

## Reihe 9

Elektronik/Mikro  
und Nanotechnik

Nr. 395

Dipl.-Ing. Matthias Thiele,  
Dresden

# Elektromigration und deren Berücksichtigung beim zukünftigen Layoutentwurf digitaler Schaltungen



Technische Universität Dresden  
Institut für Feinwerktechnik  
und Elektronik-Design  
Institutsdirektor Prof. Dr.-Ing. habil. Jens Lienig

**ifte**



Technische Universität Dresden

# **Elektromigration und deren Berücksichtigung beim zukünftigen Layoutentwurf digitaler Schaltungen**

**Matthias Thiele**

von der Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik der  
Technischen Universität Dresden  
zur Erlangung des akademischen Grades eines

**Doktoringenieurs**  
(Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. habil. Fischer

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Lienig    Tag der Einreichung: 15.11.2016  
Prof. Dr. rer. nat. Brück    Tag der Verteidigung: 09.02.2017



# Fortschritt-Berichte VDI

## Reihe 9

Elektronik/Mikro-  
und Nanotechnik

Dipl.-Ing. Matthias Thiele,  
Dresden

## Nr. 395

# Elektromigration und deren Berücksichtigung beim zukünftigen Layoutentwurf digitaler Schaltungen



Technische Universität Dresden  
Institut für Feinwerktechnik  
und Elektronik-Design  
Institutsdirektor Prof. Dr.-Ing. habil. Jens Lienig



Thiele, Matthias

## **Elektromigration und deren Berücksichtigung beim zukünftigen Layoutentwurf digitaler Schaltungen**

Fortschr.-Ber. VDI Reihe 9 Nr. 395. Düsseldorf: VDI Verlag 2017.

158 Seiten, 58 Bilder, 9 Tabellen.

ISBN 978-3-18-339509-5, ISSN 0178-9422,

€ 57,00/VDI-Mitgliederpreis € 51,30.

**Für die Dokumentation:** Elektromigration – Entwurfsautomatisierung – Finite-Elemente-Methode – Entwurfsregeln – Verdrahtung – Stromdichte – Blech-Länge – CNT – Semiconductor Roadmap

Elektromigration ist momentan einer der begrenzenden Effekte für die Verkleinerung von Strukturgrößen in der Mikroelektronik. Dies begründet sich durch steigende Stromdichten bei sinkenden Leiterquerschnitten. Dadurch sinkt die Zuverlässigkeit der Leitbahnen. Diese Arbeit untersucht Methoden zur Verhinderung von Elektromigrationsschäden im Verdrahtungsentwurf digitaler Schaltkreise mit Strukturgrößen von weniger als 20 nm. Ziel ist es, neue Entwurfsregeln und Strategien für robuste Schaltkreise zu entwickeln. Erstmals steht der Entwurf digitaler Schaltkreise unter Berücksichtigung von Nanotechniken im Mittelpunkt. Es wird gezeigt, dass auch bei weiterer Verkleinerung der Verdrahtungsstrukturen elektromigrationsrobuste Schaltungen möglich sind. Die vorliegende Arbeit wendet sich vorrangig an Ingenieure und Wissenschaftler auf dem Gebiet der Entwurfsautomatisierung.

### **Bibliographische Information der Deutschen Bibliothek**

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliographie; detaillierte bibliographische Daten sind im Internet unter <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

### **Bibliographic information published by the Deutsche Bibliothek**

(German National Library)

The Deutsche Bibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliographie (German National Bibliography); detailed bibliographic data is available via Internet at <http://dnb.ddb.de>.

© VDI Verlag GmbH · Düsseldorf 2017

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe (Fotokopie, Mikrokopie), der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, im Internet und das der Übersetzung, vorbehalten.

Als Manuskript gedruckt. Printed in Germany.

ISSN 0178-9422

ISBN 978-3-18-339509-5

---

# Vorwort

Diese Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit am Institut für Feinwerktechnik und Elektronik-Design (IFTE) zunächst im Graduiertenkolleg „Nano- und Biotechniken für das Packaging elektronischer Systeme“. In meiner anschließenden Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am IFTE konnte ich die vorliegende Arbeit fertigstellen. Ich danke meinem Doktorvater Herrn Professor Jens Lienig für die fachkundige Hilfe und Unterstützung sowie für die Geduld in dieser Zeit.

An dieser Stelle möchte ich der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die finanzielle Unterstützung sowie Prof. Dr.-Ing. habil. Gerald Gerlach und Frau Dr.-Ing. Bärbel Knöfel für die lehrreiche und schöne Zeit im Graduiertenkolleg danken. Darüber hinaus danke ich den Kollegiaten des Graduiertenkollegs und zahlreichen Mitarbeitern des Instituts für Aufbau- und Verbindungstechnik der Elektronik und des Instituts für Halbleiter- und Mikrosystemtechnik sowie Dr. rer. nat. Paulius Sakalas für die Unterstützung bei der Vorbereitung und Durchführung von Messungen. Für die organisatorische Unterstützung und die fachlichen Diskussionen danke ich insbesondere Prof. Dr.-Ing. Thomas Zerna und Prof. Dr.-Ing. habil. Klaus-Jürgen Wolter. Göran Jerke und Shanthi Siemes danke ich für die Daten aus der Industrie.

