

Modellbasiertes Reaktives Fügen

Model Based Reactive Bonding

Amal Belguanche¹, Axel Schumacher², Nikolai Desch¹, Abdulmonaim Benachour¹, Julius Böttcher³, Georg Dietrich³, Erik Pflug³, Irina Spies², Peter Meyer², Bernd Folkmer², Stephan Knappmann², Peter Farber¹, Jens Gräbel¹, Markus Lake¹, Alfons Dehé²

¹IMH & STAR, Hochschule Niederrhein, Reinarzstr. 49, 47805 Krefeld

²Hahn-Schickard, Wilhelm-Schickard-Str. 10, 78052 Villingen-Schwenningen

³Fraunhofer IWS, Winterbergstr. 28, 01277 Dresden

Axel.Schumacher@Hahn-Schickard.de

Kurzfassung

Ziel dieser Untersuchungen ist die Ermittlung der räumlichen und zeitlichen Wärmeverteilung beim reaktiven Fügen innerhalb der Fügezone und in den angrenzenden Bauteilen durch mathematische Modellierung und numerische Simulation, um das für die jeweilige Fügeaufgabe optimale reaktive Multischichtsystem (RMS) und Lotsystem zu bestimmen. Im Rahmen dieser Arbeit wurden sowohl thermische 2D-Simulationen für reine RMS-Folien aus Ni/Al und Zr/Al als auch thermische 3D- und Stress-Simulationen für RMS-Folien mit angrenzenden Bauteilen durchgeführt. Hierfür wurden die erforderlichen Materialdaten temperatur- und konzentrationsabhängig bereitgestellt und die Zeitschrittweiten und Gittergrößen optimiert. Parallel dazu wurden entsprechende RMS-Folien hergestellt und die Energien, Reaktionsausbreitungsgeschwindigkeiten und -temperaturen experimentell ermittelt. Mithilfe thermischer 3D-Simulationen wurden für industrierelevante Bauteile aus Silizium unter Variation der Bauteilgröße und der Dicke der RMS-Folien die jeweiligen Lotschmelzdauern berechnet. Fügeversuche mit Testchips aus Silizium mit denselben Geometrien und RMS-Folien wurden durchgeführt, und die Qualität der Fügeverbindungen wurde analysiert. Die durch Simulation vorhergesagten Lotschmelzdauern konnten experimentell bestätigt werden.

Abstract

Aim of this investigation is to determine the spacial and temporal heat distribution inside the bonding zone and in the adjacent components during reactive bonding by mathematical modelling and numerical simulation to find the optimal reactive multilayer system (RMS) and solder system for the respective bond task. Thermal 2D simulations for RMS foils based on Ni/Al and Zr/Al as well as thermal and stress simulations for RMS foils with adjacent components have been performed. Therefore, temperature and concentration dependent data of the used materials have been provided, and time steps and grid size have been optimized. In parallel, RMS foils have been fabricated, and reaction enthalpies, reaction front velocities and temperatures have been experimentally measured. By thermal 3D simulations, the solder melting times during reactive bonding of industrial relevant silicon devices with different geometrical sizes and varying RMS foil thicknesses have been calculated. Reactive bonding experiments with silicon test chips with the same sizes and RMS foils have been performed, and the bond quality has been analyzed. The predicted solder melting times could be experimentally verified.

1 Reaktives Fügen

Im Zuge der fortschreitenden Miniaturisierung von Bauelementen in der Mikrosystemtechnik, aber auch in anderen Branchen wie der Leistungselektronik, Sensorik, im Werkzeugbau und bei der hybriden Verbindung von Metall und Kunststoff, wachsen die Anforderungen an die Aufbau- und Verbindungstechnik. Etablierte Fügeverfahren wie Kleben, Schweißen oder Reflowlöten können dabei häufig nicht eingesetzt werden, weil ein erhöhter Wärmeintrag im Volumen der Bauteile zu Eigenspannungen in den Bauelementen und sogar zu deren Schädigung führen kann. Außerdem bringen die herkömmlichen Fügeverfahren zum Teil lange Prozesszeiten mit sich, was sich wiederum als unwirtschaftlich erweist.

