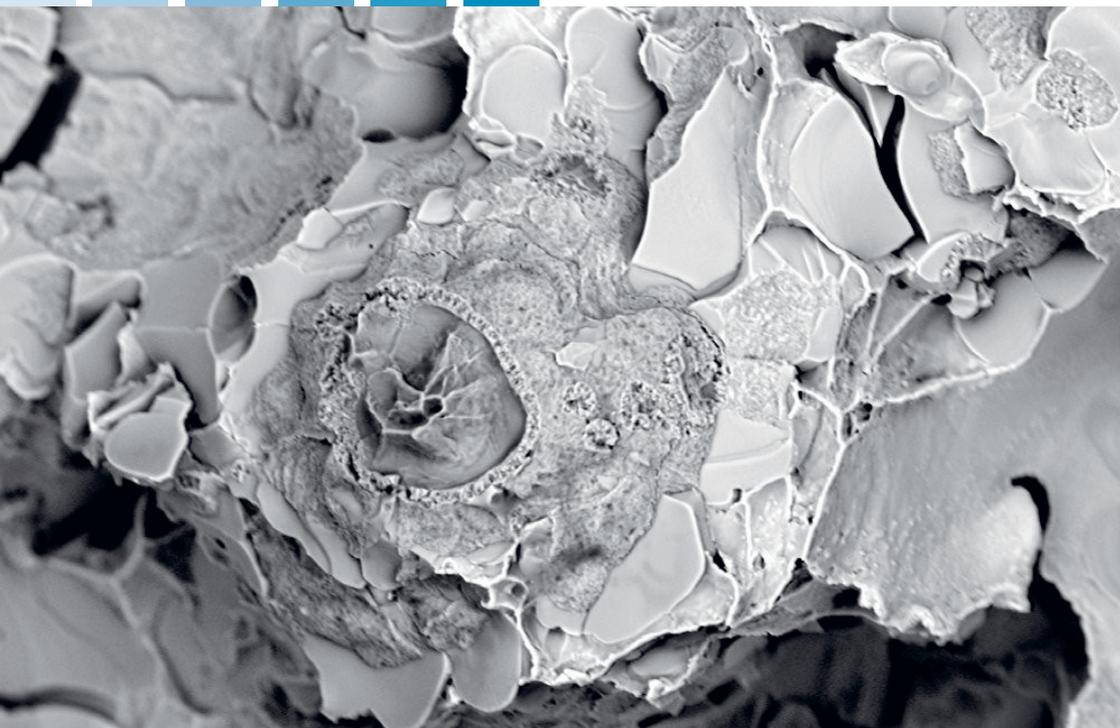


Realisierung und Charakterisierung eines
Diffusionslötprozesses im System Cu/Sn
zur Darstellung hochtemperaturstabiler
Fügestellen in der Leistungselektronik

Daniel Feil



Realisierung und Charakterisierung eines
Diffusionslötprozesses im System Cu/Sn zur Darstellung
hochtemperaturstabiler Fügstellen in der Leistungselektronik

Dissertation
zur
Erlangung des akademischen Grades
Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)
der Fakultät für Informatik und Elektrotechnik
der Universität Rostock

vorgelegt von
Daniel David Feil, geb. am 19.07.1987 in Heilbronn
aus Pfullingen

Rostock, 17.09.2021

Berichte aus der Materialwissenschaft

Daniel Feil

**Realisierung und Charakterisierung eines
Diffusionslötprozesses im System Cu/Sn zur
Darstellung hochtemperaturstabiler Fügestellen
in der Leistungselektronik**

Shaker Verlag
Düren 2023

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.: Rostock, Univ., Diss., 2022

Copyright Shaker Verlag 2023

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-8940-0

ISSN 1618-5722

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Danksagung

Bei der Entstehung dieser Dissertation waren viele Unterstützer und Unterstützerinnen beteiligt denen ich an dieser Stelle gesammelt meinen Dank aussprechen möchte.