Für die vielen hilfreichen Korrekturhinweise während der Erstellung des Manuskripts danke ich besonders Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h. c. Werner Krause, Prof. Dr.-Ing. habil. Jens Lienig, Elisabeth Thiele, Josephine Stapel, Katja Rohatsch, Andreas Krinke und Steve Bigalke.

Prof. Dr.-Ing. habil. Jens Lienig und Prof. Dr. rer. nat. Rainer Brück danke ich für die Begutachtung meiner Dissertation, Prof. Dr.-Ing. habil. Wolf-Joachim Fischer und Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Karl-Heinz Bock für den Vorsitz bzw. die erfolgreiche Durchführung des Promotionsverfahrens. Ein besonderer Dank gilt meinen Kollegen Dr.-Ing. Frank Reifegerste, Dr.-Ing. Thomas Bödrich und

---

Andreas Krinke, die mit mir das Büro und einige Sorgen teilten und mir oft genug die nötige Motivation gaben, für viele konstruktive Gespräche. Nicht zuletzt danke ich meiner Familie und besonders meiner Frau Elisabeth für den nötigen Rückhalt und die Unterstützung auch in schwierigen Phasen.



---

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Entwicklung der Halbleitertechnologie . . . . .	1
1.2	Entwicklung bei Leitbahnen . . . . .	2
1.3	Motivation . . . . .	4
<b>2</b>	<b>Grundlagen</b>	<b>7</b>
2.1	Elektromigration . . . . .	7
2.1.1	Allgemeines zur Elektromigration . . . . .	7
2.1.2	Möglichkeiten der Quantifizierung . . . . .	8
2.1.3	Einflussgrößen . . . . .	11
2.2	Mechanismen bei der Elektromigration . . . . .	14
2.2.1	Kristallstruktur und Diffusionsmechanismen . . . . .	14
2.2.2	Barrieren bei Kupfermetallisierungen . . . . .	18
2.2.3	Einfluss durch mechanische Spannungen . . . . .	21
2.2.4	Zusammenspiel der Migrationsarten . . . . .	23
2.2.5	Frequenzabhängigkeit der EM . . . . .	25
2.3	Berücksichtigung von EM im Layoutentwurf . . . . .	29
2.3.1	Einordnung in den Layoutentwurf . . . . .	29
2.3.2	Besonderheiten des digitalen Layoutentwurfs . . . . .	31
2.3.3	Berücksichtigung von EM im digitalen Layoutentwurf . . .	33
<b>3</b>	<b>Zielstellung der Arbeit</b>	<b>36</b>
3.1	Hintergrund und Fragestellungen . . . . .	36
3.2	Einordnung der Arbeit in den Gesamtkontext . . . . .	39
<b>4</b>	<b>Entwicklungstrends bei digitalen Schaltungen</b>	<b>40</b>
4.1	Moore'sches Gesetz und Roadmap ITRS . . . . .	40
4.2	Verhinderung von EM-Schäden . . . . .	45

<b>5 Methoden für EM-robuste digitale Schaltungen</b>	<b>47</b>
5.1 Übersicht über die Methoden . . . . .	47
5.2 Bambus-Effekt . . . . .	50
5.2.1 Physikalischer Hintergrund . . . . .	50
5.2.2 Anwendung . . . . .	52
5.3 Längeneffekte . . . . .	55
5.3.1 Physikalischer Hintergrund . . . . .	55
5.3.2 Bedeutung für Technologie und Entwurf . . . . .	62
5.4 Via-below- und Via-above-Konfigurationen . . . . .	67
5.4.1 Grundlagen . . . . .	67
5.4.2 Parameter . . . . .	68
5.4.3 Vergleich mit aktuellen Technologien . . . . .	69
5.4.4 Anwendung . . . . .	69
5.5 Reservoirs . . . . .	71
5.5.1 Grundlagen . . . . .	71
5.5.2 Quellen und Senken . . . . .	71
5.5.3 Erscheinungsformen . . . . .	72
5.5.4 Anwendung . . . . .	73
5.6 Mehrfach-Vias . . . . .	76
5.6.1 Grundlagen . . . . .	76
5.6.2 Stromverteilung . . . . .	77
5.6.3 Reservoirs . . . . .	78
5.6.4 Bedeutung der geometrischen Anordnung . . . . .	79
5.6.5 Aktuelle Bedeutung redundanter Vias . . . . .	82
5.6.6 Parameter und Hinweise zur Anwendung bei EM . . . . .	82
5.7 Frequenzabhängige Effekte . . . . .	84
5.7.1 Selbstheilung und steigende Frequenzen . . . . .	84
5.7.2 Konsequenzen . . . . .	85
5.8 Werkstoffe bei klassischer Metallverdrahtung . . . . .	87
5.8.1 Leiterwerkstoff . . . . .	88
5.8.2 Dielektrikum . . . . .	89
5.8.3 Barriere . . . . .	91
5.9 Neue Werkstoffe und Technologien . . . . .	95
5.9.1 Kohlenstoffbasierte Lösungen . . . . .	95
5.9.2 Eigenschaften der CNT . . . . .	97
5.9.3 Auswirkungen auf den zukünftigen Layoutentwurf . . . . .	98