Ein vielversprechender Ansatz zur Entwicklung einer integrierten Wärmequelle für Fügeanwendungen besteht in der

Nutzung nanoskaliger Multischichtsysteme. Reaktive Multischichtsysteme (RMS) bestehen aus mindestens zwei („binäre“), teilweise drei („ternäre“) chemischen Elementen, die alternierend in dünnen Schichten angeordnet sind. Die Gesamtdicke eines RMS variiert von einigen Mikrometern bis hin zu Dicken im zweistelligen Mikrometerbereich, wobei die Einzelschichtdicken im Bereich von wenigen Nanometern liegen. Wird in dieses System eine Aktivierungsenergie eingebracht, z.B. durch einen Zündimpuls, entsteht eine selbstfortschreitende, exotherme Reaktion. Dabei reagiert das RMS innerhalb von Sekundenbruchteilen und gibt seine Bindungsenthalpie hauptsächlich in Form von Wärme und zu einem kleineren Teil als Bewegungsenergie der Reaktionsprodukte frei. Die Wärmeenergie kann zur Durchführung von Lötprozessen ohne externe Wärmequellen genutzt werden [1]. Die Elemente der Einzelschichten wandeln sich nach der Reaktion in Mischphasen um, **Bild 1**.

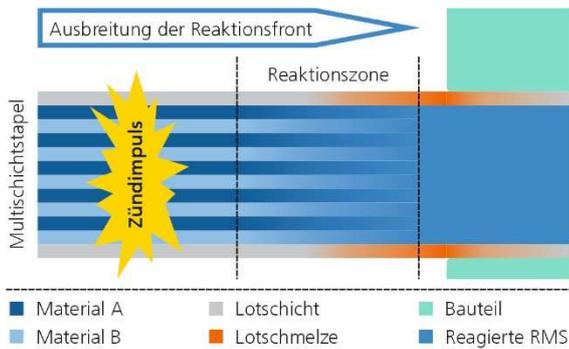


Bild 1: Schematischer Aufbau eines RMS mit Reaktionsablauf

Die Anpassung der RMS erfolgt durch die Wahl des Elementsystems sowie durch das Schichtdesign, bei dem die Schichtanzahl, die Periodendicke und das Verhältnis der Elementgehalte gewählt werden. Hierdurch können RMS-Eigenschaften wie Bindungsenthalpie, Reaktionstemperatur und -geschwindigkeit für unterschiedlichste Anwendungsfelder eingestellt werden. Die Möglichkeit der Anpassung der RMS-Eigenschaften hinsichtlich der freien Wahl des Elementsystems und des Schichtdesigns bildet die Voraussetzung für das sogenannte „Maßschneidern“ für den Anwendungsfall. Ziel dieser Arbeit war es daher, durch mathematische Modellierung und numerische Simulation die räumliche und zeitliche Wärme- und Spannungsverteilung innerhalb der Fügezone und in den Bauteilen zu ermitteln, um das für die jeweilige Fügeaufgabe optimale RMS- und Lotsystem bereitstellen zu können.

1.1 Entwicklung und Herstellung von reaktiven Multischichtsystemen

RMS werden mittels physikalischer Gasphasenabscheidung (PVD), speziell mit dem Vakuumverfahren Magnetron-Sputter-Deposition (MSD), hergestellt. Die am Fraunhofer IWS entwickelten RMS werden in einer Beschichtungsanlage (MSL600) der Fa. VTD GmbH abgeschieden. Die RMS-Geometrien liegen anlagenbedingt in den Dimensionen von 430 x 220 mm² vor, wobei fünf solcher Flächen in einem Durchlauf beschichtet werden können. Neben dem RMS können aufgrund der Anlagenkonfiguration noch weitere Schichten, wie z.B. Lote oder Haft- und Benetzungsschichten, im gleichen Prozess abgeschieden werden.



Bild 2: Freistehende Ni/Al-RMS-Folie, 430 x 220 mm²

In der genannten Beschichtungsanlage können homogen und reproduzierbar Ni/Al-RMS-Folien verschiedener Eigenschaftskonfigurationen abgeschieden werden, **Bild 2**. Fünf solcher Folien sind simultan herstellbar.

Für die Herstellung der Zr/Al-RMS wird an der Hochschule Niederrhein die PVD-Beschichtungsanlage Cem-Con CC800/8-Hi verwendet. Die Anlage ist mit vier Magnetronsputterquellen ausgestattet und RMS-Schichten können auf sechs Substratträgern mit einer jeweils nutzbaren RMS-Foliengröße von 400 x 150 mm² abgeschieden werden. Der Beschichtungsabstand der Sputterquellen zum Trägersubstrat beträgt 100 mm. Die Reinheit der Zirkontargets beträgt 99,2 wt% und die Reinheit der Aluminiumtargets beträgt 99,999 wt%. Die Reinheit des Zirkontargets wird gemäß ASTM B551 – Grade R60702 verwendet. Im ersten Schritt der Herstellung von Zr/Al-RMS steht die theoretische Auslegung der RMS. Dazu werden zunächst die Schichtraten der einzelnen Sputtertargets bei unterschiedlichen Sputterleistungen ermittelt. Anschließend liefert die Auswertung der Einzelschichtraten die Grundlage für das theoretische Design der gewünschten Zr/Al-RMS. Das theoretische Design wird in drei Chargen validiert und die Prozessparameter werden optimiert. In der **Tabelle 1** sind die wesentlichen Eigenschaften aus den hergestellten freistehenden Zr/Al-RMS Chargen dargestellt. Die Ermittlung der Periodendicke wird theoretisch auf Basis der Periodenzahl und der Elementanalyse errechnet. Bei der Elementanalyse wird eine etwaige Verunreinigung des Zirkons bis zu 1 at% vernachlässigt.

