

Hermetisches Fügen von MEMS-basierten Bauelementen mithilfe von reaktiven Multischichtsystemen (RMS)

Dipl.-Ing. Erik Pflug, Dipl.-Ing. Georg Dietrich, Prof.-Dr. Andreas Leson, Dresden¹,
Dr.-Ing. Axel Schumacher, Dr.-Ing. Stephan Knappmann, Prof.-Dr. Alfons Dehé,
Villingen-Schwenningen²

Zusammenfassung

Zur Realisierung hermetisch dichter Fügeverbindungen wurden mit Zr/Si/Al neuartige reaktive Multischichtsysteme entwickelt, die durch ihre geringere Schwindung während der Legierungsbildung zu weniger Rissbildung führen als die gebräuchlichen Ni/Al-Systeme. Vorhandene Prozessgeräte zur Montage von Bauteilen, Einzelchips und von ganzen Wafern wurden mit Zusatzkomponenten versehen, um reaktive Fügeprozesse sowohl an Luft als auch im Vakuum durchführen zu können. Im Rahmen eines Versuchsprogramms mit Testsubstraten aus Silizium und Borosilikatglas wurde ein Prozess zum reaktiven Fügen erarbeitet, der zu deutlich reduzierter Rissbildung im Reaktivschichtsystem und in den zu fügenden Komponenten führt. Anhand der Deckelung eines Keramikgehäuses mit einem Chip aus Borosilikatglas konnte eine feinleckdichte Fügeverbindung erzielt werden.

1. Einleitung

Im Zuge der zunehmenden Integration und Miniaturisierung in der Mikrosystemtechnik steigen die Anforderungen an die Aufbau- und Verbindungstechnik. Dabei müssen Fügeprozesse in der Mikrosystemtechnik nicht nur die Herstellung einer dauerhaften Verbindung zwischen Komponenten einer Baugruppe erfüllen, sondern sie müssen meist weitere Funktionen abdecken. Insbesondere realisieren sie auch elektrische Kontakte, Wärmebrücken und hermetisch abgeschlossene Bereiche. Bei den derzeit eingesetzten Waferbondverfahren, wie anodisches Bonden, Fusionsbonden, Glasfrittbonden, eutektisches Bonden oder Thermokompressionsbonden werden teilweise hohe Prozesstemperaturen benötigt. Beim Einsatz verschiedener Materialien mit unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten führt dies zu Stress in der Fügezone und einer hohen Wärmebelastung der Fügepartner. Die genannten Nachteile der Fügeverfahren bei erhöhten Prozesstemperaturen können vermieden werden, wenn die zum Fügeprozess erforderlichen Temperaturen nur auf die Fügestelle begrenzt und somit die Bauteile selbst davor verschont werden. Dies ist aufgrund der sehr kurzen Prozesszeiten und der Anpassbarkeit der RMS-Eigenschaften auf den Anwendungsfall beim Fügen mit reaktiven Multischichtsystemen (RMS) möglich.

In den vergangenen Jahren wurden F&E-Arbeiten durchgeführt, um RMS zu entwickeln und für die Anwendungen in der Mikrosystemtechnik zu evaluieren [1, 2]. So ist es derzeit möglich, RMS als freistehende, vorbelotete Folien für Anwendungen auf Bauteilebene, als auch in Form integrierter, direkt auf Bauteil- und Waferlevel abgeschiedener Schichtsysteme herzustellen. Weiterhin ist bekannt, dass bei der Reaktion des gebräuchlichsten und kostengünstigen Ni/Al-RMS eine Volumenschwindung von 12,4 % innerhalb der RMS auftritt. Dadurch bilden sich während der Reaktion Risse in der Fügezone, welche für das hermetische Fügen eine besondere Herausforderung darstellen. Diese Risse werden bei konventionellen RMS nicht immer mit dem aufgeschmolzenen Lot

¹ Fraunhofer-Institut für Werkstoff- und Strahltechnik IWS

² Hahn-Schickard-Gesellschaft für angewandte Forschung e.V.

oder Grundwerkstoff ausgefüllt und wirken als Kanäle zwischen Kavität und Umgebung, was letztlich zu Undichtigkeiten der Fügeverbindung führt [3].