5.10 Zusammenfassung . . . . . 100

**6 Ausgewählte Untersuchungen 102**

6.1 Simulationsmethoden . . . . . 102

6.1.1 Stromdichtesimulation mit Finiten Elementen . . . . . 104

6.1.2 Besonderheiten herkömmlicher Technologien . . . . . 106

6.1.3 Simulation neuer Technologien . . . . . 107

6.2 Versuchsmethoden der experimentellen Validierung . . . . . 107

6.3 Ergebnisse der Untersuchungen . . . . . 111

6.3.1 Längeneffekte . . . . . 111

6.3.2 Reservoirs . . . . . 117

6.3.3 Kohlenstoffnanoröhren . . . . . 121

6.4 Zusammenfassung . . . . . 124

**7 Gesamtzusammenfassung und Ausblick 125**

7.1 Zusammenfassung der Arbeit . . . . . 125

7.2 Ausblick: Bibliothek robuster Layoutelemente . . . . . 129

7.3 Ausblick: Nutzung von neuen Technologien . . . . . 129

7.4 Zukünftige Nutzung der Ergebnisse . . . . . 130

**Glossar 132**

**Literaturverzeichnis 134**

---

# Abkürzungsverzeichnis

<b>Bezeichnung</b>	<b>Beschreibung</b>
ASIC	Application Specific Integrated Circuit
CMP	Chemical Mechanical Polishing
CNF	Kohlenstoffnanofaser
CNT	Kohlenstoffnanoröhre
CVD	Chemical Vapor Deposition
EM	Elektromigration
FEM	Finite-Elemente-Methode
ILD	Inter Layer Dielectric
ITRS	International Technology Roadmap for Semiconductors
PC	Personal Computer
REM	Raster-Elektronen-Mikroskopie
RFID	Radio-Frequency Identification
SiP	System-in-Package
SM	Stressmigration
SMU	Source Measure Unit
SoC	System-on-a-Chip
TSV	Through Silicon Via

---

# Kurzfassung

Elektromigration ist momentan einer der begrenzenden Effekte für die Verkleinerung von Strukturgrößen in der Mikroelektronik. Ziel der Arbeit ist es, fundierte Vorgaben für den Layoutentwurf digitaler Schaltkreise zu erarbeiten, die es ermöglichen, auch zukünftig elektromigrationsrobuste Schaltungen zu entwerfen. Es werden Möglichkeiten aufgezeigt, wie trotz kleinerer Strukturen eine hohe Elektromigrationsrobustheit erreicht wird. Dazu sind verschiedene Techniken auszunutzen.

Nach dem aktuellen Stand der Technik erreicht die bisherige Technologie in der Mikroelektronik ihre Begrenzung durch Elektromigration. Dies begründet sich durch steigende Stromdichten bei sinkenden Leiterquerschnitten. Dadurch sinkt die Zuverlässigkeit der Leiterbahnen. Mit dieser Arbeit wird gezeigt, dass diese Barriere zu überwinden ist und weitere Verkleinerungen der Strukturen möglich werden. Dabei erfolgt eine Analyse und Zusammenfassung zahlreicher Methoden zur Vermeidung von Elektromigrationsschäden. Die Methoden werden quantitativ analysiert und Vorgaben für den Schaltungs- und Layoutentwurf bei zukünftigen Strukturgrößen erarbeitet. Erstmals wird der Entwurf digitaler Schaltkreise unter Berücksichtigung von Nanotechniken in den Mittelpunkt gesetzt.

Das Thema der Arbeit hat eine herausragende Bedeutung für die zukünftige Entwicklung der Mikroelektronik, da nur durch die Vermeidung der Elektromigration zuverlässige Schaltungen in kleineren Strukturgrößen möglich sind. Es werden Lösungen für aktuelle und zukünftige Probleme im Zusammenhang mit der Elektromigration aufgezeigt. Der direkte Zugriff auf Nanotechniken ermöglicht eine neue Sichtweise auf die Technologien für digitale Schaltungen und erlaubt einen Ausblick in die Zukunft elektromigrationsrobuster Schaltungen.

---

# Abstract

Electromigration is one of the most important constraints for scaling in micro-electronics. It is caused by material transport through high current densities in metal interconnects of integrated circuits. While previously only considered in analog circuits and supply nets, it will be an issue also for signal nets of future digital circuits.

In this thesis, methods preventing electromigration damage in digital integrated circuits are analyzed using finite element analysis and experimental results. The considered methods include the exploitation of bamboo effect, length effect, reservoir effect and material properties. As an outlook, technologies using carbon nanotubes to replace copper interconnects are studied. Finally, specific rules for electromigration robust designs by increasing the current density capability are given.