Tabelle 1: Eigenschaften der hergestellten Zr/Al-RMS

Folien-dicke [µm]	Perioden-dicke [nm]	Perioden	at% [Zr/Al]	Reaktions-geschwindigkeit [m/s]
7,8	25,3	300	51,0/49,0	1,8 – 3,1
35,6	23,6	1500	44,7/55,3	3,6 – 7,2
55	23,0	2400	47,3/52,7	3,2 – 5,4
75	24,0	3125	50,0/50,0	2,8 – 4,5

Die 75 µm Zr/Al-RMS weist mit einer Reaktionsgeschwindigkeit von 2,8 – 4,5 m/s die geringste Schwankung der Zr/Al-RMS Chargen auf. Eine große Schwankung der Reaktionsgeschwindigkeit von 3,6 – 7,2 m/s wurde in der 35,6 µm Zr/Al-RMS festgestellt. Das Elementverhältnis der Zr/Al RMS in der Tabelle 1 wird an durchreagierten RMS-Probenstücken ermittelt.

Der schematische Aufbau der RMS ist in **Bild 3** dargestellt. Eine RMS-Periode setzt sich hierbei aus zwei Einzellagen der unterschiedlichen Materialien zusammen. Die RMS-Dicke kann als Summe der Gesamtperioden angesehen werden. Zusätzlich kann die RMS beidseitig mit einer Haftschiicht für die verbesserte Haftung nachfolgend applizierter Lotschichten hergestellt werden. Prozessbedingt kann es bei der RMS-Herstellung zu der Ausbildung weniger Nanometer an vorgemischten Phasen kommen. Die

vorgemischten Phasen werden als Intermixing-Zone bezeichnet. Einflussfaktoren auf die Dicke der Intermixing-Zone liegen in der PVD-Prozessführung und sind unter anderem beeinflusst von der Substrattemperatur und der angebrachten Sputterleistung. Hohe Substrattemperaturen und Sputterleistungen können dabei zu erhöhten Diffusionsprozessen zwischen den Einzellagen führen und folglich die bereitgestellte Reaktionsenergie aufgrund der Vormischung herabsenken.

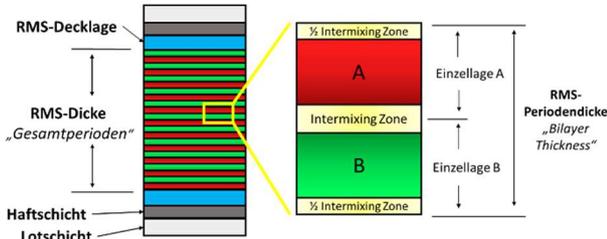


Bild 3: Schematische Darstellung RMS Aufbau

1.1.1 Messung der Reaktionsfrontgeschwindigkeit

Zur Bestimmung der Reaktionsfrontgeschwindigkeit kam eine Hochgeschwindigkeitskamera mit 50.000 Frames pro Sekunde zum Einsatz. Näher betrachtet wurde dabei der Einfluss der RMS-Gesamtdicke sowie -Periodendicke auf die Reaktionsfrontgeschwindigkeit sowie ein Vergleich verschiedener RMS.

In **Bild 4** ist die Entwicklung der Reaktionsfrontgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der RMS-Gesamtdicke, im Bereich von 20 µm bis 100 µm, abgebildet. Mit 6,9 m/s bei einer 40 µm Ni/Al-RMS liegt der gemessene Wert wie in der Literatur angegeben [2] und gleicht dem Wert in der Simulation. Weiterhin ist festzustellen, dass mit zunehmender Gesamtdicke die Reaktionsfrontgeschwindigkeit sinkt, was durch die Zunahme der Rauheit mit steigender Gesamtdicke zu erklären ist. Die sehr geringen Standardabweichungen weisen darauf hin, dass die RMS sehr homogen ist und über die gesamte Fläche gleichbleibende Eigenschaften besitzt.