Ziel des vorliegenden Projektes war es, durch reaktives Fügen hermetisch dichte Fügeverbindungen sowohl auf Bauteil- als auch auf Chip- und auf Waferebene zu realisieren. Aufgrund der hohen Volumenschwindung der Ni/Al-RMS und damit verbundener Rissbildung wurden neuartige RMS mit reduzierter Rissbildung entwickelt und für Fügeversuche bereitgestellt. Darüber hinaus wurden die zum reaktiven Fügen erforderlichen Prozessgeräte entsprechend angepasst.

2. Reaktive Multischichtsysteme (RMS)

RMS sind nanoskalige, lagenweise aufgebaute Schichtsysteme, welche aus mindestens zwei Materialien bestehen, die exotherm miteinander reagieren können. Wird in dieses System eine Aktivierungsenergie in Form eines Laserimpulses oder elektrischen Funkens eingebracht, bildet sich eine selbstfortschreitende exotherme Reaktion aus (Abbildung 1). Dabei kommt es zur Freisetzung von Wärme, die zum Fügen durch Aufschmelzen von Loten oder des Grundmaterials genutzt werden kann. RMS können sowohl als freistehende Folie oder auch als Schichtsystem direkt auf Bauteilen abgeschieden werden. Die Einzelschichtdicken eines RMS erstrecken sich über wenige Nanometer, wohingegen je nach Anwendung die RMS-Gesamtdicke von einigen Mikrometern bis hin zu mehr als hundert Mikrometern variiert.

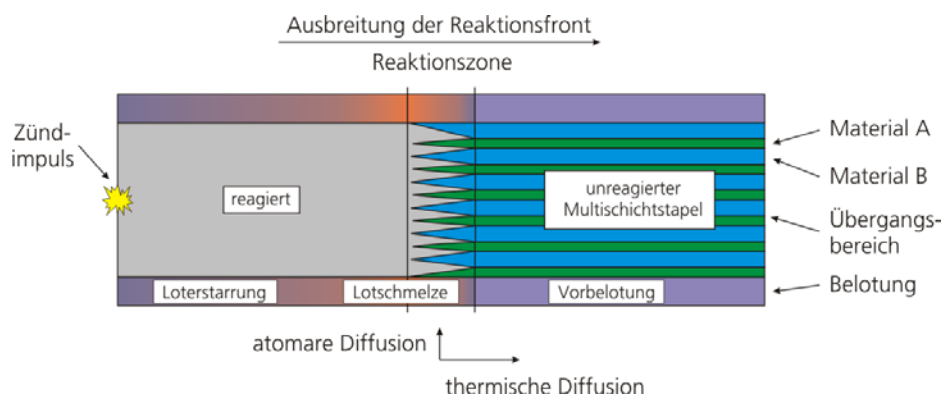


Abbildung 1: Aufbau und Prinzip von RMS

RMS bieten den Vorteil, dass ihre Eigenschaften sehr gezielt auf den Anwendungsfall (Material) anpassbar sind. So können fugezoneninterne Wärmequellen geschaffen werden, welche die zum Fügen notwendige Energie in einem sehr kurzen Zeitraum, lokal und präzise steuerbar, freigeben. Die RMS-Eigenschaften, wie zum Beispiel Energiemenge, Ausbreitungsgeschwindigkeit der Reaktionsfront und Reaktionstemperatur können sowohl über das Materialsystem als auch über das Schichtdesign auf den jeweiligen Anwendungsfall zugeschnitten werden. Die Materialsysteme werden in niederenergetische RMS, z. B. Ti/Al, mittelenergetische RMS, z. B. Ni/Al und hochenergetische RMS, z. B. Zr/Si unterteilt (Tabelle 1). Weiterhin kann über das stöchiometrische Verhältnis eines RMS die freisetzbare Wärmemenge und Reaktionsgeschwindigkeit maßgeschneidert und an den Anwendungsfall angepasst werden.

