

Schwingungsanalyse von Chipaufbauten mit Überhangstrukturen hinsichtlich der Bondbarkeit

Tom Dobs, Technische Universität Berlin, Forschungsschwerpunkt Technologien der Mikroperipherik, Berlin, tom.dobs@tu-berlin.de

Jan Höfer, Fraunhofer Institut für Zuverlässigkeit und Mikrointegration, Berlin, jan.hoefer@izm.fraunhofer.de

Dr. Lars Helmich, Hesse GmbH, Paderborn, lars.helmich@hesse-mechatronics.com

Dr. Matthias Hunstig, Hesse GmbH, Paderborn, matthias.hunstig@hesse-mechatronics.com

Prof. Dr. Klaus-Dieter Lang, Fraunhofer Institut für Zuverlässigkeit und Mikrointegration, Berlin, Klaus-Dieter.Lang@izm.fraunhofer.de

Kurzfassung

Das Ultraschall-Drahtbonds wird zur elektrischen Kontaktierung elektronischer Teilsysteme verwendet. Ein Anwendungsbereich ist die Kontaktierung von Silizium-Chips in stark miniaturisierten Baugruppen. Die Bondfrequenzen liegen dabei vor allem im Bereich 60 kHz bis 140 kHz. Bei komplexen Chip-Aufbauten kann die Bondfrequenz kritische Eigenfrequenzen der Substrate treffen und letztere zu Schwingungen anregen, wodurch eine gute Verbindungsbildung erschwert sein kann.

In dieser Arbeit werden Chipaufbauten mit Überhangstruktur hinsichtlich des Schwingverhaltens bei bondkritischen Frequenzen von 138 kHz und 180 kHz numerisch und experimentell untersucht. Es werden Testvehikel simulationsgestützt entwickelt, die potentiell bondkritische Eigenfrequenzen in den angestrebten Frequenzbereichen haben. Zur Beurteilung des Schwingverhaltens wird mittels Laservibrometrie die Auslenkung des Überhangs bei externer mechanischer Anregung und während des Bondprozesses gemessen. Es wird ein Parameterraum für den Bondprozess festgelegt und systematische Bonduntersuchungen werden durchgeführt. Dafür wird auf festem Untergrund und auf der Überhangstruktur gebondet, wobei der Überhang bei etwa 138 kHz bzw. 180 kHz Anregungsfrequenz in Resonanz ist. Anhand von Qualitätsbedingungen werden die Bondstellen bewertet.

1 Motivation

In stark miniaturisierten Packages erfordert die Verbindungstechnik gestapelter Chip-Anordnungen das Bonden auf Überhängen. Die Geometrien der zunehmend dünner werdenden Chips können Eigenfrequenzen im Bereich üblicher Bondfrequenzen verursachen. Eine Verbindungsbildung kann auf einem resonant angeregten Substrat erschwert sein. In einigen Fällen könnte ein zuverlässiges Bondergebnis durch den Wechsel der Bondfrequenz erreicht werden. So kann der resonante Bereich von Überhangstrukturen verlassen werden. In einer früheren Arbeit wurde bereits der Einfluss des Klebstoffes auf das Schwingverhalten von Chipaufbauten durch numerische Modellierung und begleitende Experimente gezeigt [1]. In dieser Arbeit wird das Schwingverhalten einer Überhangstruktur untersucht.

2 Numerische Modellierung

Ziel der numerischen Modellierung ist es, eine kritische Überhangstruktur zu identifizieren, die durch die Ultraschallanregung beim Bonden in Resonanz gerät.

2.1 Materialcharakterisierung

Der Aufbau besteht aus einem FR4-Substrat und einem aufgeklebten Chipstapel bestehend aus zwei Silizium-Chips. Soweit notwendig wurden Materialcharakterisierungen durchgeführt, um den Aufbau im Modell genau be-

schreiben zu können. Der ausgewählte Klebstoff (Ablebond 84-1LMISR4) ist mittels Dynamisch-Mechanischer Analyse (DMA) abhängig von Frequenz und Temperatur untersucht worden. Darüber hinaus wurden Dämpfungswerte von Substrat und Chip anhand des Schwingverhaltens bei mechanischer Anregung durch den folgenden Zusammenhang ermittelt [2]:

$$\xi = (1/2) (\Delta\omega / \omega_r)$$

Mit der Bandbreite $\Delta\omega$ bei -3dB der Amplitude in Resonanz und der Resonanzfrequenz ω_r . Die Schwingungsmessung wurde mithilfe eines Laservibrometers durchgeführt. Es wurden die folgenden Dämpfungswerte ermittelt:

- $\xi_{Si} = 0,012$ (Abklingverhalten)
- $\xi_{FR4} = 0,010$ (Abklingverhalten)
- $\xi_{Ablebond} = 0,012$ (DMA)

2.2 Modellierung von Eigenfrequenzen

Es wurde ein parametrisches FE-Modell von einem Chipstapel mit Überhangstruktur erstellt. Durch Parameterstudien wurde die Abhängigkeit resultierender Eigenmoden von den Eingangsparametern Material und Geometrie ermittelt. Dadurch konnte gezielt ein Design für Bondversuche erstellt werden.

Der Modellansatz wird anhand eines Aufbaus mit einer Eigenfrequenz des Überhangs bei 138 kHz validiert. Bei dem zweiten Design soll die Bondfrequenz von 180 kHz die Eigenfrequenz des Überhangs treffen. In Bild 1 ist ein berechnetes Design für eine Eigenfrequenz von etwa 182 kHz

und die ersten vier Moden dargestellt. Weiterhin wurde eine harmonische Analyse im Bereich der Eigenfrequenz durchgeführt, wodurch sich die Peakbreite beurteilen lässt (Bild 2).

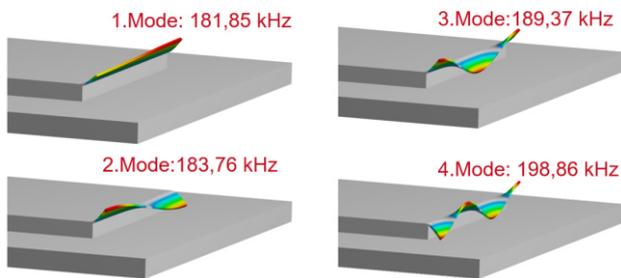


Bild 1 Eigenmoden des Überhangs beim 180-kHz-Design (Überhöhung der Auslenkung)

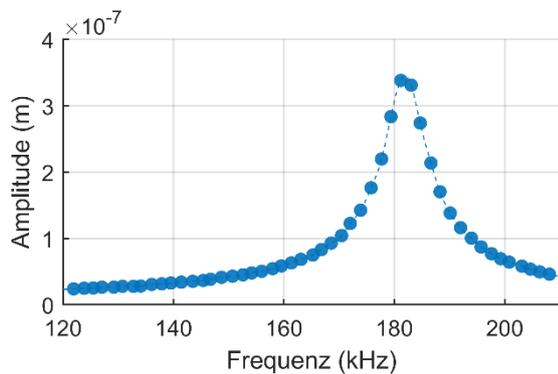


Bild 2 Harmonische Analyse des Aufbaus; Maximale Auslenkung bei 181,85 kHz

2.3 Modellvalidierung anhand des 138-kHz-Aufbaus

Um die oben gezeigte Simulationethodik zu validieren, wurden Silizium-Chip-Stapel (Al-Oberflächenfinish) mit Überhang aufgebaut. Der schematische Aufbau ist in Bild 3 zu sehen. Als Substrat dienen Piezokeramiken, durch die bei elektrischer Anregung mechanisches Schwingen erzeugt wird. Als Die-Attach wurde Ablebond 84-ILMISR84 von Henkel verwendet. Das Setzen des Chipstapels erfolgte mit dem Die-Bonder Hilbond db750 von der Firma Hilpert. Der Überhang von Chip 2 (oberer Chip) wurde so eingestellt, dass die Eigenfrequenz der Teststruktur bei 138 kHz liegt. Durch die mechanische Anregung wird ein Aufschwingen, auf Grund des Resonanzeffekts erwartet.