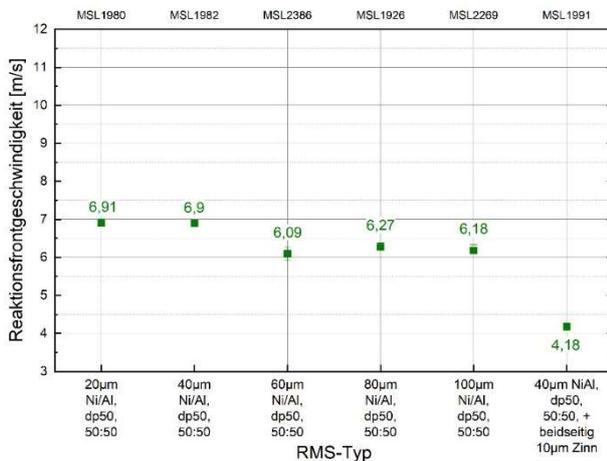


Bild 4: Reaktionsfrontgeschwindigkeit von Ni/Al-RMS in Abhängigkeit der Gesamtdicke

Neben der RMS-Gesamtdicke besitzt die Periodendicke einen noch größeren Einfluss auf die Reaktionsfrontgeschwindigkeit. Bei Untersuchungen von 20 µm bis 80 µm Ni/Al-RMS mit Periodendicken von 25 nm bis 100 nm sinkt die Reaktionsfrontgeschwindigkeit mit steigender Periodendicke. Diese Tendenz ist plausibel, da sich der Reaktionsweg mit steigender Periodendicke erhöht.

1.1.2 Energiemessungen

Die Energie wurde über die Dynamische Differenzkalorimetrie (DSC) ermittelt, welches ein thermisches Verfahren zur Bestimmung des Wärmestroms in einer Probe ist.

Tendenziell nimmt die RMS-Enthalpie leicht mit steigender RMS-Dicke zu. Darüber hinaus zeigte sich eine ansteigende Enthalpie mit zunehmender Periodendicke, da der absolute Anteil der vorgemischten Phase als passives Material am RMS sinkt.

In **Bild 5** ist eine Übersicht über die Enthalpien verschiedener, gemessener RMS zu sehen. Neben dem kommerziell erhältlichen Ni/Al-RMS wurde das niederenergetische Zr/Al- und das hochenergetische Zr/Si/Al-RMS gemessen. Dabei steigt die Enthalpie beginnend von der Zr/Al- über Ni/Al- hin zu Zr/Si/Al-RMS bis auf über 1300 J/g.

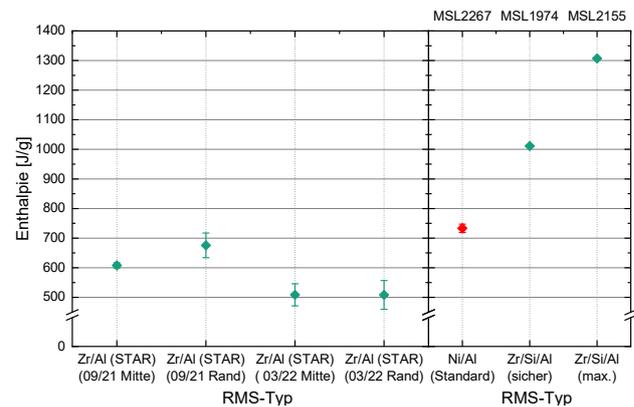


Bild 5: Gesamtenthalpie verschiedener RMS

1.2 Fügeprozesstechnik

Beim reaktiven Fügen müssen die Fügeflächen geeignete Kontaktmetallisierungen tragen, um eine Benetzung durch das Lot zu ermöglichen. Ferner müssen die Fügepartner zueinander planparallel ausgerichtet werden, und die Fügeflächen müssen mit der geforderten Genauigkeit zur Deckung gebracht werden. Weiterhin müssen die Fügepartner während des Fügeprozesses mit einem definierten Anpressdruck versehen werden. Hierfür diente ein Flip-Chip-Bonder FINEPLACER® Pico (Finetech GmbH) mit manuellem Bondkraftmodul. Das Funktionsprinzip ist schematisch in **Bild 6** dargestellt. Der untere Fügepartner (Substrat) befindet sich auf der ebenen Substratunterlage. Das zu fügende Bauteil (Chip) ist mittels Vakuum am Platzierkopf befestigt. Durch Bewegen der Substratunterlage werden die Fügeflächen in lateraler Richtung zur Deckung gebracht. Anschließend wird der Platzierkopf um 90° geschwenkt, bis das Bauteil auf dem Substrat zum Liegen kommt. Über das manuelle Bondkraftmodul kann nun bei

Bedarf durch zusätzliches Auflegen einer Masse der Anpressdruck vergrößert werden. Danach wird mittels Zündelektroden ein elektrischer Funke erzeugt, mit dem der Fügeprozess ausgelöst wird.

