

DIPL.-ING. HELMUT KÖCK

---

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL  
STUDY ON HEAT TRANSFER PROBLEMS  
IN MICROELECTRONIC DEVICES

---

D I S S E R T A T I O N

zur Erlangung des akademischen Grades  
Doktor der Technischen Wissenschaften

Alpen-Adria-Universität Klagenfurt  
Fakultät für Technische Wissenschaften

1. Begutachter:  
Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Manfred Kaltenbacher  
Institut für Mechanik und Mechatronik
2. Begutachter:  
Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr. Dionyz Pogany  
Institut für Festkörperelektronik

Villach, am 26. November 2012



Measurement-, Actuator-, and Simulation-Technology

**Helmut Köck**

**Experimental and numerical study on heat transfer  
problems in microelectronic devices**

Shaker Verlag  
Aachen 2013

**Bibliographic information published by the Deutsche Nationalbibliothek**

The Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie; detailed bibliographic data are available in the Internet at <http://dnb.d-nb.de>.

Zugl.: Klagenfurt, Univ., Diss., 2012

Copyright Shaker Verlag 2013

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted, in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise, without the prior permission of the publishers.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-2418-0

ISSN 2195-0288

Shaker Verlag GmbH • P.O. BOX 101818 • D-52018 Aachen

Phone: 0049/2407/9596-0 • Telefax: 0049/2407/9596-9

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • e-mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

---

## Ehrenwörtliche Erklärung

Ich erkläre ehrenwörtlich, dass ich die vorliegende wissenschaftliche Arbeit selbstständig angefertigt und die mit ihr unmittelbar verbundenen Tätigkeiten selbst erbracht habe. Ich erkläre weiters, dass ich keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe. Alle aus gedruckten, ungedruckten oder dem Internet im Wortlaut oder im wesentlichen Inhalt übernommenen Formulierungen und Konzepte sind gemäß den Regeln für wissenschaftliche Arbeiten zitiert und durch Fußnoten bzw. durch andere genaue Quellenangaben gekennzeichnet.

Die während des Arbeitsvorganges gewährte Unterstützung einschließlich signifikanter Betreuungshinweise ist vollständig angegeben.

Die wissenschaftliche Arbeit ist noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt worden. Diese Arbeit wurde in gedruckter und elektronischer Form abgegeben. Ich bestätige, dass der Inhalt der digitalen Version vollständig mit dem der gedruckten Version übereinstimmt.

Ich bin mir bewusst, dass eine falsche Erklärung rechtliche Folgen haben wird.



---

## Acknowledgments

---

This thesis would not have been successful without the support and encouragement of numerous people. It is the result of research activities from 2009 until 2012 at the KAI - Kompetenzzentrum für Automobil- und Industrieelektronik GmbH<sup>1</sup> in close cooperation with Infineon Technologies as well as the Alpen-Adria-Universität Klagenfurt and the Vienna University of Technology.

First and foremost, I would like to express my gratitude to my academic supervisors. Prof. Manfred Kaltenbacher gave me the opportunity to continue my research within his group. His deep knowledge in computer-aided engineering provided valuable inputs and substantially improved the theoretical and numerical results of this thesis. Besides his professional commitment, his way of creating an productive but friendly working environment has been impressive to me. I am also indebted to Prof. Dionyz Pogany with whom I started this thesis and who guided me through my first publications. His thorough understanding of semiconductor physics has been of great value to me during the experimental investigations performed in this thesis.

Next, I would like to thank the former director of KAI Prof. Herbert

---

<sup>1</sup>This work was jointly funded by the Austrian Research Promotion Agency (FFG, Project No. 831163) and the Carinthian Economic Promotion Fund (KWF, contract KWF-1521|22741|34186)

---

Grünbacher for offering me the possibility to start this PhD as well as the current director Josef Fugger for continuing support. Regarding the people at KAI I am especially thankful to Michael Glavanovics who has been my industrial supervisor over the last 6 years. He introduced me to industrial research and development when I was still an undergraduate and accompanied me from my first industrial internship, through two master degrees until the end of the PhD thesis. During all these years I could ask and discuss literally everything with him, thank you a lot. I also would like to thank my KAI project managers, namely Arno Zechmann and Michael Nelhiebel.

