

Diss. ETH No. 22445

# Scanning Probe Thermometry of Nanosystems

A thesis submitted to attain the degree of  
DOCTOR OF SCIENCES of ETH ZURICH  
(Dr. sc. ETH Zurich)

presented by  
FABIAN ROMAN MENGES  
Master of Science in Materials Science, ETH Zurich  
born 21.04.1985  
citizen of Germany

accepted on the recommendation of  
Prof. Dr. Andreas Stemmer, examiner  
Dr. Bernd Gotsmann, co-examiner

2015

# Abstract

This thesis reports on the development of a thermal scanning probe microscope and methods for nanoscale thermometry. The instrument and the techniques are applied to quantify thermal transport across graphene layers, the temperature of nanoscopic hot spots in self-heated metal interconnects as well as local Joule and Peltier effects in indium arsenide (InAs) nanowires contacted by metal electrodes. The work is motivated by the lack of experimental tools and techniques to characterize thermal processes, such as the self-heating of transistors, in nanosystems.

The design, the operation and the characterization of the pico-Watt-per-Kelvin thermal scanning probe microscope are illustrated and discussed. The performance of the microscope is first demonstrated in studies of thermal transport across graphene sheets of varying thickness. Thermal resistance modulations are quantified with sub-10 nm spatial resolution and sensitivity for the individual atomic layers.

The quantification of nanoscopic temperature fields is enabled by the development of a technique termed scanning probe thermometry. Scanning probe thermometry is a two-path method inferring temperature by probing the total steady-state heat flux and a temporally modulated heat-flux signal between the scanning probe sensor and a sample simultaneously. The novel technique minimizes contact-geometry-related artifacts that so far limited the reliability of nanoscopic temperature measurements by scanning thermal microscopy.

The method is applied to quantify self-heating of metal interconnects. Nanoscopic hot spots near 40 nm-wide lithographically defined defects are characterized with 30 mK sample temperature resolution. The method is further extended by a dual-harmonic detection scheme to separate different thermophysical effects so far only observed as superposition in thermal scanning probe measurements. Advantageously, the technique is applied to directly image Joule heating and Peltier effects at the contacts of an InAs nanowire with 10 nm spatial and 85 mK sample temperature resolution.

# Zusammenfassung

Diese Doktorarbeit beschreibt die Entwicklung eines thermischen Rastersondenmikroskops und Methoden zur nanoskaligen Thermometrie. Das Gerät und die Techniken werden verwendet, um den Wärmetransport über Grapheneschichten, die Temperatur von Hotspots in selbst-heizenden Metalleitern, sowie Joule- und Peltier-Effekte in Indium Arsenid Nanodrähten zu bestimmen. Die Arbeit ist durch den Mangel experimenteller Methoden und Geräte zur Charakterisierung thermischer Prozesse in Nanosystemen, wie die Selbsterwärmung von Transistoren, motiviert. Das Design, der Betrieb und die Charakterisierung des picoWatt-pro-Kelvin thermischen Rastersondenmikroskops werden illustriert und erläutert. Die Leistungsfähigkeit des Mikroskops wird zunächst anhand von Wärmetransportmessungen über Grapheneschichten unterschiedlicher Dicke demonstriert. Thermische Widerstandsänderungen werden mit einer räumlichen Auflösung kleiner als 10 nm und mit Sensitivität für einzelne Atomlagen quantifiziert. Die Bestimmung nanoskopiger Temperaturfelder ist durch die Entwicklung einer Technik ermöglicht, die hier als Rastersonden-Thermometrie bezeichnet wird. Die Technik beruht auf einer zwei-Kanal-Methode, bei der gleichzeitig ein stationärer und ein zeitlich modulierter Wärmestrom gemessen werden, um die Proben temperatur zu bestimmen. Die neuartige Technik minimiert kontaktgeometrie-bedingte Artefakte, welche bisher die Verlässlichkeit nanoskopiger Temperaturfeldmessungen mittels thermische Rastersondenmikroskopie limitiert haben.

Die Methode wird verwendet, um die Selbsterwärmung von Metalleitern zu untersuchen. Hotspots in der Nahe 40 nm kleiner, lithographisch definierter Defekte, werden mit einer Temperaturauflösung von 30 mK charakterisiert. Darüberhinaus wird die Methode um ein dual-harmonisches Messschema erweitert, welches die Trennung thermophysikalischer Effekte ermöglicht die andernfalls nur in Überlagerung untersucht werden können. Dadurch ermöglicht die Methode die direkte Abbildung von jouscher Erwärmung und Peltier-Effekten an den Kontakten eines InAs Nanodrahtes mit einer räumlichen Auflösung von 10 nm und einer Temperaturauflösung von 85 mK.