

Tilo Welker

**Methoden und Technologien zur Optimierung der Entwärmung aktiver
und passiver Komponenten auf keramischen Mehrlagensubstraten**

**Methoden und Technologien zur
Optimierung der Entwärmung
aktiver und passiver Komponenten auf
keramischen Mehrlagensubstraten**

Tilo Welker



Universitätsverlag Ilmenau

2018

Impressum

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

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

Diese Arbeit hat der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik der Technischen Universität Ilmenau als Dissertation vorgelegen.

Tag der Einreichung: 19. Juni 2017
1. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Jens Müller
(Technische Universität Ilmenau)
2. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Christian Cierpka
(Technische Universität Ilmenau)
3. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Ralph Schacht
(Brandenburgische Technische Universität Cottbus-Senftenberg)
Tag der Verteidigung: 26. Februar 2018

Technische Universität Ilmenau/Universitätsbibliothek

Universitätsverlag Ilmenau

Postfach 10 05 65

98684 Ilmenau

<http://www.tu-ilmenau.de/universitaetsverlag>

readbox unipress

in der readbox publishing GmbH

Am Hawerkamp 31

48155 Münster

<http://unipress.readbox.net>

ISBN 978-3-86360-182-9 (Druckausgabe)

URN urn:nbn:de:gbv:ilm1-2018000120

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|------------|
| Vorwort | VII |
| Kurzfassung | IX |
| Abstract | XI |
| 1 Einleitung | 1 |
| 1.1 Motivation..... | 1 |
| 1.2 Zielstellung der Arbeit | 5 |
| 1.3 Methodik der Arbeit..... | 6 |
| 1.3.1 Versuchsplanung und Auswertung..... | 6 |
| 1.3.2 Design-, Realisierungs- und Bewertungsprozess | 7 |
| 2 Theoretische Grundlagen und Charakterisierungsmethoden | 9 |
| 2.1 Theorie des Wärmetransports | 9 |
| 2.1.1 Joulesche Wärme und die Leistungsbilanz | 9 |
| 2.1.2 Wärmestrahlung | 10 |
| 2.1.3 Wärmeleitung | 11 |
| 2.1.4 Konvektiver Wärmetransport | 16 |
| 2.1.5 Thermische Ersatzschaltbilder | 22 |
| 2.1.6 Temperaturfeldberechnung mittels der Finite – Elemente – Methode..... | 23 |
| 2.2 Methoden zur Bestimmung der thermischen Leitfähigkeit..... | 27 |
| 2.2.1 Wiedemann-Franz'sches Gesetz..... | 27 |
| 2.2.2 Laser Flash Analyse | 30 |
| 2.2.3 Ermittlung der Wärmeleitfähigkeit nach ASTM D5470..... | 31 |
| 2.3 Versuchsstand zur Bestimmung des thermischen Verhaltens..... | 32 |
| 2.3.1 Charakterisierung des thermischen Testchips PST1 | 33 |
| 2.3.2 Charakterisierung des thermischen Testchips G423B | 36 |
| 2.3.3 Erfassung der Temperaturverteilung mittels Wärmebildkamera | 37 |
| 2.3.4 Design und Steuerung der Wärmesenke | 39 |
| 3 Technologische Grundlagen und Stand der Technik | 43 |
| 3.1 Entwurf und Herstellung von mehrlagigen keramischen Schaltungsträgern..... | 43 |
| 3.1.1 Vorbehandlung, Stanzen und Viafüllen | 45 |
| 3.1.2 Siebdruck..... | 45 |
| 3.1.3 Laserstrukturierung | 46 |
| 3.1.4 Stapeln und Lamination | 47 |
| 3.1.5 Einbrand und Post-Fire Prozesse..... | 47 |
| 3.2 Verfahren der Chipmontage und Verdrahtung..... | 49 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 3.2.1 | Fügen und Kontaktieren von Drahtbondchips | 49 |
| 3.2.2 | Fügen von Chips mittels der Flip-Chip Technologie..... | 53 |