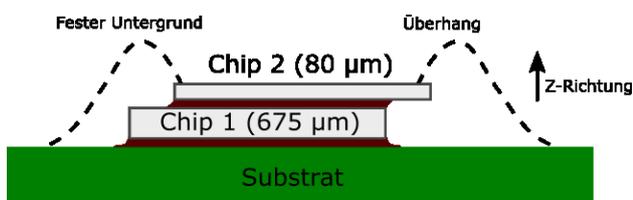


Bild 3 Schematischer Aufbau des Chipstapels mit Überhangstruktur

Mit dem stromverstärkten Signal eines Signalgenerators wurde ein Frequenzsweep von 100 kHz bis 180 kHz zur

Anregung erzeugt. Durch Impedanzmessungen an der unbestückten Piezokeramik konnte sichergestellt werden, dass diese keine Eigenfrequenzen in dem untersuchten Frequenzbereich hat. Gemessen wurde die vertikale Geschwindigkeit mittels Laservibrometer.

Für die Untersuchungen wurde die Piezokeramik mit dem aufgebauten Chipstapel mittels Vakuum fixiert. Das Ergebnis der Messung ist in Bild 5 zu sehen.

Die Kurven zeigen die Messungen an vier Punkten auf dem Chip-Stapel (vgl. Bild 4). Punkt 1 und Punkt 2 zeigen eine deutlich größere Resonanzüberhöhung des Überhangs im Bereich von 140 kHz im Vergleich zum restlichen Teil des Chips (Punkt 3 und Punkt 4), wodurch das Modell bestätigt ist. Der große Amplitudenunterschied zwischen Punkt 1 und Punkt 2 ist ein guter Indikator dafür, dass sich die erste Mode nicht sauber ausbildet. Es muss davon ausgegangen werden, dass der Aufbau des Testvehikels nicht so exakt und symmetrisch durchgeführt wurde, wie das Modell vorgibt.

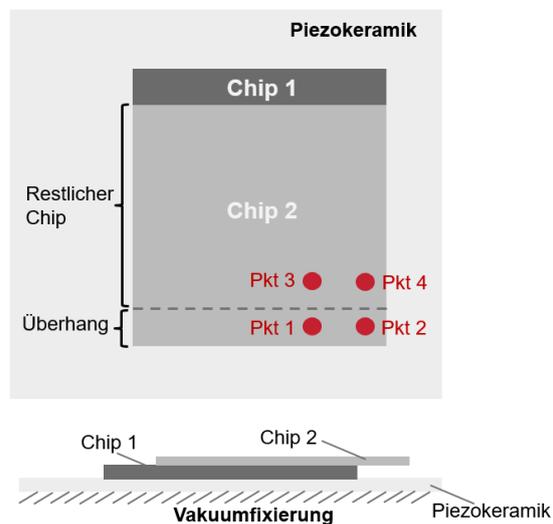


Bild 4 Aufbau für Modellvalidierung durch Anregung des Chipstapels mittels Piezo

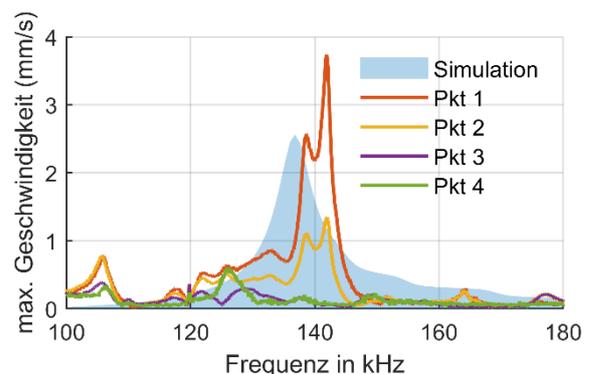


Bild 5 Vergleich der gemessenen und simulierten Geschwindigkeitsamplitude des Chip-Überhangs

3 Bondversuche

Der Aufbau entspricht weiterhin dem Schema in Bild 3. Das Substrat ist FR4, welches mit ENIG (Electroless Nickel/Immersion Gold) metallisiert wurde. Der Überhang von Chip 2 (oberer Chip) wurde so eingestellt, dass die Eigenfrequenz der Teststruktur mit der Bondfrequenz von 180 kHz, bzw. 138 kHz zusammenfällt und dadurch ein Aufschwingen auf Grund des Resonanzeffekts stattfindet. Die Bondversuche erfolgten mit 25 μm AlSi1-Draht (Drahttreiblast: 14 -16 cN; Dehnung: 4%) auf dem Bondjet BJ653 der Firma Hesse.

