



Mohamad Sbeiti

## Thermomechanische Beschreibung der Ausbildung einer intermetallischen Phase beim Ultraschall-Wedge/Wedge-Drahtbonden im Rahmen der Theorie der materiellen Kräfte



Cuvillier Verlag Göttingen  
Internationaler wissenschaftlicher Fachverlag





Thermomechanische Beschreibung der  
Ausbildung einer intermetallischen Phase beim  
Ultraschall-Wedge/Wedge-Drahtbonden im Rahmen der Theorie der materiellen Kräfte





# **Thermomechanische Beschreibung der Ausbildung einer intermetallischen Phase beim Ultraschall-Wedge/Wedge-Drahtbonden im Rahmen der Theorie der materiellen Kräfte**

vorgelegt von  
Dipl.-Ing. Mohamad Sbeiti  
aus Kharayeb / Libanon

von der Fakultät V  
Verkehrs- und Maschinensysteme  
der Technischen Universität Berlin  
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

Promotionsausschuss

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Utz von Wagner  
Gutachter: Prof. Dr. rer. nat. Wolfgang H. Müller  
Gutachter: Dr.-Ing. Martin Schneider-Ramelow  
Gutachter: Dr.-Ing. Olaf Wittler

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 27.02.2013

Berlin 2013

D 83



### **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.

1. Aufl. - Göttingen : Cuvillier, 2013

Zugl.: (TU) Berlin, Univ., Diss., 2013

978-3-95404-446-7

© CUVILLIER VERLAG, Göttingen 2013

Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen

Telefon: 0551-54724-0

Telefax: 0551-54724-21

[www.cuvillier.de](http://www.cuvillier.de)

Alle Rechte vorbehalten. Ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlages ist es nicht gestattet, das Buch oder Teile daraus auf fotomechanischem Weg (Fotokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen.

1. Auflage, 2013

Gedruckt auf säurefreiem Papier

978-3-95404-446-7



## Technische Universität Berlin

Fakultät V, Verkehrs- und Maschinensysteme  
Institut für Mechanik  
Lehrstuhl für Kontinuumsmechanik und Materialtheorie  
Skr. MS2  
Einsteinufer 5  
D-10587 Berlin



### Promotionsausschuss

**Vorsitzender:**

Prof. Dr.-Ing. Utz von Wagner  
Technische Universität Berlin  
Institut für Mechanik  
Fachgebiet Mechatronische Maschinendynamik  
Skr. MS1  
Einsteinufer 5  
D-10587 Berlin

**Erstgutachter:**

Prof. Dr. rer. nat. Wolfgang H. Müller  
Technische Universität Berlin  
Institut für Mechanik  
Fachgebiet Kontinuumsmechanik und Materialtheorie  
Skr. MS2  
Einsteinufer 5  
D-10587 Berlin

**Zweitgutachter:**

Dr.-Ing. Martin Schneider-Ramelow  
Fraunhofer Institut für Zuverlässigkeit und Mikrointegration (IZM)  
Abteilung System Integration and Interconnection Technologies  
Gustav-Meyer-Allee 25  
D-13355 Berlin

**Drittgutachter:**

Dr.-Ing. Olaf Wittler  
Fraunhofer Institut für Zuverlässigkeit und Mikrointegration (IZM)  
Abteilung Environmental & Reliability Engineering  
Gustav-Meyer-Allee 25  
D-13355 Berlin

**Tag der wissenschaftlichen Aussprache:** 27.02.2013





*„Das Leben ist wie Radfahren.  
Um das Gleichgewicht zu halten,  
muss man in Bewegung bleiben.“*

Albert Einstein

## **Kontakt**

mohamad.sbeiti@yahoo.com





## Danksagung

Die vorliegende Arbeit ist während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Kontinuumsmechanik und Materialtheorie (LKM) der Technischen Universität Berlin und durch die Zusammenarbeit des Lehrstuhls mit dem Fraunhofer Institut für Zuverlässigkeit und Mikrointegration (IZM) entstanden.

Die dargestellten Ergebnisse wurden im Rahmen des von der Deutschen Forschungsgemeinschaft finanzierten Projekts MU 1752/23-1 zum Thema Drahtbonden erzielt. Für diese Förderung und Unterstützung sei herzlichst gedankt.

Mit der Fertigstellung der Dissertationsschrift ist die Zeit gekommen, den Personen zu danken, die mich während der Erstellung dieser Arbeit unterstützt und begleitet haben.

Ganz besonders herzlich möchte ich mich vor allem bei meinem Doktorvater Herrn Prof. Wolfgang H. Müller für die intensive und fachkundige Betreuung bedanken. Nur durch seine hilfreichen Tipps und notwendige Kritik konnte ich diese Arbeit abschließen.

Herrn Dr.-Ing. Martin Schneider-Ramelow danke ich herzlich für die wertvolle Betreuung und Unterstützung bei der Projektbearbeitung und für die Übernahme des zweiten Gutachters.