During my time at KAI, many coworkers have become friends and I would like to say thanks to this team of mixed professions for always having the possibility to get help and support, not to forget the interesting coffee meetings and other social events which make KAI a special working place. In particular I would like to mention Gregor Pobegen as our physicist to be asked, the statistics team of Olivia Bluder, where all kind of mathematical problems can be directed, Roland Sleik for laboratory and hardware help, Benjamin Steinwender who solved many software and IT riddles, Stefano de Filippis for the shared suffering during the setup of several simulations and of course the colleagues who were part of the IR team, Daniela Florian and Sascha Einstpieler. Former KAI members which are now at Infineon are also to be mentioned, Hans-Peter Kreuter and Christian Djelassi, as well as Vladimír Kösdl, who introduced many simulation techniques and is now at austriamicrosystems. In addition I would like to say thank you to colleagues I had the pleasure to be with at international conferences, especially the fantastic ESREF at the Atlantic coast in France in 2011.

At Infineon Technologies I am grateful to Markus Ladurner for his support during my PhD time. The cooperation with his group has always been interesting and helpful. Special thanks to Robert Illing, Bernhard Auer and many others. In addition, I would like to thank for the support of several departments at Infineon, namely the layout group during test chip designs and the failure analysis group for their professional work, as well as for the discussions and information from technology and quality departments.

Last but not least, I would like to thank my family and friends. To all my friends, thank you for the time we had together in the last years. Without our social and various sportive activities it would not

---

have been possible. Und abschließend möchte ich vor allem meiner Familie ein großes Dankeschön aussprechen. Ihr habt mir diesen Weg ermöglicht und dank euch stehe ich jetzt hier.



---

## Abstract

---

In the past, the minimum chip area of power semiconductor devices was mainly limited by on-resistance and current carrying requirements. Due to continuous shrinking of technology features, the dissipated power density within the device is increasing, requiring integrated protection functions which are able to detect and react on the microsecond time scale. An inevitable consequence are short but severe thermal stress pulses exhibiting large peak temperatures and gradients, which are the driving forces responsible for sudden destruction due to thermal runaway as well as for fatigue phenomena during repetitive stress cycling. On the one hand, peak junction temperature is the important parameter triggering thermal destructive events, thus responsible for limited device robustness. On the other hand, temperature distribution and temperature gradients within the power device layer structure, especially within the metal stack, are responsible for gradual degradation caused by material fatigue and plastic deformation. As a consequence, the minimum chip area of today's power semiconductor generations is more and more limited by their thermal management. Hence, the thermal characterization of power semiconductor devices is of increasing importance in order to understand failure and degradation mechanisms and eventually to improve device robustness and reliability. Additional challenges for thermal characterization methods are introduced due to

---

the highly dynamic behavior of modern technologies. Thermal analysis methods applied in this thesis are integrated temperature sensor concepts, calibrated transient high-speed IR thermography as well as thermal and electro-thermal finite element method simulation.

The basis for studying heat transfer problems in microelectronic devices are suitable test devices. Within the context of this thesis dedicated test structures with embedded poly-heaters, MOSFET test devices incorporating small embedded temperature sensors as well as various generations of standard MOSFET products are developed, presented and evaluated. Poly-heater devices emulating the heat generation of MOSFET devices are perfectly suited for the comparison of measurements with numerical results. Dedicated MOSFET structures serve as test vehicles for small embedded temperature sensor concepts which are introduced in this thesis. While standard on-chip temperature sensors which are widely applied in microelectronic devices need to be separated from the active MOSFET part by an isolating layer, small embedded sensor concepts are directly placed within the active MOSFET cell array. This approach provides accurate measurement results of intrinsic device temperature without significantly affecting the electro-thermal behavior. However, the described temperature sensors provide only local thermal information, thus additional experimental methods are required to detect spatial temperature variations.

With infrared thermography it is possible to obtain temperature distributions from the test device surface with a spatial and temporal resolution of micrometers and microseconds, respectively. After discussing the theoretical background and reviewing existing methods, the actual test bench available at KAI is discussed. Although latest infrared thermography systems show significant improvements regarding detector technology, the main challenge in the field of transient microscopic thermography is the calibration procedure. Hence, the correlation between radiance and temperature with special caution on target emissivity needs to be derived. An in-situ calibration procedure is presented, considering inherent detector non-uniformities as well as target object emissivity variations. The camera system's non-linearity and non-uniformity are characterized and corrections are implemented accordingly. A suitable fitting method, correlating detected local radiation values with the actual temperature distribution, is presented and verified by experiments on dedicated heating structures with black and

---

reflective surface coatings. Eventually the thermal mapping method is applied to specific test devices as well as to state of the art power semiconductor devices under various operating conditions. The results are verified by electrical measurements and thermal finite element simulations.