3.1 Bondversuche bei 138 kHz

Während des Drahtbondens wurde mit einem Laservibrometer die Bewegungsgeschwindigkeit auf dem Chip in Z-Richtung gemessen. Der Messpunkt wurde auf dem Überhang, nahe der ersten Bondstelle platziert. In Bild 6 ist die Messung für die erste Bondverbindung zu sehen. Es ist deutlich erkennbar, dass der Chip während des Bondvorgangs schwingt. In der Abbildung ist auch erkennbar, dass der Bondvorgang auf dem Substrat eine Rückwirkung auf den Überhang hat. Durch Anwendung einer Fast Fourier Transformation lässt sich die Bondfrequenz nachweisen. Da die Dauer allerdings zu kurz für einen kompletten Bondvorgang ist, kann davon ausgegangen werden, dass die mechanische Anregung des Chips nur stattfindet, wenn die Bondverbindung bereits besteht. Die mechanische Anregung kann dabei nur über zwei Pfade zum Messpunkt gelangen – zum einen über den Bonddraht selbst, zum anderen über das Substrat und den geklebten Chipstapel.

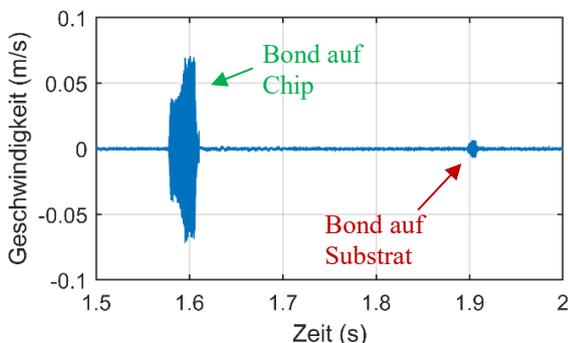


Bild 6 gemessene Geschwindigkeitsamplitude in Z-Richtung auf dem Chip nahe der Bondstelle

Um die Auswirkungen der Bondposition auf dem Überhang aufzuzeigen, wurden in einem Versuch zweimal 25 Bondverbindungen auf den Überhang gesetzt. Die Breite des Überhangs beträgt 810 μm für die Resonanzfrequenz bei 138 kHz. Die erste Bondreihe wurde 250 μm vom Rand entfernt und die zweite Reihe 750 μm vom Rand, also 60 μm von Chip 1 entfernt, gesetzt. In Bild 7 sind die maximalen Geschwindigkeitsamplituden der Messung zu sehen. Der Messpunkt des Laservibrometers blieb für die Messung an einer Ecke des Überhangs (nahe der ersten Bondstelle). Die maximale Geschwindigkeit ist mit etwa 0,11 m/s bei beiden Bondreihen etwa gleich hoch. Die Geschwindigkeit schwankt beim Bonden nahe an der Kante jedoch deutlich stärker als beim Bonden nah an Chip 1. Je

nach Position wird unterschiedlich viel Bewegungsenergie in den Überhang eingekoppelt. Eine mögliche Erklärung ist, dass sich keine gleichmäßige erste Mode (vgl. Bild 1) ausbildet, sondern verschiedene Moden des Überhangs angeregt werden. Die Untersuchungen zeigen, dass die Bondposition auf dem Überhang Einfluss auf das Schwingverhalten haben kann.

