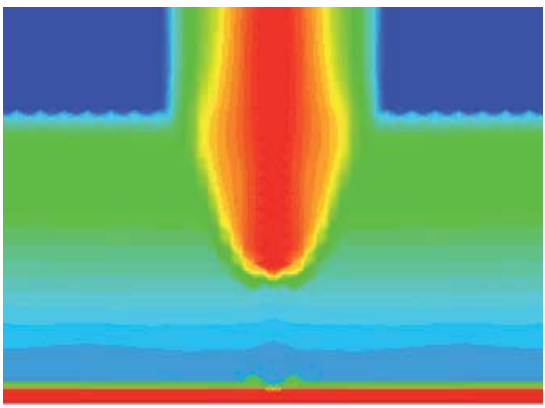
Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik
der Technischen Universität München
Lehrstuhl für Technische Elektrophysik

Höhenstrahlungsresistenz von Silizium-Hochleistungsbauelementen

Christoph Weiß



Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik
der Technischen Universität München
Lehrstuhl für Technische Elektrophysik

Höhenstrahlungsresistenz von Silizium-Hochleistungsbauelementen

Christoph Martin Weiß

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktors der Naturwissenschaften (Dr. rer. nat.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender:		Univ.-Prof. Dr. Josef Kindersberger
Prüfer der Dissertation:	1.	Univ.-Prof. Dr. Gerhard Wachutka
	2.	apl. Prof. Dr. Martin S. Brandt
	3.	Univ.-Prof. Dr. Nando Kaminski, Universität Bremen

Die Dissertation wurde am 25.02.2013 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik am 24.11.2014 angenommen.

Selected Topics of Electronics and Micromechatronics
Ausgewählte Probleme der Elektronik und Mikromechatronik

Volume 46

Christoph Weiß

Höhenstrahlungsresistenz von Silizium-Hochleistungsbauelementen

Shaker Verlag
Aachen 2015

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über http://dnb.d-nb.de abrufbar.

Zugl.: München, Techn. Univ., Diss., 2015

Copyright Shaker Verlag 2015
Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-3464-6
ISSN 1618-7539

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen
Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9
Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Kurzzusammenfassung

Als die kosmische Strahlung in den frühen 1990er Jahren als Ursache für spontane Ausfälle von Silizium-Leistungsbauelementen identifiziert werden konnte, wurden die möglichen Fehlermechanismen in zahlreichen experimentellen und numerischen Studien untersucht. Eine durchgängige konsistente physikalische Erklärung der Prozesse, die vom Teilcheneinschlag bis zur thermischen Zerstörung eines Bauelements führen, konnte bis vor kurzem nicht gegeben werden.

In dieser Dissertation wird ein physikalisches Modell vorgestellt, das das mikroskopische Verhalten im Inneren von Silizium-Leistungsbauelementen - basierend auf numerischen Simulationen - beschreibt und dabei ein tiefes Verständnis des Fehlermechanismus liefert.

Das Modell ermöglicht eine prädiktive Fehler- und Robustheitsanalyse verschiedener Bauelement-Designs.

Abstract

Since cosmic radiation had been identified as a cause for spontaneous failures in silicon high power devices in the early 1990s, the failure mechanisms were investigated by a multitude of experimental and numerical studies. However, a fundamental physical explanation of the consecutive processes, which lead from the impact of a cosmic particle to the thermal breakdown of the device, was not yet established.

In this dissertation a physical model is presented which describes the microscopic behavior inside silicon power devices on the basis of numerical simulation and, in this way, gains a detailed insight into and understanding of the failure mechanism.

The model makes a predictive failure and robustness analysis of different device designs possible.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung 1

1.1 Hochleistungsbauelemente 1

1.2 Ausfallmechanismen von Hochleistungsbauelementen 1

1.3 Numerische Bauelementesimulation 2

1.4 Ziele und Inhalte dieser Arbeit 3

2. Grundlagen 5

2.1 Ausfallproblematik 5

2.2 Wechselwirkung von Höhenstrahlung mit Silizium 6

2.2.1 Für den Ausfall relevante Elementarteilchen 7

2.2.2 Eindringtiefe von leichten Ionen in Silizium 8

2.3 Die sperrgepolte *pin*-Diode 10

2.4 Kurzfassung des Ausfallmechanismus 13

3. Experimente 17

3.1 Ausfallratenbestimmung durch Nukleonenbestrahlung 18

3.2 Ionenbestrahlungsexperimente 19

4. Simulation des Ausfallmechanismus 21

4.1 Simulationsmodelle 21

4.1.1 Drift-Diffusions-Modell 21

4.1.2 Physikalische Parametermodelle 23

4.1.2.1 Beweglichkeiten 24

4.1.2.2 Träger-Rekombination 25

4.1.2.3 Träger-Generation durch ionisierendes Teilchen 26

4.1.2.4 Stoßionisation 27
4.1.3 Berechnung der lokalen Erwärmung 30
4.1.3.1 Elektrothermisch selbstkonsistente Kopplung 32
4.1.3.2 Abschätzung mit einer *a-posteriori*-Methode 33
4.1.4 Simulationsgebiet, Diskretisierung und Randbedingungen 35
4.1.4.1 Zylindersymmetrisches Simulationsgebiet 35
4.1.4.2 Diskretisierung 36
4.1.4.3 Randbedingungen 37
4.2 Simulationsergebnisse 39
4.2.1 Isotherme Simulationen 39
4.2.2 Untersuchung von Zerstörungsmechanismen mit Hilfe elektrothermisch gekoppelter Simulationen 45
4.2.2.1 Kritischer Bereich 1: Die Anode 45
4.2.2.2 Kritischer Bereich 2: Die Diodenmitte 46
4.2.2.3 Kritischer Bereich 3: Die Kathode 47
4.2.2.4 Zusammenfassung der Zerstörungsmechanismen 50
4.3 Kritische Diskussion der verwendeten Modelle und Näherungen 51
4.3.1 Anwendbarkeit des thermodynamischen Transportmodells 51
4.3.2 Stoßionisation als lokales Modell 53
4.3.3 Geschwindigkeit der elektrischen Feldspitze 55

5. Robustheit gegen höhenstrahlungsinduzierte Ausfälle 57
5.1 Leistungsdioden 57
5.1.1 Einfluss der Substratdotierung 58
5.1.2 Einfluss der Basisdicke 60
5.1.3 Einfluss des Kathodendesigns 62
5.1.4 Einfluss des Feldstopps 64
5.1.5 Einfluss des Anodendesigns 65
5.1.6 Zusammenfassung und Designempfehlungen 70
5.2 Insulated Gate Bipolar Transistoren (IGBT) 71
5.2.1 Grundlagen 71

5.2.2 Simulation des Teilcheneinfalls in eine IGBT-Zelle 72
5.3 Superjunction-MOS-Transistoren (CoolMOS) 75
5.3.1 Grundlagen 75
5.3.2 Vereinfachte Geometrie zur Simulation des Teilcheneinfalls . . . 77
5.3.3 Simulationsergebnisse 77
5.3.4 Grenzen der Simulationsmethodik 79

6. Zusammenfassung 81

7. Ausblick 83

Literaturverzeichnis 84

Danke 93