

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

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 bewegt 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 $415\text{ }^\circ\text{C}$. 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 $200\text{ }^\circ\text{C}$. 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 si-

gnificant 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.