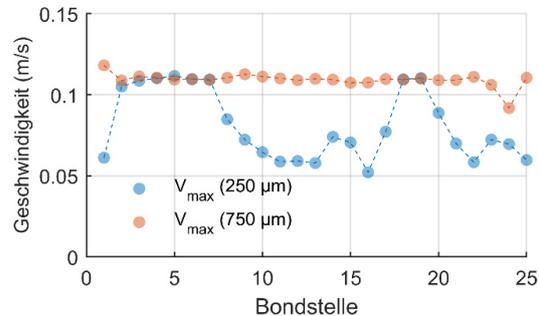


Bild 7 Messung während des Bondprozesses auf Überhang: 250 μm und 750 μm Abstand zum Rand

3.2 Bondversuche bei 180 kHz

Für die Aufbauten mit einer angestrebten Resonanz bei 180 kHz wurde die Länge des Überhangs nach Vorgabe der Simulation angepasst. Die Bestimmung der tatsächlichen Resonanzfrequenz des Überhangs erfolgte durch Messungen mit dem Laservibrometer, wobei die Anregung mit unterschiedlichen Frequenzen durch das Bondtool erfolgte, welches auf die Chipkante aufgesetzt wurde. Die gemessene Resonanzfrequenz des Aufbaus liegt bei etwa 174 kHz, was eine gute Näherung zu den Simulationsergebnissen (182 kHz) darstellt. Die harmonische Analyse (vgl. Bild 2) zeigt, dass der Peak der Eigenfrequenz breit genug ist um einen Resonanzeffekt bei der Bondanregung mit 180 kHz zu erzeugen. Abweichungen werden auf Fertigungstoleranzen zurückgeführt. Einfluss haben unter anderen die Prozesstoleranzen beim Dünnen und Vereinzeln der Chips. Eine Herausforderung bestand zudem in der Einstellung des Überhangs. Ziel war ein Überhang von 675 μm , die Positioniergenauigkeit der genutzten Maschine ist $\pm 10 \mu\text{m}$.

Die Qualität der Bondverbindungen wurde nach DVS-Merkblatt 2811 bewertet:

- Bondfubreite/Deformation – Ziel: max. 2-facher Drahtdurchmesser
- Gemittelte Pullkraft – Ziel: 0,5-fache Drahttreiblast
- Die Standardabweichung der Pullkraft bezogen auf den Mittelwert sollte kleiner als 15 % sein
- Pullcode: Abheber sind nicht zulässig

Zunächst erfolgte die Einstellung eines stabilen Prozessfensters auf festem Untergrund bei einer Bondfrequenz von 180 kHz. Dafür wurden die Bondkraft und die Ultraschalleistung variiert und Bondversuche durchgeführt. Pro Parametersatz wurden mindestens 25 Bondstellen untersucht. Die Stabilität wurde anhand von Qualitätsbedingungen gemäß DVS-Merkblatt 2811 bewertet. Der Fokus der Untersuchungen lag auf den chipseitigen Bondverbindungen, weshalb der Pullhaken für die Pulltests so nah wie möglich

an der Chipkante positioniert wurde. Es wurden 12 Parametersätze mit der Bondkraft von 16 cN bis 28 cN und der Ultraschalleistung von 20 % bis 26 % gewählt. Anschließend wurde mit den gleichen Parametern auf dem Überhang gebondet, um den Einfluss des Untergrunds auf die Bondqualität zu bewerten.

4 Ergebnisse

Für alle untersuchten Parametersätze waren die Bondergebnisse auf festem Untergrund und auf dem Überhang qualitätsgerecht gemäß DVS-Merkblatt 2811. Die mittlere Deformation lag unter 50 µm, die Pullkräfte betragen im Mittel mindestens 7 cN und als Pullcodes wurden ausschließlich Heelrisse beobachtet. Die Deformation auf dem Überhang ist bei 10 von 12 Parameterkombinationen größer als auf dem festen Untergrund (vgl. Bild 11). Darüber hinaus sind an den Wedges, die auf dem Überhang gebondet wurden, Ausfransungen zu beobachten. In Bild 8 und Bild 9 sind Wedges, die mit gleichem Parametersatz gebondet wurden, in Abhängigkeit des Untergrunds gegenübergestellt. Neben den beschriebenen Ausfransungen sind Unterschiede in der Wedgegeometrie zu erkennen. Während auf festem Untergrund eine typische ovale Form der Wedges zu sehen ist (vgl. Bild 8), wirken die Wedges auf dem Überhang (vgl. Bild 9) leicht asymmetrisch. Weiterhin konnten an den Bondverbindungen, welche auf dem Überhang gebondet wurden, Hinweise auf Einkerbungen im Heelbereich beobachtet werden. Die genaue Ursache ist nicht bekannt. Möglich ist, dass durch das Nachgeben des Überhangs beim Bonden eine zusätzliche Belastung auf den Heel durch das Bondtool wirkt.

