

HoTSens Development, Test and Characterisation of ASICs up to 300°C



Objectives

For today's increasingly complex machinery and equipment to be operated safely with the highest possible efficiency in their use of resources and energy, it is essential that the state of each device and process be monitored at many points simultaneously with high speed and complete accuracy. The nearer to the process is any sensor and signal-evaluating equipment, the less interference there will be, and the more exactly can the signals be registered and processed. However, bringing such a system closer to the process means that it will need to withstand ever higher temperatures.

For these reasons, IMMS and its partners in the HoTSens project are developing an integrated systems solution which has sensors and electronics combining to function reliably in industrial plant and machinery at temperatures as high as 300 °C, under high pressure and in unusual climatic conditions. To date, for use at maximum operating temperatures up to 225 °C, there have been specialised micro-electronic ICs available. The sensor system module with integrated high-temperature electronics which is now needed will have to be able to amplify and calibrate the primary signals from a combined pressure and temperature sensor, processing them sufficiently to compensate for any potential error in the pressure signal. It will be a first-time system solution, offering

Setting up the testing station with integrated cooling for complete semi-automated wafer testing up to 300 °C. Photograph: IMMS.

exchangeable, standardised detector modules for use under the extreme conditions described.

IMMS has developed certain ASICs which are specific to the system and has tested and characterised them. For the purpose, the Institute has designed, constructed and successfully used a new test set-up with an integrated cooling system. This permits the wafer to be completely tested semi-automatically up to 300 °C.

Design of the high-temperature ASICs

Taking a variety of approaches, IMMS developed a variety of ASICs intended to process the signals from pressure sensors installed in ambient temperatures of up to 300 °C. By taking measurements on test structures, the Institute has characterised transistors at wafer level up to this temperature. Model circuits for the necessary components have been produced on the basis of these approaches in collaboration with X-FAB AG. Earlier models had characteristics capable only of temperatures up to 250 °C. In the new work, the basic analogue circuit structures for the amplifiers, voltage regulators and current mirrors have been modified so that there is very little current leakage and dependency on temperature, even for the range above 250 °C is much reduced. Symmetrical

transistor structures have been laid out for positioning in areas of similar temperature, which will mean that they behave for practical purposes identically.

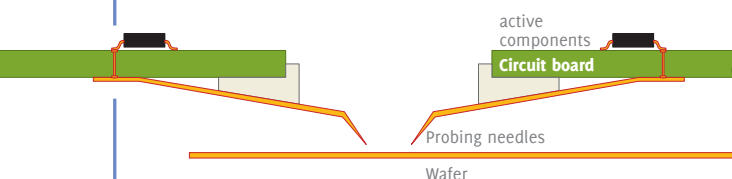
All the circuits have been designed to be thermally de-coupled and to be complemented by an additional, spatially separated circuit which has an input control, a high-voltage transistor and a diode protecting it against polarity reversal. The ASICs have been manufactured using X-FAB AG's XI10 SOI (Silicon-on-Insulator) technology, which is capable of use in temperatures up to 300 °C.

Challenges to be met by the test structures, state of the art

The ever greater challenges described here for the integrated sensors and signal evaluation electronics are challenges, too, for the testing of ASICs at wafer level. The standard circuit boards for wafer testing are needle probecards made basically of epoxy resin and will not stand temperatures above 175 °C. Even the other (much more expensive) materials for use in these boards, such as polyimide and Teflon, hit their temperature limit between 220 °C and 280 °C when used long-term.

For the high-temperature wafer test, it is common on the one hand to use ceramic probecards capable of sustaining more than 300 °C. On the other hand, probecards made of the materials approved for use up to 280 °C can be placed directly over the wafer or with an additional temperature shield in the form of an air-filled chamber. In a few cases, this type of chamber is flooded with cold air to achieve an additional cooling effect. In most cases, the electrical connection from the probing needles to the measuring instrument is made by long, insulated cables. This achieves spatial separation of all electronics from the vicinity of the needle card and the test. In consequence, the ASIC may be loaded with much too high an electrical capacitance due to the length of the wiring. For this purpose, a chip is not necessarily laid out appropriately and so the type of construction described is largely used on single building blocks such as transistors. In any other situations, the experimenter must take into account that the construction may well cause false readings.