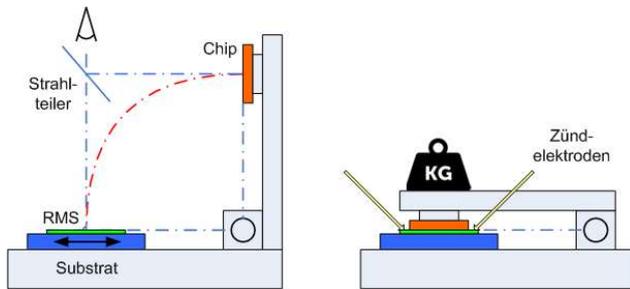


Bild 6: Funktionsprinzip des Flip-Chip-Bonders zum reaktiven Fügen auf Bauteilebene. Links: Justage, rechts: Anpressen und Zünden

2 Modellierung und Simulation

2.1 Methodik und Simulationsmodelle

Es wird im Inneren der RMS-Folie folgende Gleichung in jeder Gitterzelle gelöst:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) = \nabla(k\nabla T) + S$$

$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E)$: Änderungsrate der Energie innerhalb des Kontrollvolumenelements

E : Totale Energie

ρ : Dichte

$\nabla(k\nabla T)$: Energieübertragung durch Konduktion über die Oberflächen der Gitterzelle

k : Wärmeleitfähigkeit

T : Temperatur

S : Quellterm innerhalb des Kontrollvolumenelements

Der Quellterm wird mittels einer speziellen Programmiersprache von Fluent und des Programmiercodes C mit dem General Purpose Computational Fluid Dynamics (CFD) Code Ansys Fluent gekoppelt (**Bild 7**).

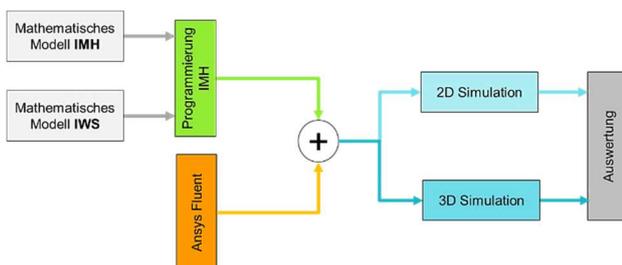


Bild 7: Prozessstruktur für die Entwicklung der Software Codes der Simulationsmodelle

Es wurden während des Projektes zwei Simulationsmodelle entwickelt. Das erste mathematische Modell wurde ‚Modell IMH‘ genannt und wird für 2D Simulationen verwendet, um die Reaktionsfrontgeschwindigkeit zu bestimmen. Das Modell liefert Ergebnisse, die experimentelle Werte gut nachbilden, und ist für die Simulation noch nicht

existierender RMS-Folien anwendbar. Für 3D Simulationen mit angrenzenden Bauteilen ist dieses Modell aber zu rechenzeitintensiv.

Das zweite Modell ist das sogenannte ‚Modell IWS‘. Es liefert mit deutlich kürzerer Rechenzeit Ergebnisse als das ‚Modell IMH‘ und ist für 3D Simulationen sehr gut geeignet. Das Modell benötigt jedoch gemessene Zahlenwerte der Reaktionsfrontgeschwindigkeit und der Mischungsenthalpie als Eingangsgrößen und ist daher für noch nicht existierenden RMS-Folien nicht geeignet.

Eine Kombination aus beiden Modellen (**Bild 8**) ist die Vorgehensweise der Wahl, um die Rechenzeiten zu optimieren und gleichzeitig 3D Simulationen für Funktionsmuster durchführen zu können.

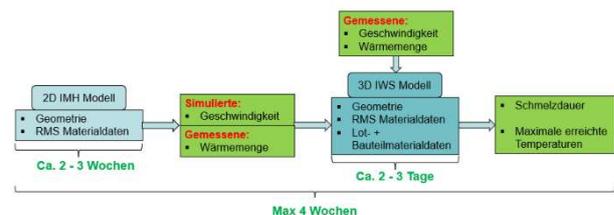


Bild 8: Prozessstruktur für die Durchführung der numerischen Simulationen

Die mittels des 2D ‚Modell IMH‘ berechnete Reaktionsfrontgeschwindigkeit wird im 3D ‚Modell IWS‘ als Eingangsgröße eingefügt und erzielt schnell aussagekräftige Ergebnisse.

2.2 3D-Simulationen am Beispiel eines Testaufbaus

Als Testaufbau dienten Siliziumchips, die durch reaktives Löten miteinander verbunden wurden (**Bild 9**).