While IR thermography is able to measure two-dimensional temperature distributions the method is limited by nontransparent top surface layers such as metals, thus it can only provide thermal information from the visible chip surfaces. Experimental temperature information from the chip volume can be obtained by small embedded temperature sensors, although only at certain locations. Consequently, a method is required that provides a detailed three-dimensional thermal analysis concerning internal temperature distributions and heat flows. Thermal and electro-thermal finite element simulation methods have the potential to provide this data but are limited due to computational constraints when approaching multiscale models. Unfortunately, a typical power MOSFET device has a highly complex vertical layer structure in the sub-micrometer range close to the junction, while in lateral direction the active region of the device extends to several millimeters. In that case, the standard finite element method is limited due to its requirement for conforming meshes. The methods presented in this thesis introduce homogenization concepts as well as non-matching grid interfaces to overcome multiscale complexity restrictions. With the aid of homogenization methods effective orthotropic material parameters are obtained. Non-matching grid interfaces are used to embed complex device structures such as temperature sensors in full detail within the macroscopic averaged chip model, built by effective layer structures. These methods are applied and verified on a dedicated poly-heater test device where simulation and experimental results emphasize the necessity of these methods when dealing with fast transient high power applications.



---

## Kurzfassung

---

Die Anforderungen an minimalen Durchgangswiderstand und maximale Stromtragfähigkeit waren in der Vergangenheit die limitierenden Faktoren für die Bestimmung der Chipfläche von Leistungshalbleitern. Die voranschreitende Miniaturisierung der Strukturbreiten in Leistungstransistortechnologien führt zu einer Steigerung der Verlustleistung, was wiederum den Einsatz integrierter Schutzkonzepte bedingt, welche elektrische und thermische Vorgänge im Mikrosekunden-Bereich detektieren und darauf reagieren. Das Ergebnis sind immer kürzere, aber immer massivere thermische Belastungen im Inneren der Bauteile mit hohen Spitzentemperaturen und großen Temperaturgradienten. Zum einen ist die maximale Bauteiltemperatur der entscheidende Parameter, verantwortlich für die thermische Zerstörgrenze, welche ein Maß für die Robustheit darstellt. Zum anderen sind die Temperaturreteilung und Temperaturgradienten innerhalb der komplexen Metallisierungsschichten die entscheidenden Kenngrößen bezüglich Degradationsmechanismen, verursacht durch Materialermüdung in Kombination mit plastischer Deformation. Folglich wird die minimale Chipfläche von modernen Bauteilgenerationen immer mehr durch die thermischen Eigenschaften des Systems definiert. Von immer größerem Interesse sind deshalb thermische Charakterisierungsmethoden als Werkzeug zur Untersuchung der Robustheit und Zuverlässigkeit von modernen

---

Leistungstransistoren. Zusätzliche methodische Anforderungen werden durch die hohe thermische Dynamik moderner Leistungstransistor-technologien gestellt. In dieser Arbeit verwendete thermische Charakterisierungsmethoden sind integrierte Temperatursensoren, kalibrierte Hochgeschwindigkeits-IR Thermographie und elektro-thermische Finite-Elemente Simulation.

Für eine detaillierte Untersuchung der Wärmeübertragung in mikro-elektronischen Bauteilen werden geeignete Testchips benötigt. Der erste Teil dieser Arbeit befasst sich mit der Entwicklung, Darstellung und Evaluierung der verwendeten Testchips. Diese sind spezielle Teststrukturen mit integrierten Heizelementen, MOSFET Testbauteile mit mikroskopisch eingebetteten Temperatursensoren sowie gewöhnliche Leistungstransistoren verschiedenster Technologie-Generationen. Teststrukturen mit integrierten Heizelementen emulieren die Wärmeerzeugung vergleichbarer Leistungstransistoren und sind daher ideal geeignet für den Vergleich experimenteller Ergebnisse mit numerischen Daten. Zur Erprobung neuer Sensorkonzepte werden im Zuge dieser Arbeit spezielle MOSFET-Strukturen verwendet. Die neuartigen Temperatursensoren werden dabei direkt im aktiven MOSFET Zellenfeld platziert und müssen nicht wie aktuelle Temperatursensoren durch eine relativ dicke Isolationsschicht von dem aktiven MOSFET Bereich getrennt werden. Dadurch ist es möglich, die Temperatur direkt aus der Quellenregion zu messen, ohne das elektro-thermische Verhalten des Bauteils zu beeinflussen. Das heißt, es lassen sich damit lokale Temperaturinformationen aus dem Bauteilinneren gewinnen, allerdings werden für die Darstellung von Temperaturverteilungen zusätzliche experimentelle Methoden benötigt.