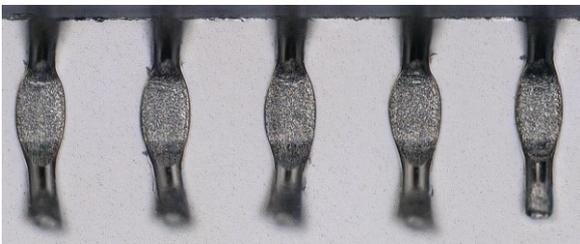


Bild 8 Wedges gebondet auf festem Untergrund (Bondkraft: 28 cN; mittlere Deformation: 43 µm)



Bild 9 Wedges gebondet auf Überhang (Bondkraft: 28 cN; mittlere Deformation: 44,3 µm)

In Bild 10 sind die Mittelwerte der korrigierten Pullkraft für alle untersuchten Parametersätze dargestellt. Die mittlere Pullkraft bei den Parametersätzen, die auf Überhang gebondet wurden, ist etwa 1 cN niedriger als die auf festem Untergrund gebondeten. Das kann auf die höhere Deformation und die Schwächung im Heelbereich zurückgeführt werden.

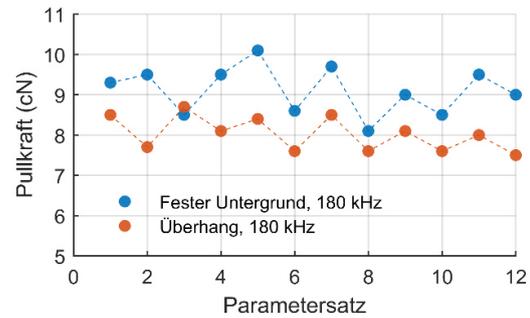


Bild 10 Mittelwert der korrigierten Pullkraft für jeden Parametersatz

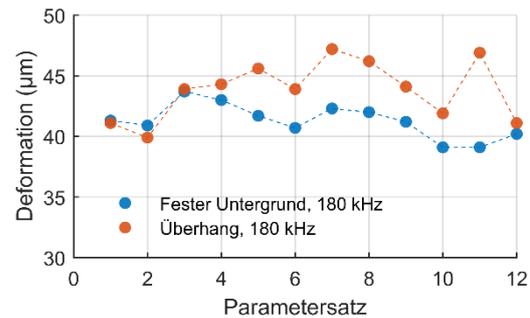


Bild 11 Mittelwert der Deformation für jeden Parametersatz

5 Fazit und Ausblick

In dieser Arbeit konnten Eigenschwingungen an der Überhangstruktur provoziert werden. Alle Bondverbindungen sind qualitätsgerecht gemäß DVS-Merkblatt 2811, sowohl auf dem Überhang, als auch auf dem festen Untergrund. Dennoch ist visuell und anhand der Pullkräfte eine Verschlechterung auf dem Überhang erkennbar. Die robuste Regelung der Drahtbond-Maschine konnte mit den verwendeten Chipaufbauten umgehen. Die Untersuchungen zeigen aber selbst bei einer relativ kleinen Stichprobe Unterschiede in der Bondqualität. Für die Massenfertigung von Produkten kann das bedeuten, dass durch vermehrte Ausreißer die Qualitätsziele nicht erreicht werden.

6 Anerkennung

Die vorgestellten Untersuchungen wurden gefördert im Zentralen Innovationsprogramm Mittelstand (ZIM) durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages.

7 Literatur

- [1] J. Panepinto, T. Dobs, A. Grams, J. Höfer, L. Helmich, M. Hunstig, Prof. K. D. Lang: Modellbasierte Schwingungsuntersuchung geklebter Chipaufbauten hinsichtlich ihrer Eignung zum Ultraschall-Drahtbonds. Elektronische Baugruppen und Leiterplatten, Vorträge der 9. DVS/GMM-Tagung in Fellbach am 20. und 21.2.2018, S. 33-39
- [2] H. Mevada, D. Patel: Experimental Determination of Structural Damping of Different Materials, Procedia Engineering, Volume 144, 2016