Tabelle 1: RMS-Eigenschaften in Abhängigkeit des Materialsystems

RMS-Materialsystem	Frei werdende Bindungsenthalpie in kJ/mol	Adiabatische Reaktionstemperatur in °C
Ti/Al	-36	1227
Zr/Al	-45	1480
Ni/Al	-59	1639
Zr/Si	-72	2250

Zur Herstellung von reaktiven Multischichtsystemen werden hochpräzise PVD-Sputterverfahren eingesetzt. In den letzten Jahren wurden vermehrt Anstrengungen unternommen, um durch geeignete Prozessführung, RMS-Design und Anlagenausnutzung den Herstellungsprozess hinsichtlich der Kosten zu optimieren und damit die Anwendung der Füge-technologie auch wirtschaftlich umsetzbar zu machen. Als Basis zur Herstellung der RMS wurde eine kostengünstige Batch-Anlage der Fa. VTD GmbH am Fraunhofer IWS Dresden genutzt, welche auf hohe Raten, große Flächen und geringe Investitionskosten optimiert ist (Abbildung 2). Die Anlage verfügt über vier DC-Magnetronsputterquellen, welche Targets mit der Dimension von 650 x 125 mm² aufnehmen können. Auf einem innerhalb der Vakuumkammer angeordneten Sechsfach-Polygonsubstratträger können insgesamt fünf Substrate mit einer maximalen Geometrie von 430 x 220 mm² mit einer Homogenität von über 95 % beschichtet werden. Somit ist die Abscheidung von bis zu zehn 8-Zoll Wafern pro Beschichtungsdurchgang möglich. Durch die Weiterentwicklung des Herstellungsprozesses hinsichtlich Beschichtungsparameter können im Labormaßstab Kosten pro cm² von etwa 40 Eurocent für eine 40 µm Ni/Al-RMS erreicht werden. Betriebswirtschaftliche Abschätzungen zeigen, dass dieser Wert durch Aufskalierung der Beschichtungstechnik und weitere Optimierung der Beschichtungsparameter, sowie Teilautomatisierung des Substrat- und Handlingsprozesses zukünftig auf ca. 10 Eurocent/cm² reduziert werden kann.

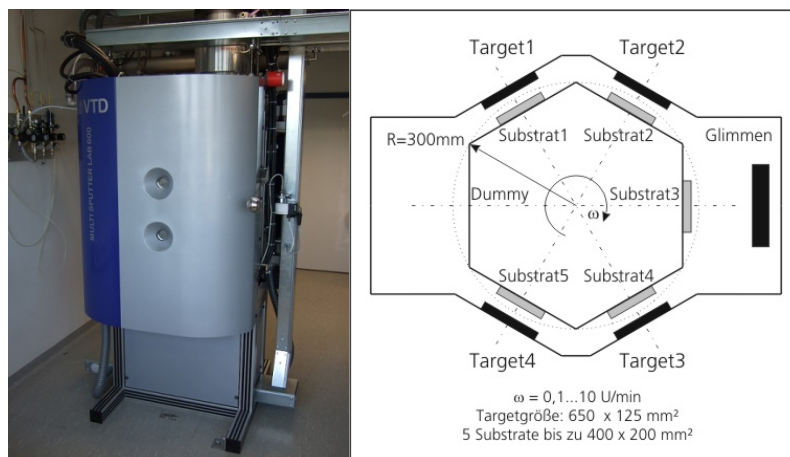


Abbildung 2: Prinzipieller Aufbau der MSD-Abscheideanlage zur Herstellung von RMS am Fraunhofer IWS Dresden

3. Entwicklung rissarmer RMS auf Zr/Si-Basis

Aufgrund der oben genannten Nachteile des Ni/Al-RMS wurde im Rahmen dieses Vorhabens die Entwicklung des neuartigen Zirkonium-Silizium-Systems (Zr/Si) vorangetrieben, welches entscheidende Vorteile für die MST aufweist. So gehört es zu den hochenergetischen Materialsystemen, wodurch sowohl die für das Fügen notwendigen Schichtdicken von üblicherweise 40 – 50 µm beim Ni/Al-System auf ca. 10 – 25 µm verringert werden können, als auch Hartlote aufschmelzbar sind, die zu Verbindungsfestigkeiten von über 100 MPa führen können. Weiterhin

weist das Zr/Si-System mit etwa 3 % eine sehr geringe Reaktionsschwindigkeit auf (Faktor 4 geringer als Ni/Al), wodurch rissfreie Fügeverbindungen hergestellt werden können, die die Realisierung hermetisch dichter Verbindungen ermöglichen. Zudem wurde aufgrund des Einsatzes von preiswerten, leicht verfügbaren Materialien ein Ansatz gewählt, die reaktive Fügetechnologie noch kosteneffektiver zu gestalten, um ein breites Anwendungsspektrum zu eröffnen. So werden Kosten von wenigen Cent/cm² für die RMS-Abscheidung erwartet.