Ganz besonderer Dank gilt Prof. Mathias Nowotnick für die Betreuung meines Promotionsvorhabens seitens der Universität Rostock.

Prof. Thomas Zerna möchte ich für die Übernahme des Zweitgutachtens danken.

Dr. Timo Herberholz möchte ich für die Betreuung seitens der Robert Bosch GmbH danken. Besonders die enge fachliche Zusammenarbeit mit Herrn Dr. Herberholz und Herrn Dr. Andreas Fix, mit vielen wertvollen Anregungen, haben einen wesentlichen Beitrag zum Erfolg dieser Arbeit geleistet.

Besonderer Dank gilt auch den zahlreichen Kollegen und Kolleginnen des Bereichs Forschung und Voraentwicklung der Robert Bosch GmbH, die mich insbesondere bei der experimentellen Durchführung tatkräftig unterstützt haben. Dabei sind insbesondere auch die Kollegen und Kolleginnen des Entwicklungsbereiches der Firma Heraeus hervorzuheben.

Abschließend möchte ich mich bei meiner Familie und meinen Freunden bedanken, die mich über die vielen Jahre mit seelischem Beistand bei der Stange gehalten haben. Ohne meine Frau Karla, die mir stets mit Geduld und Verständnis zur Seite stand, wäre dieses Projekt nicht möglich gewesen. Ihr möchte ich ganz besonders und von Herzen Danken.

Kurzfassung

Der aktuell stattfindende Wandel in der weltweiten Energiewirtschaft führt zu einem zunehmenden Wachstum im Bereich erneuerbarer Energien und der Elektromobilität. Als Bindeglied zwischen den verschiedenen Formen elektrischer Energie, stellt die Leistungselektronik einen signifikanten Beitrag zum Erfolg der Energiewende und im Speziellen zur Elektrifizierung von Automobilen dar. Entwicklungen, wie neue SiC-basierte Halbleiter oder das Streben nach reduzierter Bauraumgröße, sorgen für höhere Einsatztemperaturen. Damit zusammenhängende Steigerungen thermomechanischer Belastungen bringen bisherige Methoden der elektrischen Aufbau- und Verbindungstechnik (eAVT) an ihre Grenzen. So sind selbst hochlegierte und/oder höherschmelzende Sn-Basislote nicht mehr in der Lage, den erhöhten Belastungen standzuhalten. Technologien wie das Silbersintern ersetzen hier zunehmend die bisher durch Löten abgebildete AVT und stellen bis dato eine der wenigen wirksamen Maßnahmen zur Erhöhung der Lebensdauer hochtemperaturbelasteter Fügestellen dar. Das druckbehaftete Silbersintern zeigt jedoch, vor allem bei Betrachtung prozess- und kostentechnischer Aspekte, Defizite. Die hohen Prozessdrücke zur Herstellung von Sinterschichten mit geringer Porosität gestalten die Prozessierung von Sintermaterial schwierig und stellen vor allem bei großflächigen Verbindungen eine enorme Herausforderung dar. Die Materialien sind kostspielig und erfordern nebst einiger Entwicklungsarbeit noch zusätzlich den Einsatz neuer Anlagenkonzepte. Gangbare Alternativen finden sich derzeit lediglich im Bereich der Diffusionslöttechnik und so entstehen in jüngster Zeit zahlreiche Methoden die sich die Bildung hochfester intermetallischer Phasen zur Lösung dieses Problems zu Nutze machen.