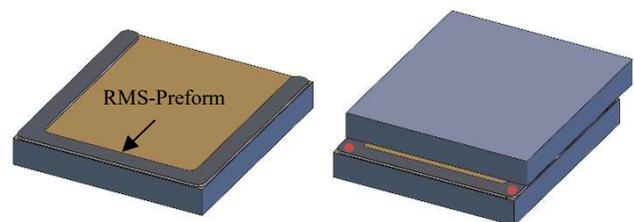


Bild 9: Schematische Darstellung des Substratchips mit RMS (links) und mit gefügtem Deckelchip (rechts). Die Aufsetzpunkte der Zündelektroden sind rot markiert

Um den Einfluss der Bauteildimensionen auf das Fügeergebnis zu untersuchen, wurden zwei unterschiedliche Chipgrößen eingesetzt:

- Variante 1: 1,9 x 2,2 x 0,525 mm³
- Variante 2: 3,7 x 4,1 x 0,525 mm³

2.2.1 Mathematisches Modell

- Geometrie: Testaufbau Siliziumchips (**Bild 10**)
- Gitter: ca. 9.000.000 Zellen
- Randbedingungen: an allen Rändern adiabatisch
- Optimale Rechenkernanzahl laut Parallelisierungsstudie: 32

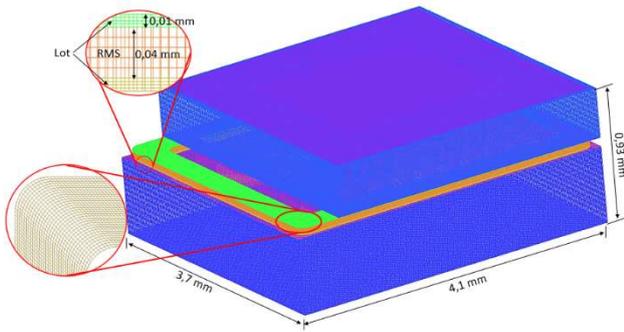


Bild 10: Geometrie und numerisches Gitter des Testaufbaus in der Variante 2

2.2.2 Numerische Simulation: Schmelzdauer des Lots

Das numerische Gitter wurde in ICEM 2020 generiert und die numerischen Simulationen in Ansys Fluent R1 V20 durchgeführt. Eine Reaktionsfrontgeschwindigkeit von $5,7 \text{ m/s}$ wurde aus 2D Simulationen von RMS-Folien mittels des 2D ‚Modell IMH‘ mit einer Periodendicke $dp = 50 \text{ nm}$ (NiAl) gerechnet. Diese Geschwindigkeit wurde dann zusammen mit der Mischungsenthalpie in das 3D ‚Modell IWS‘ eingegeben. Durch die Wärmeausbreitungs-Simulation (**Bild 11**) kann man die Schmelzdauer des Lots (Zeit, in der das gesamte Lot geschmolzen ist) und die maximal erreichten Temperaturen in den verschiedenen Bauteilen vorhersagen und damit Aussagen über die Qualität der Verbindung treffen.

Bild 12 zeigt beispielhaft die an drei ausgewählten Punkten berechneten Temperaturen über der Zeit für die Variante 2 mit $80 \mu\text{m}$ Ni/Al und $10 \mu\text{m}$ Lot. In **Tabelle 2** sind die Ergebnisse der Simulation zusammengefasst.

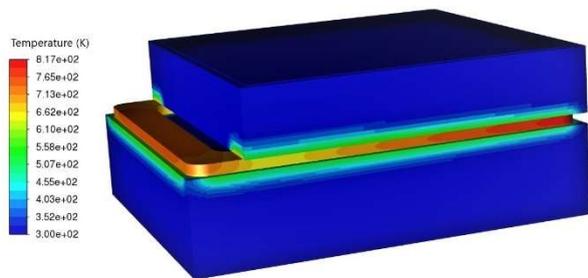


Bild 11: Momentaufnahme zum Zeitpunkt $t = 1,2 \text{ ms}$ der Wärmeausbreitung im Testaufbau Variante 2

Tabelle 2: Berechnete Schmelzdauern des Lots ($10 \mu\text{m}$ Zinn, Schmelztemperatur 505 K)

	Variante 1	Variante 2
$38 \mu\text{m Ni/Al}$	0,1 ms	0 ms
$60 \mu\text{m Ni/Al}$	0,4 ms	0,09 ms
$80 \mu\text{m Ni/Al}$	0,8 ms	0,7 ms