Die Herstellung von Zr/Si-Systemen konnte bereits sowohl als freistehende RMS-Folie bis zu 30 µm Dicke, als auch durch direkte Abscheidung auf Wafern bis zu 15 µm Dicke realisiert werden. Dabei wurde eine Periodendicke von 50 nm und ein stöchiometrisches Verhältnis von Zr:Si = 5:3 angestrebt, um die maximale Reaktionsenthalpie des Systems zu erhalten. Dieses System ist aber aufgrund seiner hohen Reaktionsfreudigkeit und hoher Eigenspannungen sowohl in der Herstellung als auch im Handling kritisch und momentan noch schwer realisierbar. Um dennoch das gewünschte hochenergetische Zr/Si-RMS herstellen zu können, wurden verschieden dicke Al-Barrieren zwischen den Reaktivmaterialien eingebracht, um die Zündenergie zu erhöhen sowie die Eigenspannungen zu senken. Dabei wirkt das Aluminium duktil und reduziert die Eigenspannung des ursprünglichen Zr/Si-Systems. Neben der Entstehung von Zr-Si-Phasen treten zusätzlich Zr-Al-Phasen auf, welche geringere Energieinhalte besitzen. Dadurch wird zum einen die Zündenergie erhöht und somit das gewünschte Zr/Si-RMS herstell- und handhabbar, und zum anderen wird die geforderte Gesamtschichtdickenreduzierung gewährleistet. Die Reaktionsenthalpie des ternären Zr/Si/Al-Systems liegt trotz der Entstehung von weniger energiehaltigen Zr/Al-Phasen nur geringfügig unterhalb des angestrebten Zr/Si-RMS. Die Reaktionsgeschwindigkeit des Zr/Al/Si-RMS ist um Faktor 2-3 höher als beim Ni/Al-System, weshalb der Fügeprozess deutlich kürzer abläuft.

Mittels Laserstrukturierung lassen sich aus freistehenden RMS-Folien Preforms in nahezu beliebiger Geometrie erzeugen. Bei der direkten Abscheidung von RMS auf Wafern können Schattenmasken aus Silizium zur strukturierten Beschichtung dienen (Abbildung 3). Für einfache Preformgeometrien kann auch ein Rollmesser oder ähnliches eingesetzt werden.

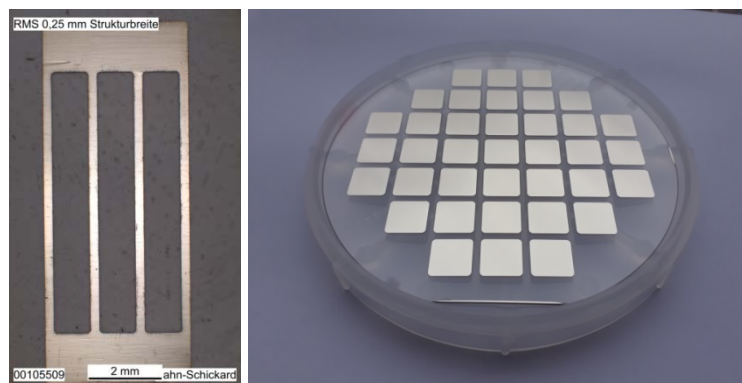


Abbildung 3: Preform aus Zr/Si-RMS, hergestellt durch Laserschneiden (links). Über Schattenmaske beschichteter 100 mm Borosilikatglaswafer (rechts)

4. Entwicklung eines reaktiven Fügeprozesses

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, gegebenenfalls mit einer dazwischen befindlichen RMS-Preform, mit der geforderten Genauigkeit zur Deckung gebracht werden. Weiterhin müssen die Fügepartner während des Fügeprozesses mit einem definierten Anpressdruck versehen werden. Für