Das pastenbasierte Diffusionslöten, welches im Rahmen des Projektes „Hot Power Connect (HotPowCon)“ entwickelt wurde, bewegt sich besonders nah an bekannten Methoden der Löttechnik und ist so in der Lage, eine vergleichsweise einfache Prozessierbarkeit zu erreichen, jedoch das hohe Maß an Flexibilität und Effizienz dieser Technik zu bewahren. Dabei setzt das Verfahren auf die laterale Infiltration eines zur Schmelze gebrachten Zinnlotes in ein aus Kupferpaste geformtes Depot. Die unmittelbare Reaktion beider Komponenten zu intermetallischen Phasen erhöht die Wiederaufschmelztemperatur der Fügestelle von knapp 250°C auf bis zu 415°C. Die mit dieser Umwandlung einhergehende Verbesserung der mechanischen Eigenschaften vermag es die Temperaturstabilität derart hergestellter Fugeschichten drastisch zu erhöhen. So lassen sich beispielsweise noch bei 200°C Zugfestigkeiten von über 60 MPa erreichen. In Bezug auf die hohen thermomechanischen Ansprüche moderner Leistungsmodule zeigt das Diffusionslöten, aber insbesondere dessen pastenbasierte Variante, ein hohes Potential und ist daher für die AVT-Entwicklung von großem Interesse. Grenzen dieses Verfahrens zeigen sich vor allem bei der Herstellung großflächiger Kontaktstellen oberhalb 10 mm² und so ist der Einsatzbereich dieses Verfahrens durch die geringe Infiltrationsreichweite der Weichlote bisher auf kleinere Bauelemente beschränkt.

Mit Hilfe eines in dieser Arbeit erstellten analytischen Ansatzes auf Basis des Washburn-Modells ist es erstmals gelungen, das dem pastenbasierten Diffusionslöten zugrundeliegende Infiltrationsverhalten analytisch zu beschreiben. Über Anpassungen des Lötensystems konnten dabei verschiedene Methoden zur Steigerung des Infiltrationsvermögens isoliert werden, mit deren Hilfe sich das Einsatzspektrum des Verfahrens erstmals von kleinen SMD-Komponenten und Feldeffekttransistoren auf deutlich größere Bipolartransistoren oder sogar Systemverbindungen größer 1000 mm^2 erweitern lässt. Als besonders einflussreicher Faktor erweist sich hierbei die verwendete Kupferpaste, welche durch Anpassungen der Pulvergrößenverteilung oder der spezifischen Oberfläche zu höheren Infiltrationsweiten des Lotes bewogen werden kann. Einhergehend mit Änderungen der Pastensysteme sind in der Regel Änderungen des sich im Lötprozess ausbildenden Gefüges. Über verschiedene Gefügeanalysen konnte ein Modellansatz zur Gefügebildung während der Lotinfiltration erstellt werden und daraus die Einflussgrößen zur Einstellung bestimmter Gefügeparameter extrahiert werden. So kann über gezielte Anpassung der Pastensysteme die Phasenzusammensetzung, die Porosität und die Ausprägung des Gerüsts aus intermetallischen Phasen einer Fügenschicht beeinflusst werden, wodurch sich damit in Zusammenhang stehende Materialeigenschaften, wie die Festigkeit oder die Wärmeleitfähigkeit, direkt beeinflussen lassen. Mechanische und thermische Analysen an Vollmaterialproben, unter anderem mittels Zug- und Kriechversuchen bis 200°C , zeigen dabei den direkten Einfluss des für das Diffusionslöten verwendeten Pastensystems auf die diversen Materialeigenschaften der Fügenschicht. Die Materialeigenschaften stehen je nach Anforderung im Kontrast zu den ebenfalls über das Pastensystem definierten Infiltrationseigenschaften und so ist je nach gebotenen Anforderungsprofil ein Kompromiss aus gewünschten Eigenschaften und dem benötigten Infiltrationsvermögen zu finden. Die in dieser Arbeit ergründeten Zusammenhänge bieten hierfür erstmals eine Grundlage zum anforderungsspezifischen Design eines Diffusionslötensystems für moderne Leistungsmodule und eine valide Basis für einen Vergleich mit aktuellen AVT-Konzepten wie z.B. dem Silbersintern.

