

DISS. ETH No. 13685

# **MICROELECTRONIC BONDING PROCESS MONITORING BY INTEGRATED SENSORS**

A thesis submitted to the  
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY, ZURICH  
for the degree of  
Doctor of Technical Sciences

presented by  
Michael Mayer  
Dipl. Phys. ETH Zurich  
Born January 7, 1971  
Citizen of Austria

accepted on the recommendation of  
Prof. Dr. Henry Baltes, examiner  
Prof. Dr. Oliver Paul, co-examiner  
Prof. Dr. Jeffrey Suhling, co-examiner

2000

---

# ABSTRACT

The focus of this thesis is on the real-time monitoring of industrial IC packaging processes, and on developing integrated sensors for this monitoring task. The investigated processes are soft solder die bonding and thermosonic ball bonding. The sensors were integrated on custom-made test chips using commercial double-metal CMOS processes.

For the soft solder die bonding process, a novel in situ temperature monitoring method is reported. Nine aluminium-based temperature detectors were integrated in various locations on a test chip and read out during the die bonding process. A chip connector was developed and mounted onto the pick-and-place tool of an automatic die bonder. It provided the electrical connection of external measurement equipment to the microsensors during bonding without disturbing the die bonder operation. Space and time resolved temperature variations are reported for various process conditions. During the soldering period, the microsensors enabled to monitor the temperature increase from the chip temperature to the leadframe temperature, i. e., from 41°C to 310°C. The time needed to achieve 90% of this temperature increase was roughly 50 ms. A typical chip heating rate is  $6 \times 10^3 \text{ K s}^{-1}$ . The temperature variations describe the wetting and spreading effects of the solder under the chip. A transient thermal finite element model of the bonding situation was implemented. Numerical results enabled to estimate the beginning of wetting. For the soft solder PbSn10, wetting occurs around 30 ms after touch down. This method hence can be used to determine wetting times under different process conditions. The wetting time determines an upper limit of the through-put of the process.

For characterisation of the thermosonic ball bonding process, three novel types of integrated monitors are reported. They include temperature, bonding force, and ultrasonic shear force sensors. The temperature sensor is based on the lower aluminium metallisation of the test chip, integrated as a meander around a circular test pad, at an average distance of 102  $\mu\text{m}$  from the pad centre. During bonding at a chip temperature of 106°C, the sensor experienced first a decrease in temperature of -3 K due to the cooling by the capillary. Subsequently, the temperature

---

increased by 2.3 K due to the ultrasound dissipation. A quality parameter can be derived from the temperature signal variation. This parameter correlates with shear strength and thus can be used to determine the bonding force process window without destructive shear testing.

Two sorts of bonding force sensors are reported. They consist of the piezoresistive  $n^+$ -diffusion and are integrated under test bonding pads. The first exhibits a high relative resistance change per bonding force of  $-19.0 \pm 1.8 \times 10^{-3} \text{ N}^{-1}$  and is therefore well suited for time-resolved force investigations. The other is less sensitive to process variations and therefore better suited for application as a bonding force calibration tool for wire bonders. The standard error of the bonding force predicted by this sensor is  $\pm 50 \text{ mN}$ .

In addition, an ultrasonic shear force sensor was developed. It is based on the piezoresistive  $p^+$ -diffusion and integrated in a Wheatstone bridge configuration. The sensor design provides a high sensitivity to oscillating stresses while suppressing the bonding force and temperature signals. Based on evaluations of the fundamental and harmonic components of the microsensor signal, four consecutive phases were identified and found to be necessary for successful ball bond formation. These phases are assigned to initial stiction, sliding, bond growth, and ultrasonic ball softening. The wave form of the microsensor signal was investigated and interpreted. During the sliding and bond growth phases, the pad complies to the ball like a harmonically driven *friction oscillator*. The microsensor signal reveals significant process characteristics such as the minimal ultrasound level needed for bonding, the minimum ultrasound time needed to start bond growth, and the ultrasound time necessary for optimum bonds. A harmonic finite element analysis was performed to calibrate the experimental force signal. The resulting estimate for the force sensitivity of the sensor is  $20 \text{ mV N}^{-1}$ . A typical maximum ultrasonic shear force during bonding on a contact zone with a diameter of  $50 \mu\text{m}$ , is  $0.12 \text{ N}$ .

---

# ZUSAMMENFASSUNG

Im Zentrum dieser Dissertation steht die Echtzeit-Überwachung von industriellen IC-Packaging-Prozessen und die Entwicklung dafür geeigneter integrierter Sensoren. Die untersuchten Prozesse sind Softsolder-Diebonden und Thermosonic-Ballbonden. Die Sensoren wurden auf Testchips integriert, die mit kommerziellen Doppelmetall-CMOS-Prozessen gefertigt wurden.