die Fügeversuche an Einzelbauteilen und Chips diente ein Flip-Chip-Bonder FINEPLACER® Pico (Finetech GmbH) mit manuellem Bondkraftmodul. Das Funktionsprinzip ist schematisch in Abbildung 4 dargestellt. Der untere Fügepartner (Substrat) befindet sich auf der ebenen Substratunterlage. Das zu fügende Bauteil (Chip) ist mittels Vakuum am Platzierkopf befestigt. In der Ausgangsposition (Justierposition, Abbildung 4, links) wird die Substratunterlage in ihrer Höhe so eingestellt, dass die Substratoberfläche in der Arbeitsebene liegt. Die Oberfläche des Bauteils befindet sich in der oberen Armposition, die zur Arbeitsebene einen 90°-Winkel bilden muss. In der optischen Beobachtungsachse befindet sich ein Strahlteiler, der es ermöglicht, Substrat und Bauteil gleichzeitig zu betrachten. Durch Drehen der Substratunterlage und mit den Mikrometerschrauben werden nun die Fügeflächen in lateraler Richtung optisch zur gewünschten 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 (Abbildung 4, rechts).

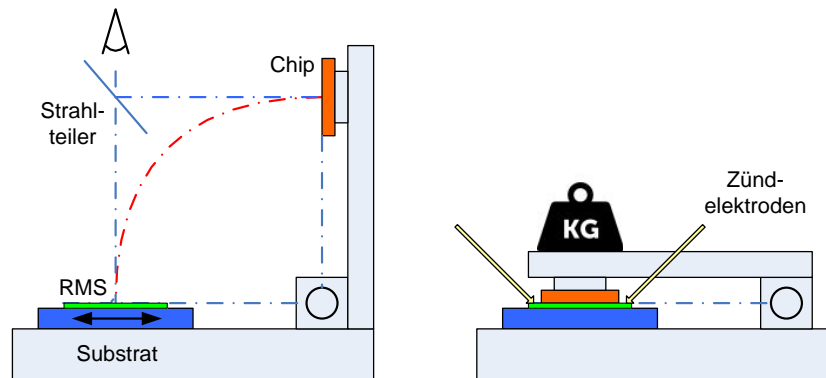


Abbildung 4: Funktionsprinzip des Flip-Chip-Bonders zum reaktiven Fügen auf Bauteilebene. Links: Justage, rechts: Anpressen und Zünden

Zum reaktiven Fügen von Einzelchips wurde für einen vorhandenen Waferbonder (EV 500, Electronic Visions, Abbildung 5) eine Zündvorrichtung konstruiert und in die Vakuumkammer des Waferbonders integriert. Hierzu wurden Paare von Zündelektroden in eine Anpressplatte aus Kunststoff eingesetzt. Über eine Vakuumdurchführung wurden die Elektrodenanschlüsse nach außen geführt. Auf diese Weise konnten bis zu drei Einzelchips simultan unter Vakuumbedingungen reaktiv gefügt werden.

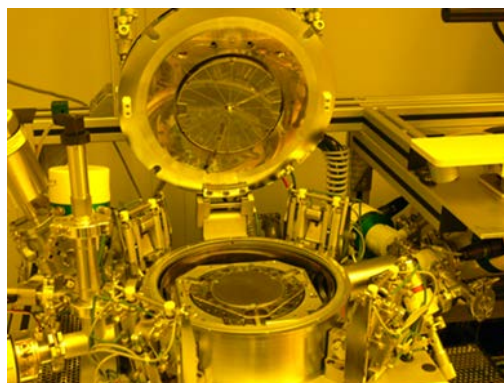


Abbildung 5: Waferbonder EV 500 mit geöffneter Vakuumkammer

Fügeversuche wurden sowohl mit strukturierten RMS-Folien (Preforms) als auch mit direkt beschichteten Testsubstraten durchgeführt. In einer Versuchsreihe wurden Silizium- und

Borosilikatglaswafer über Schattenmasken direkt mit Lot-RMS-Lot beschichtet und anschließend mit der Wafersäge in 12 x 12 mm² große Chips vereinzelt. Deckelchips (8 x 8 mm²) aus Borosilikatglas wurden mit Kontaktmetallisierung und unterschiedlichen Belotungen bereitgestellt. In Tabelle 2 sind die in dieser Versuchsreihe verwendeten Varianten aufgelistet.

