



**Thermisches Ausdehnungsverhalten von  
MoCu-, WCu–Werkstoffen und FeNi-Schichten für  
mikrosystemtechnische Anwendungen**

zur Erlangung des akademischen Grades eines

**DOKTOR-INGENIEURS**

**(DR.-ING.)**

der Fakultät für Ingenieurwissenschaften  
und Informatik der Universität Ulm

von

**Dipl.-Ing. Bora Koçdemir**

**aus Kdz. Eregli**

1. Gutachter: Prof. Dr. Ulrich Herr

2. Gutachter: Prof. Dr. Raimund Hibst

Amtierender Dekan: Prof. Dr. rer. nat. Helmut Partsch

Ulm, 29. November 2007



Berichte aus der Materialwissenschaft

**Bora Kocdemir**

**Thermisches Ausdehnungsverhalten von MoCu-,  
WCu-Werkstoffen und FeNi-Schichten für  
mikrosystemtechnische Anwendungen**

Shaker Verlag  
Aachen 2008

**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.: Ulm, Univ., Diss., 2007

Copyright Shaker Verlag 2008

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8322-7198-5

ISSN 1618-5722

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

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

<b>Abstract</b> .....	<b>1</b>
<b>1 Einleitung und Motivation</b> .....	<b>3</b>
<b>2 Theoretische Grundlagen</b> .....	<b>7</b>
2.1 Thermische Ausdehnung.....	7
2.2 Systeme Mo-Cu und W-Cu.....	8
2.3 Das System Fe-Ni.....	10
2.3.1 Magnetostriktion .....	11
2.3.2 Invar-Effekt .....	11
2.4 Schichtherstellung .....	16
2.4.1 Galvanische Metallabscheidung.....	16
2.4.2 Metallabscheidung aus der Gasphase.....	18
<b>3 Untersuchungsmethoden</b> .....	<b>21</b>
3.1 Röntgendiffraktometrie .....	21
3.2 Rasterelektronenmikroskopie mit energiedispersiver Röntgen-Mikroanalyse .....	26
3.3 Spannungsanalyse mittels Tencor-Spannungsmessgerät .....	30
3.4 Nanoindentation .....	34
3.4.1 Bestimmung des E-Moduls durch Schicht-Substrat-Modellierung .....	36
3.4.2 Bestimmung der Härte durch Schicht-Substrat-Modellierung.....	37
3.5 Schichtdickenbestimmung durch FRT-Profilometer .....	38
3.6 Laserakustisches Prüfverfahren.....	39
3.7 Rasterkraftmikroskopie .....	40
3.8 Transmissionselektronenmikroskopie (TEM).....	41
3.9 Dynamisch mechanische Analyse (DMA).....	42
<b>4 Probenherstellung</b> .....	<b>45</b>
4.1 Herstellung der MoCu- und WCu-Verbundwerkstoffe.....	45
4.1.1 Flüssigphasensintern .....	46
4.2 Galvanische Abscheidung der FeNi-Schichten.....	49
4.2.1 Aufbau der Galvanikanlage.....	50
4.3 Sputtern der FeNi-Schichten .....	51
4.4 Aufdampfen der FeNi-Schichten .....	52
4.5 Wärmebehandlung der FeNi-Schichten .....	53
4.5.1 Konventionelle Wärmebehandlung.....	53
4.5.2 Lokale Wärmebehandlung mittels Laserstrahlung .....	53
4.5.3 Rapid Thermal Annealing (RTA) .....	55
<b>5 Ergebnisse</b> .....	<b>57</b>
5.1 Die Systeme Mo-Cu und W-Cu .....	57
5.1.1 Mikrostruktur .....	58
5.1.2 Thermische Ausdehnung.....	61
5.1.3 Mechanische Eigenschaften .....	62
5.2 Galvanisch hergestellte FeNi-Schichten .....	67
5.2.1 Chemische Zusammensetzung und Struktur.....	68
5.2.2 Innere Spannung.....	79
5.2.3 Mechanische Eigenschaften .....	82
5.2.4 Thermischer Ausdehnungskoeffizient .....	84
5.3 Gesputterte FeNi-Schichten .....	85
5.3.1 Chemische Zusammensetzung und Struktur.....	85

5.3.2 Innere Spannung.....	90
5.3.3 Thermischer Ausdehnungskoeffizient .....	93
5.4 Aufgedampfte FeNi-Schichten.....	93
5.4.1 Chemische Zusammensetzung und Struktur.....	93
5.4.2 Innere Spannung.....	97
5.4.3 Thermischer Ausdehnungskoeffizient .....	99
5.5 Konventionelle Wärmebehandlung der galvanisch abgeschiedenen FeNi-Schichten	100
5.5.1 Struktur.....	100
5.5.2 Kinetik der Phasenumwandlung .....	101
5.5.3 Innere Spannungen der galvanisch abgeschiedenen FeNi-Schichten .....	107
5.5.4 Thermischer Ausdehnungskoeffizient .....	108
5.6 Lokale Wärmebehandlung mittels Laserbestrahlung.....	108
5.7 Wärmebehandlung mittels RTA.....	115
<b>6 Diskussion der Ergebnisse .....</b>	<b>119</b>
6.1 MoCu- und WCu-Werkstoffe.....	119
6.2 FeNi-Schichten.....	123
6.2.1 Korngröße .....	123
6.2.2 Elastizitätsmodul und Härte .....	124
6.2.3 Innere Spannungen.....	126
6.2.4 Thermischer Ausdehnungskoeffizient .....	131
6.2.4.1 Einfluss der Mikrostruktur und chemischer Zusammensetzung .....	131
6.2.4.2 Einfluss von Au-Schicht.....	133
6.2.4.3 Einfluss von Spannungen.....	135
<b>7 Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>139</b>
<b>Anhang1: Schaltspannung eines MEMS-Schalters.....</b>	<b>141</b>
<b>Anhang2: Ableitung der thermischen Ausdehnung.....</b>	<b>143</b>
<b>Anhang3: Literaturverzeichnis.....</b>	<b>146</b>
<b>Anhang4: Verzeichnis der Abkürzungen und Symbole .....</b>	<b>152</b>
<b>Anhang5: Danksagung .....</b>	<b>154</b>
<b>Anhang6: Wissenschaftliche Publikationen .....</b>	<b>155</b>
<b>Anhang7: Lebenslauf .....</b>	<b>157</b>