Ebenso zum Dank verpflichtet bin ich Herrn Dr.-Ing. Olaf Wittler für die Übernahme des dritten Gutachtens.

Ein großes Dankeschön geht auch an Frau Dr.-Ing. Ute Geißler und Herrn Dipl.-Ing. Stefan Schmitz vom IZM für die Diskussion und den Gedankenaustausch sowie für die Durchführung der Bond- und FIB-Untersuchungen.

Die Zeit am LKM wird mir aufgrund der freundlichen und angenehmen Arbeitsatmosphäre stets in positiver Erinnerung bleiben. An dieser Stelle möchte ich allen Kollegen und Mitarbeitern am LKM meinen Dank aussprechen, vor allem: Frau Bärbel Minx u. a. für die Korrekturlesung, Herrn Ralf Wille, Herrn Arion Juritza, Herrn Guido Harnett, Frau Christina Völlmecke, Herrn Christian Liebold, Herrn Andreas Brandmair, Herrn Holger Worrack, Herrn Paul Lofink und Herrn Emek Abali.

Nicht zuletzt bedanke ich mich sehr herzlich bei meinen Eltern und meiner Frau für die Unterstützung und stetige Ermutigung.

Berlin, im Juni 2013

*Mohamad Sbeiti*



## Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Interpretation und Beschreibung der Bildung von intermetallischen Phasen zwischen dem Drahtwerkstoff und der Substratmetallisierung während des Ultraschall (US)-Wedge/Wedge-Drahtbondens.

Mit Hilfe von thermomechanisch gekoppelten Finite-Elemente (FE)-Simulationen werden hier die herrschenden Temperaturwerte während des Bondprozesses eingegrenzt sowie die im Draht und am Interface zwischen dem Draht und der Substratmetallisierung erzeugten Spannungs- und Dehnungszustände berechnet. Daraus ergibt sich eine maximale Temperatur von ca. 88 °C, welche jedoch nach dem klassischen Diffusionsgesetz für die Bildung der  $\text{Au}_8\text{Al}_3$ -Phase mit einer Dicke von etwa 30 bis 40 nm nicht ausreichend ist.

Aus diesem Grund wird aus der Theorie der materiellen Kräfte ein linearer Zusammenhang zwischen der Massenflussrate und der thermomechanischen Kraft am Interface entwickelt, um die bondparameter- und zeitabhängige Ausbildung der intermetallischen Phasen mit den herrschenden mechanischen Spannungen zu koppeln.

Darüber hinaus werden Bonduntersuchungen mit verschiedenen US-Leistungen sowie mit optimierten Parametern durchgeführt, die jedoch an bestimmten Bondzeitpunkten abgebrochen wurden. Anschließend werden die Dicken der sich dabei gebildeten intermetallischen Phasen experimentell ermittelt.

Durch den Vergleich der FE-Simulationen mit den vermessenen IP-Dicken lässt sich ein Wachstumsgesetz für die Ausbildung der intermetallischen Phasen herleiten, mit dessen Hilfe die IP-Dicke nur durch Simulation der beim Bonden aufgezeichneten Deformationskurve prognostiziert werden kann. Zudem wird für diesen Bondprozess ein effektiver Diffusionskoeffizient in Abhängigkeit der Bondparameter und der thermomechanischen Kraft am Interface berechnet. Es ergibt sich betragsmäßig die gleiche Größenordnung wie bei der klassischen Diffusionsrechnung nach FICK, die für die Erklärung der Interfaceausbildung auf rein thermischem Weg eine Temperatur von 270 bis 330 °C erfordert.



## Abstract

The present work deals with the interpretation and description of the formation of intermetallic phases between the wire material and the substrate metallization during the ultrasonic (US)-wedge/wedge-wire bonding.

In this work coupled thermo-mechanical FE-simulations are performed in order to determine the temperature values occurring during the bonding process as well as to calculate the stress and strain states generated in the wire and at the interface between the wire and the substrate metallization. The maximum temperature obtained is about 88 °C, which is according to the classical diffusion law insufficient to explain the formation of the  $\text{Au}_8\text{Al}_3$ -phase in a range between 30 and 40 nm.

For this reason a linear relationship between the mass flow rate and the thermo-mechanical force at the interface is developed within the theory of material forces. This relationship couples the bonding parameters and time-dependent formation of the intermetallic phases with the dominant mechanical stresses.

In addition to the FE-simulations several bonding experiments are carried out with various values of the ultrasonic power, where some of the optimized bonding processes are terminated at certain points of time. After that the thicknesses of the formed intermetallic phases are determined experimentally.