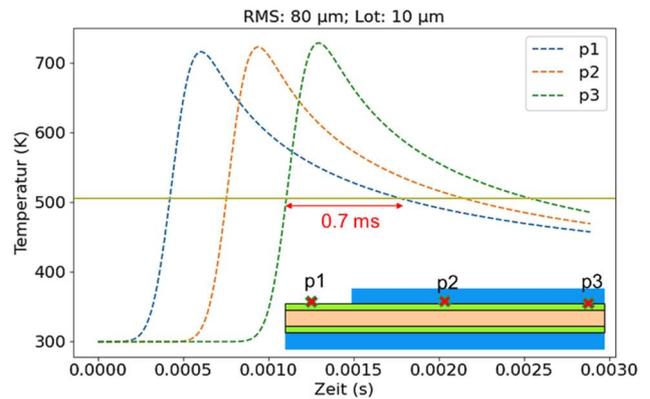


Bild 12: Temperatur als Funktion der Zeit und daraus abgeleitete Schmelzdauer an drei verschiedenen Punkten in der Grenzfläche zwischen Lot und Bauteil (Variante 2, $80 \mu\text{m}$ Ni/Al; Lot: $10 \mu\text{m}$, Schmelztemperatur: 505 K)

Die Schmelzdauer ist von der Dicke des RMSs stark abhängig, je größer die Dicke ist, desto länger wird die Schmelzdauer. Umgekehrt nimmt die Schmelzdauer mit zunehmender Bauteilgröße ab.

3 Technologische Umsetzung

3.1 Testaufbauten

Die Chipoberflächen wurden vor dem Fügen mit $0,2 \mu\text{m}$ thermischem SiO_2 und anschließend mit einer Kontaktmetallisierung aus 50 nm TiW , 200 nm Ni und 200 nm Au versehen. Als RMS dienten freistehende Ni/Al-Folien in den Dicken $40, 60$ und $80 \mu\text{m}$, die jeweils beidseitig mit Sn galvanisch vorbelotet wurden. Unter dem Rasterelektronenmikroskop (REM) wurden die beloteten RMS-Folien vermessen, um eine genaue Kenntnis über die tatsächlichen jeweiligen Dicken der RMS und des Lots zu bekommen (**Tabelle 3**).

Tabelle 3: Gemessene Dicken der RMS-Folien

	„40er“	„60er“	„80er“
Dicke Ni/Al in μm	38,4	55,4	77,2
Dicke Sn in μm	17,1	12,8	19,3
Gesamtdicke in μm	55,5	68,2	96,5

Die RMS-Folien wurden mittels Laser in U-förmige Preforms geschnitten. Beim reaktiven Fügeprozess wurde zunächst das RMS-Preform auf dem Substratchip ausgerichtet. Anschließend wurde mit dem Fineplacer der Deckchip aufgesetzt, der Fügedruck aufgebracht und der reaktive Fügeprozess durch Aufsetzen von zwei Zündkontakten an den Eckpunkten der freiliegenden RMS-Folie und Anlegen einer Gleichspannung ausgelöst. Auf diese Weise wurden jeweils fünf Testaufbauten für beide Geometrievarianten und mit allen drei RMS-Dicken hergestellt (**Bild 13**).

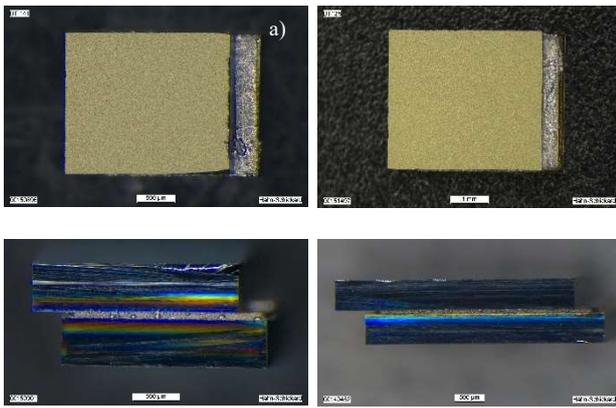


Bild 13: Mikroskopaufnahmen gefügter Bauteile in Aufsicht (oben) und in Seitenansicht (unten). (a): Variante 1, 60 µm Ni/Al, (b): Variante 2, 60 µm Ni/Al

3.2 Analyse der Fügeverbindungen

Von jeweils einer Variante der gefügten Bauteile wurde ein Querschliff durch die Fügezone angefertigt (Bild 14). Die Fügezonen der Bauteile weisen teilweise Hohlräume auf, die auf einen Volumenschwund des Ni/Al während der Legierungsbildung zu NiAl zurückzuführen sind. Aufgrund der kleineren Bauteildimensionen in der Variante 1 und der damit verbundenen größeren Schmelzdauer steht den Bauteilen während der schmelzflüssigen Phase des Lots mehr Zeit zur gegenseitigen Annäherung zur Verfügung, so dass sich in dieser Variante insgesamt weniger Hohlräume bilden. Zudem sind die Wege des Lots aus der Fügezone heraus kürzer, was den Lotaustritt begünstigt.

