

Innovative LFA-Lösung: Analyse galliumbasierter Flüssigmetalle

Jinyan Li, Applications Laboratory Shanghai, and Dorothea Stobitzer, Applications Laboratory Selb



Einleitung

Galliumbasierte Flüssigmetalle gewinnen im Bereich der Kühlung von Hochleistungselektronik zunehmend an Bedeutung, da sie sich durch hervorragende elektrische Leitfähigkeit, Wärmeleitfähigkeit und Fließeigenschaften auszeichnen. Im Wärmemanagement können Ga- und Ga-Indium-(In)-Legierungen als thermische Schnittstellenmaterialien eingesetzt werden, indem sie Lücken zwischen Chips und Kühlkörpern füllen und so die von Kernkomponenten wie CPUs und GPUs erzeugte Wärme effizient abführen. Dadurch werden die Betriebstemperaturen deutlich reduziert und ein stabiler Gerätebetrieb gewährleistet. Ihre Wärmeableitungseffizienz übertrifft die von Wärmeleitpasten und Wärmeleitpads bei Weitem. Darüber hinaus besitzen Ga und galliumbasierte Legierungen einen außerordentlich breiten flüssigen Temperaturbereich – von Temperaturen unter dem Gefrierpunkt bis über 2000 °C – sowie eine Wärmeleitfähigkeit, die der von Wasser deutlich überlegen ist. Damit sind sie vielversprechende konvektive Kühlmedien für Chips mit hoher Leistungsdichte, Anwendungen in der Luft- und Raumfahrt und weitere Bereiche.

Eine genaue Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit von Ga- und Ga-In-Legierungen ist entscheidend, um deren sicheren und effizienten Einsatz in kritischen Anwendungen des Wärmemanagements zu gewährleisten.

Die Laser-/Light-Flash-Analyse (LFA) ermöglicht nicht nur die Messung der Wärmeleitfähigkeit konventioneller Festkörperproben. Durch den Einsatz geeigneter Probenhalter und passender Berechnungsmodelle kann auch die Temperaturleitfähigkeit spezieller Proben wie Flüssigkeiten, Pasten und Pulver bestimmt und daraus die Wärmeleitfähigkeit berechnet werden. Dieses Applikationsbeispiel beschreibt die Methode, mit der die Wärmeleitfähigkeit von reinem Ga sowie Ga-In-Legierungsproben unter Verwendung eines speziellen Probenhalters für Flüssigkeiten mit der LFA 717 *HyperFlash*® bestimmt wird.

Messbedingungen

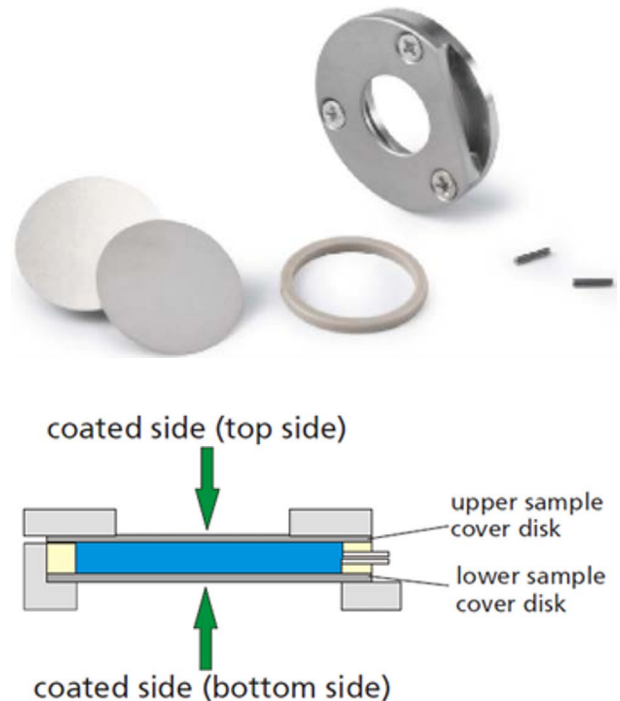
Tabelle 1 Messbedingungen

Probe	Reines Ga Galn ($\text{Ga}_{75}\text{In}_{25}$) GalSn ($\text{Ga}_{68,5}\text{In}_{21,5}\text{Sn}_{10}$)
Temperatur	30 °C, 60 °C, 90 °C, 120 °C
Probenhalter	PEEK-Probenhalter für Flüssigkeiten
Spezifische Wärmekapazität	DSC 300 <i>Caliris</i> ® <i>Select</i>
Atmosphäre	N ₂
Model	3-Schicht + Pulskorrektur