Tabelle 2: Testchip-Varianten für die Fügeversuche mit Direktbeschichtungen

Variante	Basissubstrat 12 x 12 mm ²	Deckelchip 8 x 8 mm ²
1	Silizium + Weichlot (4 µm Sn) + 12 µm Zr/Si-RMS	Borosilikatglas + Weichlot (4 µm SAC)
2	Borosilikatglas + Weichlot (4 µm Sn) + 12 µm Zr/Si-RMS	
3	Silizium + Hartlot (4 µm Incusil) + 12 µm Zr/Si-RMS	Borosilikatglas + Hartlot (4 µm Incusil)
4	Borosilikatglas + Hartlot (4 µm Incusil) + 12 µm Zr/Si-RMS	

Zur Auswertung der Fügeverbindungen wurden folgende Methoden der Charakterisierung herangezogen:

- Optische Beurteilung (Mikroskopaufnahmen) der gefügten Testsubstrate, Rissbildung in Deckel und Substrat
- Anfertigung von Querschliffen, daraus Beurteilung der Lotanbindung, Rissbildung in der RMS und in den Fügepartnern, Spalte und Ablösungen, Lotfluss (lateral und Füllung von RMS-Rissen, Abbildung 6)

Obwohl die Schwindung der Zr/Si-RMS im Vergleich zur Ni/Al-RMS deutlich geringer ist, treten innerhalb der reagierten Zr/Si-RMS dennoch vereinzelt Risse auf. Diese werden bei Verwendung von Weichloten (Varianten 1 und 2 in Tabelle 2) größtenteils mit Lot ausgefüllt. Im Gegensatz dazu werden bei Verwendung von Hartlot (Varianten 3 und 4) nur die größten Risse mit Lot gefüllt, während kleinere Risse ungefüllt sind.

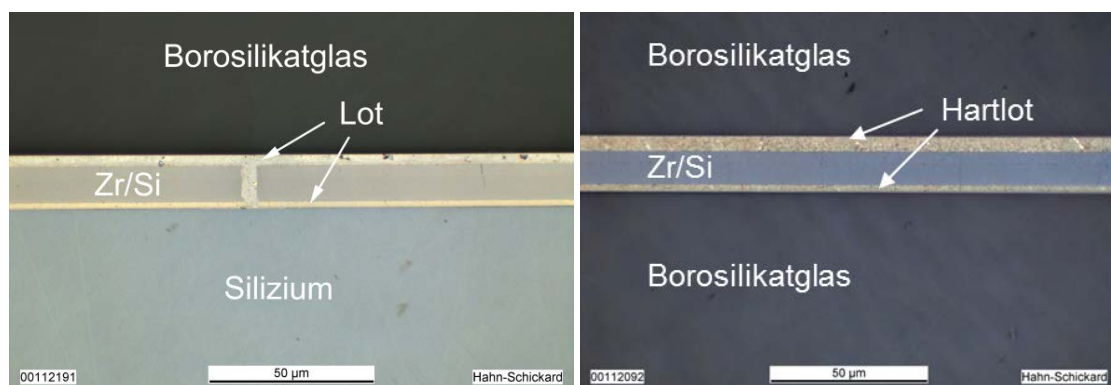


Abbildung 6: Querschliffe von reaktiv gefügten Testsubstraten aus Borosilikatglas und Silizium mit Weichlot (links) und von Borosilikatglas mit Borosilikatglas und Hartlot (rechts)

5. Hermetisch dichte Deckelung von Keramikgehäusen

Mit Hilfe der Erkenntnisse und Ergebnisse der Vorversuche mit den Testsubstraten wurden Deckelungsversuche von Keramikgehäusen (LCC01627, Spectrum Semiconductor Materials, Inc.) mit Chips aus Borosilikatglas zur Bestimmung der hermetischen Dichtheit durchgeführt (Abbildung 7).

Auf Glasdeckeln wurden zunächst Cr + Cu als Haft- und Benetzungsschichten, darauf galvanisch Weichlot (Sn) und schließlich Incusil + Zr/Si/Al-RMS + Incusil abgeschieden. Um die unvorteilhaften vorhandenen Unebenheiten der Metallrahmen der Keramikgehäuse zu beseitigen, wurden die Metallrahmen zunächst galvanisch mit Ni verstärkt und durch mechanisches Schleifen planarisiert. Zur Verbesserung der Lotanbindung wurde auf die Nickeloberfläche nochmals galvanisch eine dünne Goldschicht aufgetragen. Nach dem Fügen mit dem Diebonder wurden zwei der gedeckelten Gehäuse mit einem He-Lecksucher auf Dichtheit geprüft. Die gemessenen Leckraten befinden sich im Feinleckbereich und betragen etwa $2 \cdot 10^{-8}$ mbar·l/sec.