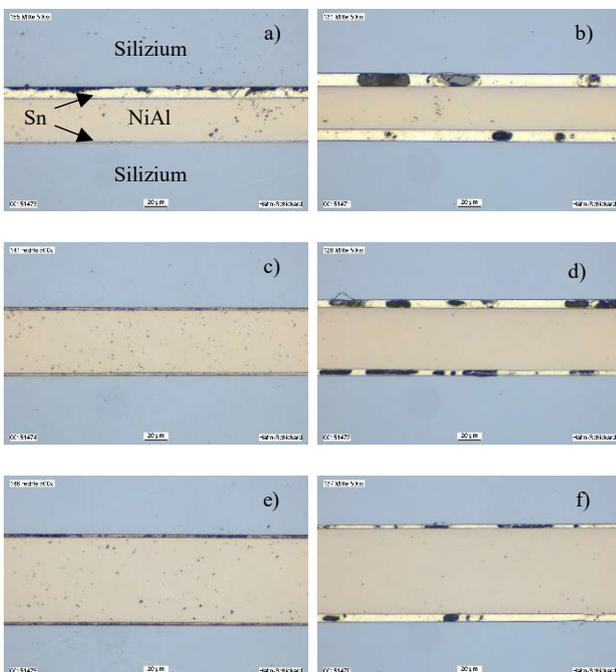


Bild 14: Querschliffe durch die Fügezonen der Bauteile. (a,c,e): Variante 1, (b,d,f): Variante 2. (a,b): 40 µm, (c,d): 60 µm, (e,f): 80 µm Ni/Al

Um dies zu quantifizieren, wurde bei allen Querschliffen die gesamte Breite der Fügezone vermessen und mit der Dicke der RMS-Preforms vor der Reaktion verglichen (Bild 15). Man erkennt deutlich, dass bei allen RMS-Dicken die Fügezone der Variante 1 dünner als die der Variante 2 ist. Und mit Ausnahme der Kombination aus 40 µm Ni/Al und Variante 2 hat sich die Fügezone nach der Reaktion im Vergleich zur Preform-Dicke vor der Reaktion verkleinert. Dieses Ergebnis stimmt sehr gut mit den durch Simulation vorhergesagten Schmelzdauern überein (Tabelle 2).

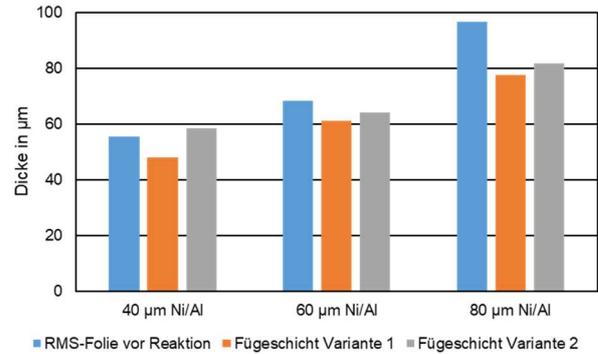


Bild 15: Veränderung der Fügezone-Dicke vor und nach dem Fügeprozess für beide Geometrievarianten

4 Schlussfolgerung

Durch mathematische Modellbildung und numerische Simulation ist es gelungen, die zeitliche und räumliche Temperaturverteilung während des reaktiven Fügens so exakt zu beschreiben, dass die für den Fügevorgang wichtige Lotschmelzdauer vorherbestimmt werden konnte. Das modellbasierte reaktive Fügen trägt somit zur Erhöhung der Prozesssicherheit und -zuverlässigkeit maßgeblich bei.

5 Danksagung

Das IGF-Vorhaben 20896 BG der Forschungsvereinigung Hahn-Schickard-Gesellschaft für angewandte Forschung e.V. wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

6 Literatur

- [1] Dietrich, G., Braun, S., Gawlitza, P. u. Leson, A. (Hrsg.): Reaktive Nanometer-Multischichten als maßgeschneiderte Wärmequellen beim Fügen, 2009 // 21. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KG&A, Weinheim 2009
- [2] Knepper, R., Snyder, M. R., Fritz, G., Fisher, K., Knio, O. M. u. Weihs, T. P.: Effect of varying bilayer spacing distribution on reaction heat and velocity in reactive Al/Ni multilayers. Journal of Applied Physics 105 (2009) 8, S. 83504