By comparing the FE-simulations with the measured IP-thicknesses a growth law for the formation of intermetallic phases is derived. With help of this law the IP-thickness can be simply predicted by simulation of the deformation curve of the wire recorded during the bonding process. Furthermore, an effective diffusion coefficient depending on the bonding parameters and the thermo-mechanical force is calculated for this bonding process. It has the same order as in a classical diffusion calculation, which requires a temperature of 270 to 330 °C in order to explain the interface formation by the purely thermal diffusion law according to FICK.





# Inhaltsverzeichnis

<b>Danksagung</b> .....	<b>ix</b>
<b>Kurzfassung</b> .....	<b>x</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>xi</b>
<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>xiii</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>1</b>
1.1 Stand der Technik .....	2
1.2 Motivation und Fragestellung .....	6
1.3 Zielsetzung und Gliederung der Arbeit.....	9
<b>2 Grundlagen der Kontinuumsmechanik</b> .....	<b>11</b>
2.1 Kinematik .....	11
2.1.1 Bestimmung der Lage und Deformation eines Körpers .....	11
2.1.2 Ausgewählte kinematische Beziehungen.....	14
2.1.3 Singuläre Flächen und deren Kompatibilitätsbedingung.....	15
2.2 Materialgesetze .....	17
2.2.1 Verzerrungs- und Spannungstensoren .....	18
2.2.2 Lineare Elastizitätstheorie .....	20
2.2.3 Zeitunabhängige Plastizität.....	23
2.3 Fundamentale Bilanzgleichungen .....	27
2.3.1 Die allgemeine Bilanzgleichung.....	28
2.3.2 Transporttheoreme für Volumina und Flächen.....	29
2.3.3 Bilanzgleichungen für reguläre Punkte.....	31
2.3.4 Sprungbedingungen auf singulären Flächen.....	34
2.4 Theorie der materiellen Kräfte .....	35
2.4.1 ESHELBY Tensor.....	35
2.4.2 Phasenwachstum zwischen zwei singulären Flächen.....	39
2.5 Dissipation und thermomechanisch gekoppelte Wärmeleitungsgleichung.....	40
2.6 Freie Energie in einem elastisch-thermoplastischen Material mit linearer isotroper Verfestigung .....	44
<b>3 Charakterisierung der verwendeten Materialien</b> .....	<b>53</b>
3.1 Geometrie und Schichtaufbau .....	53
3.2 Thermische Materialparameter .....	54
3.3 Mechanische Materialparameter .....	55



3.3.1	Prinzip der Nanoindentation .....	56
3.3.2	Versuchsdurchführung und Auswertemethodik.....	57
3.3.3	Ergebnisse und Literaturvergleich .....	59
<b>4</b>	<b>Bonduntersuchungen.....</b>	<b>63</b>
4.1	Zeitliche Verläufe der vertikalen Drahtdeformation .....	63
4.2	Vermessung der Wedgegeometrie.....	65
4.3	FIB- und TEM-Untersuchungen zur Vermessung der Dicke der intermetallischen Phase .....	65
<b>5</b>	<b>FE-Simulation des Drahtbondprozesses.....</b>	<b>75</b>
5.1	Vorgehensweise bei der Finiten-Elemente-Methode .....	75
5.2	Erstellung eines dreidimensionalen FE-Modells.....	78
5.2.1	Materialeigenschaften und Vernetzung.....	79
5.2.2	Rand- und Kontaktbedingungen .....	80
5.3	Durchführung und erste Ergebnisse der FE-Simulation des Bondprozesses .....	86
5.3.1	Herrschende Temperaturen am Interface .....	87
5.3.2	Verteilung der plastischen Energiedichte und der Normalspannung am Interface .....	89
<b>6</b>	<b>Postprozessor zur Ermittlung der thermomechanischen Kraft am Interface.....</b>	<b>91</b>
6.1	Beschreibung des Hauptprogramms .....	92
6.1.1	LAGRANGESches Interpolationsverfahren.....	93
6.1.2	Bestimmung des Deformationsgradienten und des ESHELBY Tensors an den Integrationspunkten.....	95
6.1.3	Extrapolation der ESHELBY Werte an den Knoten .....	96
6.2	Unterprogramm zur Berechnung der Differenz des ESHELBY Tensors....	97
6.3	Validierung des Postprozessors .....	101
<b>7</b>	<b>Vergleich der FE-Simulationen mit den Bonduntersuchungen.....</b>	<b>105</b>
7.1	Diskussion der thermomechanischen Kraft.....	106
7.2	Validierung des entwickelten Zusammenhangs .....	108
7.3	Untersuchung des Zeiteinflusses auf die berechnete effektive Diffusionskonstante .....	112
7.4	Entwicklung eines Wachstumsgesetzes für die Ausbildung der intermetallischen Phasen .....	116
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick.....</b>	<b>121</b>
	<b>Abkürzungsverzeichnis.....</b>	<b>123</b>
	<b>Symbolverzeichnis.....</b>	<b>124</b>



<b>Abbildungsverzeichnis.....</b>	<b>130</b>
<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>133</b>
<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>134</b>