Abstract

The currently ongoing change in global energy economy is leading to a substantial growth in the sectors renewable energies and electric mobility. As link between different forms of electric energy, power electronics provide a major contribution to the success of the electrification of the automotive sector. Ongoing developments, as for example new SiC-based semiconductors or the grasp for reduced size and weight of respective components, lead to higher operating temperatures and higher thermomechanic loads, which the current state of the art interconnection concepts cannot sustain anymore. Technologies, like the pressure assisted sintering of silver, are therefore starting to replace the currently used tin-based solders and provide, until now, one of the few effective measures for increasing the lifetime of high-temperature contacts. Deficiencies of the pressure assisted sintering show in particular regarding aspects of processability and costs. The high pressures needed to produce sinterlayers of low porosity are complicating the process significantly and represent a challenge especially for large area contacts. Feasible alternatives can be found in the field of transient liquid phase soldering (TLPS). And so, recent developments in interconnection technologies often deal with new ways to make use of the transition of a low- and high- melting phase to high-temperature stable intermetallic compounds as interconnection material.

The paste based TLPS-process developed within the project „Hot Power Connect (HotPowCon)“ is designed to provide maximum similarity to standard SMD-soldering and is therefore capable to keep the high efficiency and flexibility of this process while providing an improved high-temperature sustainability. The process uses lateral infiltration of a molten Sn-based solder into a Cu-paste depot. The reaction of tin with copper to intermetallic compounds Cu_6Sn_5 and Cu_3Sn forms a bond with the respective joining partners which is able to sustain temperatures of up to 415°C . The changes of mechanical and physical properties that come along with that transformation enable higher operating temperatures which make it possible to meet the high requirements of modern power electronic devices. Thereby, it was possible to achieve an ultimate tensile strength of more than 60 MPa in tensile tests at up to 200°C . TLPS and especially its paste based variant show a high potential as high-temperature interconnection technology. However until today the paste based TLPS-process suffers from a very limited infiltration range which restricts its application only to small components in the millimeter range.

With the help of a new analytical approach developed in the scope of this work, it was possible to describe the underlying mechanisms of infiltration analytically. Using this knowledge, different methods for improving the infiltration range could be isolated, so that the application range of the paste based TLPS-process could be extended from small passive components or field effect transistors to large area bipolar transistors or even baseplate connections larger than 1000 mm^2 . The copper-paste used for the process has the most sig-

Abstract

nificant influence on the infiltrational behavior as the respective particle size distribution or the specific surface of the metal powders prove to alter the infiltration range tremendously. Along with changes of the paste-systems, changes in the microstructure formed during soldering are inevitable. Using microstructure analysis of differently soldered samples, a model-approach to describe the microstructure development was created, from which influencing factors to affect the resulting microstructure could be derived. With this knowledge, material properties like the ultimate strength or the heat conductivity can be optimized according to the respective requirements profile. The effects of the adaptations made on the particular TLPS-system are furthermore shown via mechanical and thermal analysis on bulk-material samples, for example in tensile and creep tests at temperatures up to 200 °C. As changes on the TLPS-system also affect the infiltration range, it is crucial to find a compromise between the required contact area and the desired material-properties. Overall, the relations between processability and material-properties found in this work offer a foundation of design rules for requirement-specific paste based TLPS-systems for modern power modules and deliver a valid base for a comparison of current interconnection technologies like for example silver sintering.

