module wie z. B. *ViennaMesh*

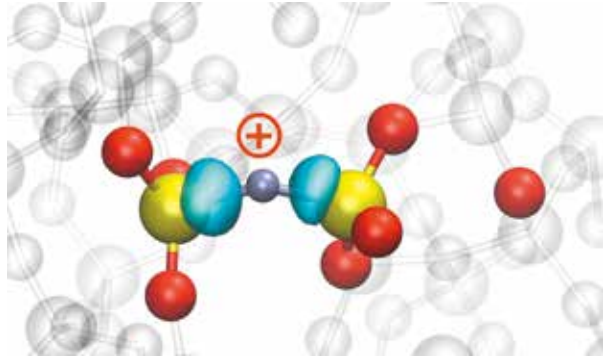


Abb. 3: Die Wasserstoffbrücke als möglicher Defekt in  $\text{SiO}_2$  zur Erklärung wichtiger Degradationseffekte.

Figure 3: The hydrogen bridge, a possible defect in  $\text{SiO}_2$  that would explain important degradation effects.

solder joints/micro-bumps. The underlying degradation processes are still not sufficiently and precisely understood today, even in mature technologies, and lifecycle predictions are accordingly difficult. These aspects of reliability are aggravated by the introduction of newer and newer materials, since conducting precise research on material characteristics is very time-consuming. In order to provoke a malfunction within a practical time period, the components and structures being tested must be exposed to extreme stress conditions. Theoretical models must then be used to extrapolate lifetimes at relevant conditions. The IµE is one of the leading research institutions worldwide when it comes to developing such models using numerous experimental and theoretical methods, from *ab-initio* to conventional TCAD tools.

### Scientific Computing

The IµE has been developing open source software tools in the aforementioned topic areas for decades. Research groups from all over the world can build directly on these research findings using the releases put into the public domain. In response to the challenges of developing software for today's parallel computing architectures, the free and open source *Vienna\** software

und *ViennaGrid* für die Erzeugung von qualitativ hochwertigen Drahtgittermodellen, *ViennaCL* zur Nutzung moderner High-End-Grafikkarten für wissenschaftliche Berechnungen sowie der Simulatoren *ViennaMini*, *ViennaSHE* und *ViennaWD*. Alle diese Programmpakete sind für jeden interessierten Benutzer über die Simulationsplattform *ViennaMOS* frei zugänglich. Um die notwendige Rechenleistung abzudecken, unterhält das IµE einen Hochleistungsrechnerverbund sowie mit High-End-Grafikkarten ausgestattete Arbeitsplätze, die den zusätzlichen verfügbaren Zugang zum universitätsweiten Großrechner (Vienna Scientific Cluster) abrunden.

## Lehre

Das IµE ist sowohl in der Grundlagenausbildung mit *Programmieren in C* als auch im Masterstudium *Mikroelektronik und Photonik* mit mikroelektronikspezifischen Lehrveranstaltungen aktiv. Da Computer und deren hardwarenahe Programmierung aus der heutigen Elektrotechnik nicht mehr wegzudenken sind, bilden die *Programmieren in C*-Lehrveranstaltungen auch das Fundament für zahlreiche weiterführende Lehrveranstaltungen im Studium. Die Vorlesung *Quantenelektronik* (zusammen mit dem Institut für Photonik) bildet den Grundstock für ein tiefergehendes Verständnis der im Bachelorstudium gelehrt elektronischen Bauelemente. Weiterführende Vorlesungen wie zum Beispiel *Modellierung elektronischer Bauelemente* sowie die neuen Wahlmodule *Emerging Devices* und *Zuverlässigkeit Mikroelektronik* decken einen großen Teil der Forschungsschwerpunkte des IµE ab. Die einschlägig interessierten Studierenden werden somit auf hohem Niveau ausgebildet und in einem frühen Stadium in aktuelle Forschungsthemen eingeführt.

package was created, building upon the international success of the MINIMOS simulators. This was done with the help of numerous modules, such as *ViennaMesh* and *ViennaGrid* for creating high-quality wire-frame models, *ViennaCL* for using modern, high-end graphic cards for scientific calculations, and the *ViennaMini*, *ViennaSHE*, and *ViennaWD* simulators. These entire programme packages are freely accessible to any interested user through the *ViennaMOS* simulation platform. To ensure the necessary computing power, the IµE maintains a high-performance computer network and workstations equipped with high-end graphic cards, which supplement access to the university-wide mainframes of the Vienna Scientific Cluster.

## Teaching

The IµE is active both in basic education with “Programming in C” and in the Microelectronics and Photonics master’s degree programme with lectures on microelectronics. Due to the fact that Electrical Engineering essentially depends on computers and embedded programming, the “Programming in C” courses constitute the foundation for numerous additional courses in the study programme. The Quantum Electronics lecture (taught together with the Photonics Institute) constitutes the foundation for a more in-depth understanding of the electronic components taught in the bachelor’s degree programme. Additional lectures, such as “Modelling Electronic Devices” and the new elective modules “Emerging Devices” and “Microelectronics Reliability” cover a great part of the IµE’s core research areas. Interested students therefore receive a top-level education and are introduced to current research topics at a very early stage.