Für den Softsolder-Diebond-Prozess wird über eine neuartige in-situ Temperaturüberwachungsmethode berichtet. Neun auf Aluminium basierende Temperatur-Sensoren wurden an verschiedenen Orten auf einen Chip integriert und während des Verbindens vom Chip mit dem Leadframe ausgelesen. Dafür wurde eine Chip-Kontaktiervorrichtung entwickelt, die am Pick-und-Place-Tool des Diebonders befestigt wurde. Dieses Tool ermöglichte die elektrische Verbindung von den Messgeräten zu den Mikrosensoren ohne die Funktion des Diebonders zu beeinträchtigen. Raum- und zeitaufgelöste Temperaturkurven wurden unter verschiedenen Prozessbedingungen aufgenommen. Während des Lötens nahmen die Mikrosensoren den Temperaturverlauf von der Chip- zur Leadframe-Temperatur auf, d. h., von 41°C bis 310°C. Die für 90% dieser Temperaturerhöhung nötige Zeit war ungefähr 50 ms. Eine typische Chip-Heizrata ist  $6 \times 10^3 \text{ K s}^{-1}$ . Aus den Temperaturverläufen sind Benetzungs- und Ausbreitungseffekte des Lotes unterhalb des Chips ersichtlich. Ein transientes thermisches Finite-Elemente-Modell wurde implementiert. Die numerischen Resultate ermöglichten es, die Anfangszeit des Benetzens zu schätzen. Demnach beginnt die Benetzung der Chiprückseite ungefähr 30 ms nach dem ersten Chip/Lot Kontakt, wenn das Weichlot PbSn10 verwendet wird. Diese Methode kann also dazu benutzt werden, die Benetzungszeiten für verschiedene Prozessbedingungen zu bestimmen. Diese Zeiten begrenzen die Produktivität von Softsolder-Diebond-Prozessen.

Für die Charakterisierung des Thermosonic-Ballbond-Prozesses wurden drei neuartige Typen von integrierten Sensoren entwickelt: Temperatur-, Bondkraft- und Ultraschall-Scherkraft-Sensoren. Der Temperatur-Sensor basiert auf der unteren Aluminium-Metallisierung des Testchips, die als dünne Linie in einem durchschnittlichen Abstand von 102  $\mu\text{m}$  mehrfach mäandrierend um ein rundes

---

Testpad führt. Während des Verbindens der Goldkugel mit dem Chip bei einer Chiptemperatur von 106°C erfährt der Sensor zuerst einen Temperaturabfall von -3 K, der durch die Kühlwirkung der Kapillare verursacht wird. Anschliessend steigt die Temperatur um 2.3 K aufgrund der Ultraschalleinwirkung. Ein Qualitätsparameter kann aus dem Temperaturverlauf abgeleitet werden. Dieser Parameter korreliert mit der Scherfestigkeit der Verbindung und kann für die zerstörungsfreie Bestimmung des Bondkraft-Prozessfensters eingesetzt werden.

Zwei Arten von piezoresistiven Bondkraft-Sensoren wurden entwickelt. Sie bestehen aus der n<sup>+</sup>-Diffusion und sind unter Test-Bondpads integriert. Der erste Sensor ist charakterisiert durch eine hohe relative Widerstandsänderung pro Bondkraft von  $-19.0 \pm 1.8 \times 10^{-3} \text{ N}^{-1}$  und ist deshalb gut für zeitaufgelöste Bondkraft-Untersuchungen geeignet. Der andere Sensor ist weniger empfindlich auf Prozessvariationen und lässt sich deshalb besser für die Bondkraft-Kalibrierung von Wirebondern verwenden. Der Standardfehler der von diesem Sensor vorausgesagten Bondkraft beträgt  $\pm 50 \text{ mN}$ .

Zusätzlich dazu wurde ein piezoresistiver Ultraschall-Scherkraft-Sensor entwickelt. Er besteht aus der p<sup>+</sup>-Diffusion und ist in einer Wheatstone-Brücke angelegt. Das Sensordesign bewirkt eine hohe Empfindlichkeit auf oszillierende mechanische Spannungen bei gleichzeitiger Unterdrückung von Bondkraft- und Temperatursignalen. Mittels der Auswertung der Fundamentalschwingung und der Oberwellen des Mikrosensorsignals wurden vier aufeinanderfolgende Phasen identifiziert, die für einen erfolgreichen Verbindungsvorgang nötig sind. Diese Phasen werden mit dem anfänglichen Haften der Kugel auf dem Pad, dem anschliessenden Gleiten, der Verbindungsbildung und schliesslich der Erweichung der Kugel durch den Ultraschall in Verbindung gebracht. Die Wellenform des Mikrosensorsignals wurde untersucht und interpretiert. Während der Gleit- und Verbindungsphasen verhält sich das Pad wie ein durch die Kugel harmonisch angeregter *Reibungssoszillator*. Das Mikrosensorsignal enthält signifikante Prozess-Charakteristiken. Unter ihnen sind der für die Verbindungsbildung minimal nötige Ultraschalleintrag, die minimal nötige und die optimale Ultraschallzeit. Eine harmonische Finite-Elemente-Analyse wurde durchgeführt, um das experimentelle Scherkraft-Signal zu eichen. Der resultierende Schätzwert für die Scherkraft-Empfindlichkeit des Sensors ist  $20 \text{ mV N}^{-1}$ . Demnach ist 0.12 N eine typische Ultraschall-Scherkraft während des Verbindens auf einer Kontaktfläche mit einem Durchmesser von 50  $\mu\text{m}$ .