Inhaltsverzeichnis

Danksagung	i
Kurzfassung	iii
Abstract	v
1. Einleitung	1
2. Grundlagen und Stand der Technik	3
2.1. Hochtemperaturbelastete Fügestellen in der Elektronik	3
2.1.1. Thermomechanische Belastungen	3
2.1.2. Anforderungen an die eAVT thermomechanisch belasteter Systeme	6
2.2. Relevante Verfahren der elektronischen Aufbau- und Verbindungstechnik	7
2.2.1. Löten	8
2.2.2. Sintern von Metallverbindungen	10
2.2.3. Diffusionslöten	15
2.3. Löten im System Cu-Sn	25
2.3.1. Das binäre System Cu-Sn	25
2.3.2. IMP-Bildung, Morphologie und Phasenwachstum	26
2.3.3. Benetzungseigenschaften bleifreier Zinn-Basislote	28
2.4. Infiltration von Fluiden in poröse Medien	31
2.5. Methoden der quantitativen Metallographie	33
2.6. Grundlagen zur Beschreibung des Kriechverhaltens metallischer Werkstoffe	34
3. Zielsetzung und Lösungsweg	37
4. Methodik und experimentelles Vorgehen	39
4.1. Prozesse zur Herstellung von Prüfkörpern	39
4.1.1. Reinigung der zu verbindenden Oberflächen	39
4.1.2. Schmelzlöten	39
4.1.3. Herstellung der Kupferpasten	40
4.1.4. Pastenbasiertes Diffusionslöten	42
4.2. Theoretische Betrachtungen zur Darstellung der Lotinfiltration	45
4.2.1. Quantitative Beschreibung des porösen Mediums	45
4.2.2. Modell zur Beschreibung des Infiltrationsprozesses	46
4.2.3. Vorbewertung prozessrelevanter Parameter	49
4.3. Untersuchungen zur Beschreibung des Infiltrationsverhaltens	54
4.3.1. Bestimmung des effektiven Kapillarradius mittels quantitativer Schliffanalyse	54
4.3.2. Quantitative Beschreibung des Infiltrationsverhaltens	55

Inhaltsverzeichnis

4.4.	Versuche zur Charakterisierung diffusionsgelöteter Fügestellen	58
4.4.1.	Charakterisierung des Vollmaterials	58
4.4.2.	Gefüge-, Fehler-, und Bruchflächenanalyse	60
5.	Ergebnisse	61
5.1.	Untersuchungen zum Infiltrationsverhalten des pastenbasierten Diffusionslötprozesses	61
5.1.1.	Verifizierung des analytischen Ansatzes	61
5.1.2.	Variation des Kupfer Pulvertyps	62
5.1.3.	Variation des Kupfer Pulversystems	64
5.1.4.	Variation des Kupfer Pastensystems	67
5.2.	Charakterisierung diffusionsgelöteter Schichten	69
5.2.1.	Gefügeanalyse	70
5.2.2.	Mechanische Eigenschaften diffusionsgelöteter Schichten in Abhängigkeit vom Kupferpastensystem	77
5.2.3.	Mechanische Eigenschaften in Abhängigkeit vom Alterungszustand	87
5.2.4.	Thermische Eigenschaften diffusionsgelöteter Schichten	89
6.	Diskussion	91
6.1.	Darstellung großflächiger Fügestellen mittels pastenbasiertem Diffusionslöten	91
6.1.1.	Der erweiterte Washburn-Ansatz	91
6.1.2.	Anpassung der Cu-Pulverzusammensetzung zur Optimierung des Infiltrationsverhaltens	96
6.1.3.	Einfluss organischer Komponenten im Trägermedium	104
6.2.	Charakterisierung diffusionsgelöteter Schichten	106
6.2.1.	Gefügebildung und Evolution	106
6.2.2.	Mechanische Eigenschaften diffusionsgelöteter Schichten	113
6.3.	Vergleich verschiedener Hochtemperatur-eAVT Konzepte	123
6.3.1.	Transporteigenschaften im Vergleich	123
6.3.2.	Mechanische Eigenschaften im Vergleich	124
6.3.3.	Prozessierbarkeit	127
7.	Zusammenfassung und Ausblick	129
7.1.	Beschreibung und Optimierung des Infiltrationsverhaltens	129
7.2.	Einfluss auf die Gefügebildung und -evolution	132
7.3.	Charakterisierung diffusionsgelöteter Schichten	133
7.4.	Anwendung in der Leistungselektronik	136
	Abbildungsverzeichnis	141
	Tabellenverzeichnis	149
	Formelzeichen und Abkürzungen	151
A.	Materialdaten und Prozessparameter	155
A.1.	Materialdaten aus der Literatur	155
A.2.	Verwendete Materialien	158

A.3. Messprofile der verwendeten Lötöfenprogramme	160
B. Zusätzliche Untersuchungen und Messergebnisse	163
B.1. Zugversuche an Vollmaterialproben	163
B.2. Kriechversuche an Vollmaterialproben	165
Literaturverzeichnis	167