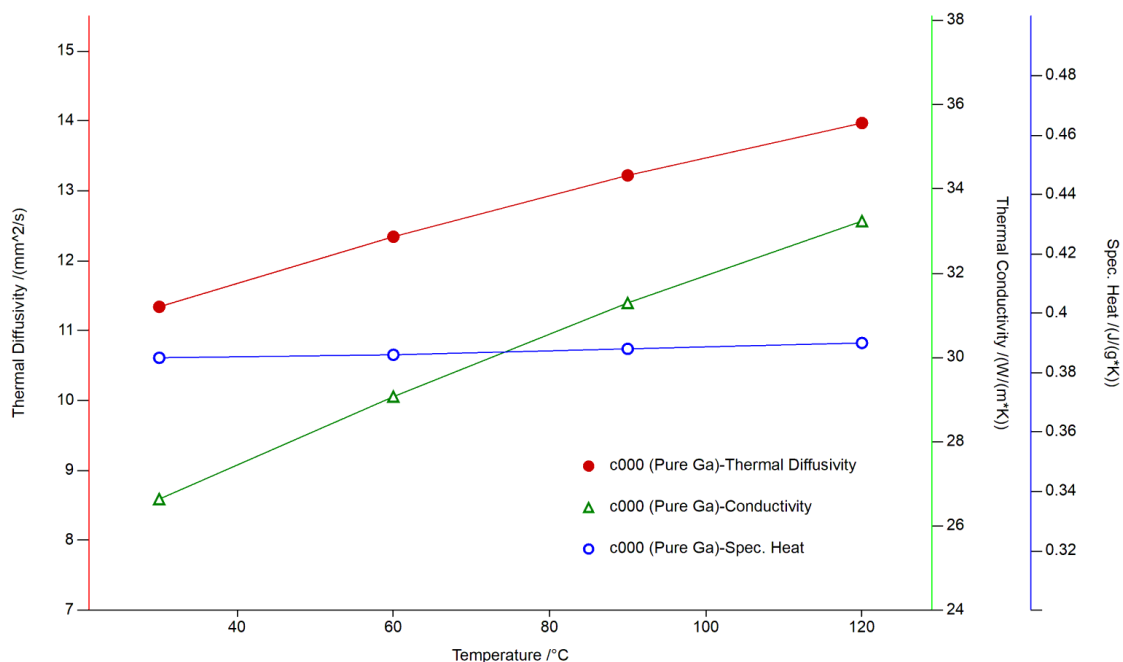
Messergebnisse und Diskussion

Abbildung 1 zeigt die Ergebnisse für die Temperaturleitfähigkeit, spezifische Wärmekapazität (c_p) und Wärmeleitfähigkeit einer Probe aus reinem Ga, gemessen im Temperaturbereich von 30 bis 120 °C. Bei 30 °C lagen die Temperaturleitfähigkeit und Wärmeleitfähigkeit der Probe bei 11,4 mm²/s bzw. 26,6 W/(m·K) und stimmen damit mit den in der Literatur [1] berichteten Werten überein. Sowohl die Temperaturleitfähigkeit als auch die Wärmeleitfähigkeit nehmen mit steigender Temperatur zu. Die spezifische Wärmekapazität wurde mit einer NETZSCH DSC 300 *Caliris® Select* gemessen. Es ist erwähnenswert, dass aufgrund der aggressiven Reaktion zwischen Ga und Aluminium (Al) für die Messung ein mit Al₂O₃ ausgekleideter Platintiegel (Pt) verwendet wurde.

Der spezielle Probenhalter für Flüssigkeiten basiert auf einem Drei-Schicht-Modell. Nach dem Zusammenbau des Probenhalters können flüssige Proben durch Einspritzen, Auftropfen oder Aufstreichen in den Behälter eingebracht werden, der aus einer oberen und unteren Edelstahlscheibe sowie einem PEEK-Ring besteht (siehe Abbildung 2). Dieser Probenhalter eignet sich für Proben wie Flüssigkeiten, Flüssigmetalle und Pasten. Bei Verwendung dieses Halters wird ein Drei-Schichten-Modell zur Berechnung der Temperaturleitfähigkeit eingesetzt.