Mit Hilfe von Infrarot-Thermographie ist es möglich, Temperaturverteilungen mit Mikrometer - Ortsauflösung und Mikrosekunden- Zeitauflösung auf Bauteil-Oberflächen zu erfassen. Dazu wird nach einer umfassenden Literaturübersicht der am KAI verfügbare Messplatz vorgestellt. Obwohl sich in den letzten Jahren kommerziell verfügbare Infrarot-Detektoren laufend verbessert haben, liegt die größte Herausforderung bei der Temperaturmessung an reflektierenden Oberflächen immer noch bei der Kalibrierung. Deshalb geht der Fokus in diesem Teil der Arbeit Richtung Kalibriermethodik, also der Aufgabe, gemessene Strahlenwerte mit Temperaturwerten zu korrelieren, unter Berücksichtigung variierender Objektemissivität. Dazu wird eine in-situ Ka-

---

libriermethode vorgestellt, welche es ermöglicht, Inhomogenitäten des Detektors als auch Variationen der Emissivität am Messobjekt zu berücksichtigen und zu kompensieren. Zur Korrelation der Messwerte mit Temperaturen wird eine Fitting-Methode aus dem Strahlungsgesetz abgeleitet und anhand spezieller Teststrukturen experimentell überprüft. Abschließend wird die beschriebene optische Charakterisierungsmethode sowohl an speziellen Testbauteilen als auch an aktuellen Bauteilgenerationen unter verschiedensten Betriebszuständen angewandt. Mit Hilfe elektrischer Messungen und thermischer Finite - Elemente Simulation werden die Ergebnisse verifiziert.

Durch den Einsatz in-situ kalibrierter IR Thermographie lassen sich also Oberflächentemperaturverteilungen erfassen, wobei nicht-transparente Schichten, typischerweise Metallschichten in mikroelektronischen Bauteilen, diese Methode auf Oberflächenmessungen einschränken. Lokale Temperaturinformationen können mit Hilfe eingebetteter Temperatursensoren bestimmt werden. Für die Darstellung einer detaillierten drei-dimensionalen Temperaturverteilung mit zugehörigen Wärmeströmen werden numerische Simulationen benötigt. Grundsätzlich kommen dazu thermische oder elektro - thermische Finite-Elemente Simulationen zum Einsatz. Gewöhnliche Finite-Elemente Methoden sind allerdings limitiert bezüglich der Anzahl an Unbekannten und verfügbarer Rechenleistung wenn es sich um Multiskalen-Probleme handelt. Der sehr komplexe Aufbau aktueller Leistungshalbleitertechnologien mit heterogenen vertikalen Strukturen im submikroskopischen Bereich in Kombination mit lateralen Dimensionen im Millimeter-Bereich führt zu klassischen Multiskalen-Problemen. Durch Anwendung der klassischen Finite-Elemente Methode mit konformen Gittermodellen sind solche Probleme nicht mehr lösbar. In dieser Arbeit werden zwei Konzepte dargestellt, welche eine mögliche Lösung solcher Multiskalen-Probleme in mikroelektronischen Bauteilen liefern. Zum einen werden mit Hilfe thermischer Homogenisierungsansätze repräsentative effektive Materialparameter für bestimmte periodische Detailstrukturen gewonnen. Zum anderen werden nicht-konforme Gitterkonzepte dazu verwendet, komplexe Detailstrukturen, wie zum Beispiel geometrische Details von Temperatursensoren, innerhalb eines gemittelten Modells einzubetten. Abschließend werden die entwickelten Methoden an einem konkreten Testchip angewandt und mit experimentellen Ergebnissen verifiziert.