| 3.3 | Entwärmungskonzepte in keramischen Packages | 55 |
| 3.3.1 | Chipmontage auf Wärmespreizer | 55 |
| 3.3.2 | Thermische Vias | 57 |
| 3.3.3 | Dickschichtwärmespreizer..... | 59 |
| 3.3.4 | LTCC – Metall Verbundsubstrat | 64 |
| 3.3.5 | Aktive Kühlung durch substratintegrierte Kühlkanäle | 66 |
| 3.3.6 | Heatpipes in LTCC | 69 |
| 3.3.7 | Passive Entwärmung von Flip-Chips..... | 71 |
| 4 | Chipmontage auf Wärmespreizern mittels neuartiger Materialien | 73 |
| 4.1 | Druckloses Niedertemperatursilbersintern | 73 |
| 4.1.1 | Methodik zur Evaluierung der Chipmontage..... | 74 |
| 4.1.2 | Ergebnisse der Untersuchungen und Bewertung | 82 |
| 4.1.3 | Zusammenfassung der Ergebnisse | 98 |
| 4.2 | Reaktives Löten | 100 |
| 4.2.1 | Chipmontage auf Wärmespreizern | 101 |
| 4.2.2 | LTCC Montage auf Kupferwärmespreizern | 108 |
| 4.2.3 | Zusammenfassung der Ergebnisse | 111 |
| 5 | Passive Wärmeableitung im Schaltungsträger | 113 |
| 5.1 | Thermische Vias unter dem Aspekt der Hermetizität | 113 |
| 5.1.1 | Einflussfaktoren | 113 |
| 5.1.2 | Ermittlung der Hermetizität mittels Heliumlecktest | 115 |
| 5.1.3 | Thermischer Widerstand alternierender Via Strukturen | 120 |
| 5.1.4 | Hermetizität von Vias im 0-Schrumpfprozess | 122 |
| 5.2 | Substratintegrierte, dicke Silberwärmespreizer im Co-Fire Prozess | 125 |
| 5.2.1 | Materialanalyse der Silberfolie | 125 |
| 5.2.2 | Scherfestigkeit von geklebten bzw. gesinterten Chips auf dem Silbermaterial.. | 127 |
| 5.2.3 | Ermittlung der Haftfestigkeit des LTCC – Ag Verbundes | 129 |
| 5.2.4 | Demonstrator Package zur Ermittlung der thermischen Performance..... | 130 |
| 5.2.5 | Hermetizität des LTCC – Ag Verbundes..... | 139 |
| 5.2.6 | Zusammenfassung der Ergebnisse | 139 |
| 6 | Aktive Wärmeableitung im Schaltungsträger | 141 |
| 6.1 | Design, Fertigung und Charakterisierung | 141 |
| 6.1.1 | Integration von fluidischen Elementen in LTCC..... | 141 |
| 6.1.2 | Thermische Charakterisierung | 143 |
| 6.2 | Kühlkonzept für Drahtbondchips | 146 |
| 6.2.1 | Einfluss von thermischen Vias auf den thermischen Widerstand..... | 147 |
| 6.2.2 | Optimierung der Substratplanarität..... | 155 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 6.2.3 | Skalierbarkeit des Kühlkonzeptes | 160 |
| 6.2.4 | Elektrische Isolation zwischen Chip und Kühlmedium | 163 |
| 6.2.5 | LGA Package mit fluidischen Schnittstellen | 163 |
| 6.2.6 | Zusammenfassung der Ergebnisse | 170 |
| 6.3 | Kühlkonzept für Flip-Chips | 171 |
| 6.3.1 | Analytische Betrachtung | 172 |
| 6.3.2 | CFD Simulation..... | 173 |
| 6.3.3 | Modulare Fertigung des Packages..... | 176 |
| 6.3.4 | Charakterisierung und Bewertung..... | 179 |
| 6.3.5 | Zusammenfassung der Ergebnisse | 181 |
| 7 | Zusammenfassung & Ausblick | 183 |
| 7.1 | Druckloses Niedertemperatursilbersintern..... | 183 |
| 7.2 | Löten mithilfe von reaktiven Materialien | 183 |
| 7.3 | Thermische Vias unter dem Aspekt der Hermetizität | 184 |
| 7.4 | Substratintegrierte, dicke Silberwärmespreizer im Co-Fire Prozess..... | 185 |
| 7.5 | Aktive Wärmeableitung im Schaltungsträger | 187 |
| | Abbildungsverzeichnis | 189 |
| | Tabellenverzeichnis | 201 |
| | Symbolverzeichnis | 205 |
| | Literaturverzeichnis | 213 |
| | Thesen | 229 |
| | Publikationsverzeichnis | 231 |