2 Foto (oben) und Schema (unten) des PEEK-Flüssigprobenhalters

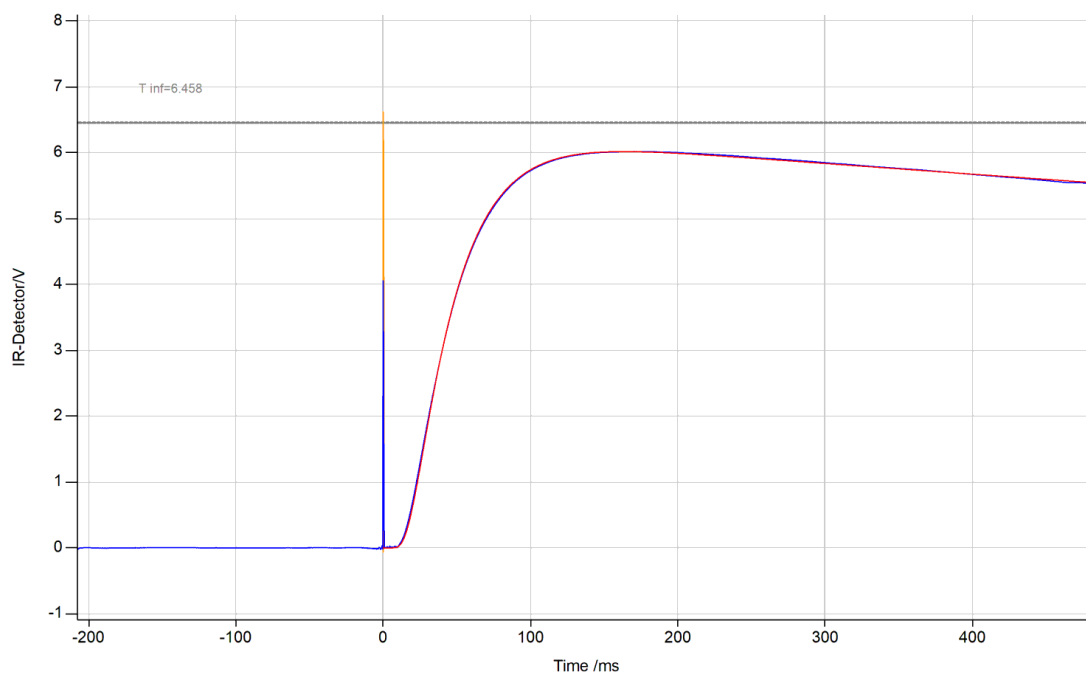


1 Thermophysikalische Eigenschaften von reinem Gallium

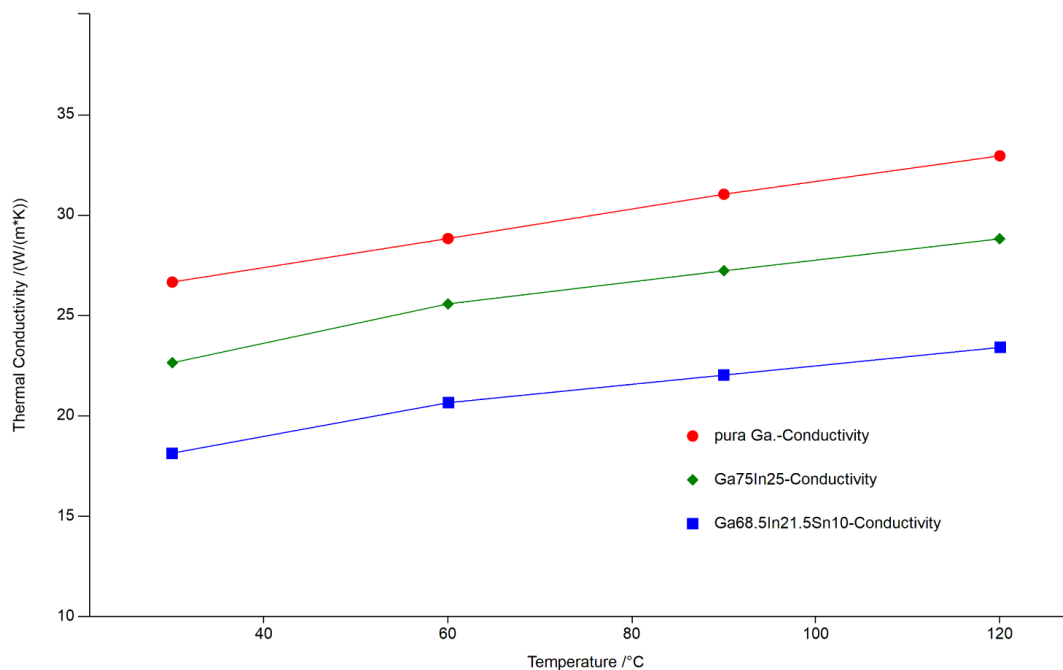
Abbildung 3 zeigt die Temperaturanstiegskurve für die Probe aus reinem Ga bei 30 °C. Dabei ist zu erkennen, dass die gemessene Kurve (blau) sehr gut mit der modellangepassten Kurve (rot) übereinstimmt. Dies bestätigt zusätzlich die Gültigkeit und Genauigkeit der mit dem Probenhalter erzielten Messergebnisse.