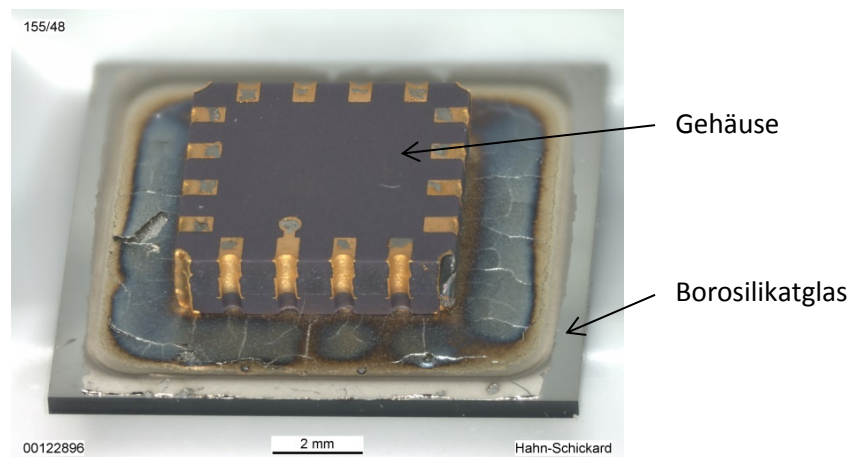


Abbildung 7: Keramikgehäuse LCC01627 mit reaktiv gefügtem Deckelchip aus Borosilikatglas

6. Schlussfolgerung und Ausblick

Mit ternären Zr/Si/Al-Systemen steht ein hochenergetisches RMS zur Verfügung, das sowohl als freitragende Folie hergestellt als auch direkt auf Bauteile oder Wafer abgeschieden und strukturiert werden kann. Im Gegensatz zu Ni/Al- zeigen Zr/Si/Al-RMS deutlich weniger Schwindung und führen damit zu weniger Rissen, was eine Voraussetzung für hermetisch dichtes Fügen darstellt. Zudem können auch mit deutlich dünneren Schichten dieselben Energiemengen freigesetzt werden. Zum reaktiven Fügen von Bauteilen und Einzelchips steht ein Diebonder, zum Fügen von einzelnen Chips und von ganzen Wafern unter Vakuum ein Waferbonder im Reinraum zur Verfügung. Mithilfe von Testsubstraten aus Silizium und Borosilikatglas wurden Versuche zum reaktiven Fügen mit Zr/Si-RMS in Verbindung mit Hart- und Weichloten durchgeführt, um die Bedingungen für rissfreies Bonden zu erarbeiten. Anhand der Deckelung von Keramikgehäusen mit Borosilikatglas konnte demonstriert werden, dass mit dem reaktiven Fügen feinleckdichte Verbindungen erzielt werden können. Weitere Untersuchungen zur Optimierung der Zr/Si-RMS sowie zu deren Anwendungsmöglichkeiten in der Mikrosystemtechnik sind geplant.

Danksagung

Das IGF-Vorhaben 19069 BG der Forschungsvereinigung Schweißen und verwandte Verfahren e.V. des DVS wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Den PA-Mitgliedern sei für ihre konstruktiven und zielführenden Anmerkungen sowie ihrer Unterstützung herzlich gedankt.

Literatur

- [1] J. Bräuer, Erarbeitung eines Raumtemperatur-Waferbondverfahrens basierend auf integrierten und reaktiven nanoskaligen Multilagensystemen, Dissertation, TU-Chemnitz, 2013
- [2] Fraunhofer IWS Dresden, IGF-Vorhaben 17.370 B: Entwicklung und Herstellung von neuartigen reaktiven Multilayersystemen (RMS) für die Mikroverbindungstechnik durch PVD (2011-2014)
- [3] G. Dietrich, A. Schumacher, J. Freitag, Reaktive Nanoschichten – ein innovatives Fügekonzept für die AVT auf Bauteil- und Waferlevel, Tagungsband Mikrosystemtechnik-Kongress 2017, 23.-25. Oktober 2017, München, VDE-Verlag 2017, S. 325-328