---

## Contents

---

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>1</b>
1.1	Motivation . . . . .	1
1.2	State of the art . . . . .	3
1.3	Novelty statement . . . . .	8
1.4	Structure of the thesis . . . . .	10
<b>2</b>	<b>Test Device Description</b>	<b>11</b>
2.1	Theory . . . . .	11
2.1.1	Basics of power transistors . . . . .	11
2.1.2	MOSFET characteristics . . . . .	14
2.1.3	Smart power switches . . . . .	18
2.2	Test device overview . . . . .	21
2.2.1	Poly-heater structures . . . . .	22
2.2.2	MOSFET test structures . . . . .	24
2.2.3	MOSFET products . . . . .	26
2.3	Temperature sensor concepts . . . . .	28
2.3.1	Existing temperature sensor concepts . . . . .	28
2.3.2	Integrated parasitic bipolar temperature sensors	30
2.3.3	Integrated resistive silicon temperature sensors .	32

<b>3 Infrared Thermography</b>	<b>39</b>
3.1 Background and theory . . . . .	39
3.1.1 Electromagnetic spectrum . . . . .	39
3.1.2 Reflection, absorption and transmission . . . . .	41
3.1.3 Black body radiation . . . . .	43
3.1.4 Emissivity . . . . .	45
3.1.5 Radiometric measurement systems . . . . .	48
3.1.6 Optical basics . . . . .	52
3.2 Microscopic infrared test bench . . . . .	54
3.3 Measurement chain . . . . .	58
3.4 Camera characterization . . . . .	62
3.4.1 Temperature, radiance and digital raw data . . . . .	64
3.4.2 Detector non-uniformity . . . . .	67
3.5 Calibration . . . . .	73
3.5.1 The influence of emissivity . . . . .	75
3.5.2 In-situ calibration and uncertainties . . . . .	78
3.5.3 Heating procedure . . . . .	80
3.5.4 Fitting, extrapolation and verification . . . . .	83
3.5.5 Image processing . . . . .	85
3.5.6 Summary . . . . .	89
3.6 Application . . . . .	90
3.6.1 Impact of integration time on temperature measurements . . . . .	90
3.6.2 Impact of integration time on image resolution . . . . .	92
3.6.3 Transient temperature mapping - verification of dedicated test structures . . . . .	93
3.6.4 Transient temperature mapping - smart power products under short circuit stress . . . . .	97
3.6.5 Transient temperature mapping - comparison of electrical, radiometric and numerical methods . . . . .	99
3.7 Industrial field of application . . . . .	102
3.7.1 Empirical findings based on thermography . . . . .	102
3.7.2 Improved thermal management of power devices . . . . .	103
3.7.3 Discussions on device robustness . . . . .	107
<b>4 Thermal Modeling</b>	<b>109</b>
4.1 Background and theory . . . . .	109
4.1.1 Heat equation . . . . .	109

4.1.2	Initial and boundary conditions . . . . .	111
4.1.3	FE formulation: thermal . . . . .	113
4.1.4	FE formulation: electro-thermal . . . . .	118
4.2	Finite element simulation . . . . .	122
4.3	Multiscale modeling concepts: Problem description . . .	127
4.4	Multiscale modeling concepts: Homogenization . . . .	129
4.4.1	Effective thermal conductivity . . . . .	130
4.4.2	Effective thermal capacity . . . . .	133
4.5	Multiscale modeling concepts: Non-matching grids . .	138
4.5.1	Nonmatching grids for thermal FE simulations .	138
4.5.2	Numerical example and comparison . . . . .	143
4.6	Verification of multiscale modeling concepts . . . . .	145
4.6.1	Computational homogenization approach for microelectronic devices . . . . .	145
4.6.2	Effective material determination . . . . .	146
4.6.3	Results and discussions . . . . .	149
4.7	Application of multiscale modeling concepts . . . . .	156
4.7.1	Implementation to microelectronic devices . . . .	156
4.7.2	Boundary conditions and calibration . . . . .	157
4.7.3	Results and discussions . . . . .	161
<b>5</b>	<b>Summary and Outlook</b>	<b>167</b>
<b>A</b>	<b>Appendix: Material parameters</b>	<b>173</b>
A.1	Dielectrics . . . . .	173
A.2	Metals . . . . .	174
A.3	Silicon . . . . .	175
A.4	Effective materials . . . . .	176
<b>B</b>	<b>Appendix: Penetration depth of electromagnetic radiation</b>	<b>179</b>
<b>List of Figures</b>		<b>183</b>
<b>List of Tables</b>		<b>189</b>
<b>Bibliography</b>		<b>191</b>
<b>Own Publications</b>		<b>215</b>

*Contents*

---

<b>Acronyms</b>	<b>219</b>
<b>Symbols</b>	<b>223</b>