Der Schmelzpunkt von reinem Ga liegt bei etwa 29,8 °C. Unter typischen Raumtemperaturbedingungen befindet es sich im festen Zustand und kann daher nicht direkt

als flüssiges thermisches Schnittstellenmaterial oder als fließendes Arbeitsmedium eingesetzt werden. Durch Zugabe von Elementen wie In und Zinn (Sn) zu Ga entstehen eutektische Legierungen, die den Schmelzpunkt deutlich absenken. So besitzt beispielsweise die kommerzielle Ga-In-Sn-Legierung Galinstan einen Schmelzpunkt von nur -19 °C. Sie bleibt damit unter den meisten natürlichen Umgebungsbedingungen flüssig, wodurch sich ihr Anwendungsspektrum erheblich erweitert.



3 Gemessene Temperaturanstiegskurve (blau) und modellangepasste Kurve (rot) zeigen eine ausgezeichnete Übereinstimmung. Probe: reines GA; Temperatur 30 °C.



4 Wärmeleitfähigkeit von reinem Ga, Ga-In-Legierung und Ga-In-Sn-Legierung.

Abbildung 4 zeigt die Ergebnisse der Wärmeleitfähigkeit von reinem Ga sowie der Legierungen GaIn ($\text{Ga}_{75}\text{In}_{25}$) und GaInSn ($\text{Ga}_{68.5}\text{In}_{21.5}\text{Sn}_{10}$), gemessen mit dem speziellen PEEK-Probenhalter für Flüssigkeiten im Temperaturbereich von 30 °C bis 120 °C. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Legierung von Ga mit In und Sn zu einer Verringerung der Wärmeleitfähigkeit führt. Die Zugabe von In und Sn erzeugt zusätzliche Streuzentren für freie Elektronen im flüssigen Ga, verkürzt die mittlere freie Weglänge der Elektronen und reduziert damit die Wärmeleitfähigkeit, da der Wärmetransport in galliumbasierten Flüssigmetallen von freien Elektronen dominiert wird [2]. Die Legierungszusammensetzung – einschließlich des In- und Sn-Gehalts – beeinflusst die Wärmeleitfähigkeit erheblich. Eine genaue Messung der Wärmeleitfähigkeit liefert daher eine Grundlage für das Screening und die Formulierungsoptimierung galliumbasierter Flüssigmetalle.

Zusammenfassung

Galliumbasierte Flüssigmetalle können wie Wasser fließen und verfügen gleichzeitig über eine ausgezeichnete Wärmeleitfähigkeit und Stabilität. Damit zeigen sie ein außergewöhnliches Potenzial im Bereich der Wärmeableitung. Die NETZSCH LFA 717 *HyperFlash*®

kann in Kombination mit dem PEEK-Probenhalter für Flüssigkeiten und einem speziellen Drei-Schicht-Berechnungsmodell die Wärmeleitfähigkeit galliumbasierter Flüssigmetalle präzise bestimmen. Dies ist von großer Bedeutung, um die Wärmeableitungsfähigkeit von Flüssigmetallen zuverlässig zu bewerten und darauf aufbauend effiziente und robuste Lösungen für das Wärmemanagement bereitzustellen.

Literatur

- [1] Y. S. Touloukian et al. (1970). Thermophysical Properties of Matter: The TPRC Data Series. Thermal Conductivity: Metallic Elements and Alloys. (S. 107)
- [2] Dickey, M. D. Gallium Liquid Metal: The Devil's Elixir. Annu. Rev. Mater. Sci. 2017, 47, 103–130.