Figure 1: Schematic of a classic needle probecard with active components for measurement on wafer. Diagram: IMMS.



The idea of adequate distancing as a solution for the high-temperature wafer test in the HoTSens context was discounted as the ASICs here being developed are too much influenced by the measurement conditions. Their driving capability is inadequately configured for these. By implication, the test conditions would not reflect the intended future sphere of use. So the circuit board and electronics had to be positioned close enough to the ASIC. This meant that the conditions surrounding all the active components which were to be positioned directly on the board for the HoTSens chip testing had to be taken into account. As these components include such things as an operational amplifier with a conventional upper temperature limit of 85 °C, it was necessary to achieve thermal de-coupling from the high temperature (300 °C) test environment.

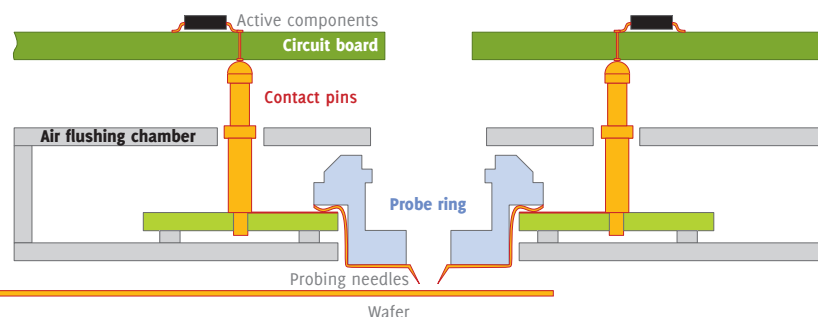
The IMMS solution for the high-temperature wafer test

To achieve exact measurement and characterisation of the features of the ASICs, IMMS has combined the procedure for the standard wafer test (Fig. 1) with that of the high-temperature wafer test, constructing the apparatus for the purpose. This makes contact with the wafer, sends the signals from it to a circuit board which includes evaluation electronics and then to a PXI strain gauge module, at the same time protecting the board and electronics from excessive temperatures with an air flushing chamber (Fig. 2).

Cooling of the PCB and signal evaluation electronics

The circuit board is made of standard, inexpensive material, a bond of epoxy resin and glass fibre fabric (class FR4), which becomes unstable at 170 °C, a phase transition temperature for glass (Fig. 3). To protect the board from the temperatures obtaining on the wafer (300 °C), an air flushing chamber was designed (Fig. 4). The choice of width, 4.5 inches, was influenced by the standard dimensions of probecard holders. The tank material selected was paramag-

Figure 2: One of the IMMS approaches to high-temperature testing at wafer level with a thermally de-coupled circuit board. Diagram: IMMS.



IMMS

WE CONNECT IT TO THE REAL WORLD.

© IMMS GmbH. All rights reserved. Reproduction and publication only with express permission of IMMS GmbH.

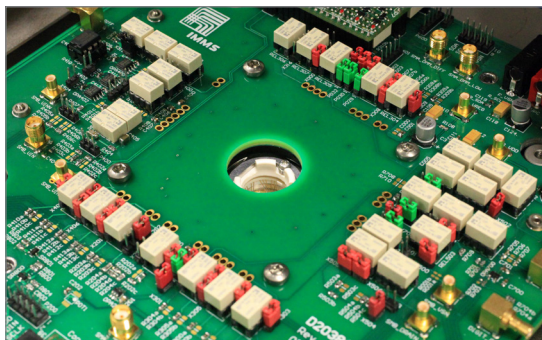


Figure 3: Circuit board with the necessary signal evaluation electronics. Photograph: IMMS.

netic stainless steel 1.4305 as this has advantages over other metals. If aluminium or copper had been selected, thermal conductivity would have been higher, thermal expansion greater and rigidity less. The steel chamber is 10 – 20 times less conductive, 1.5 – 2 times less expansive and 2 – 3 times more rigid, thus providing an ideal barrier between the hot wafer and the cold circuit board. The barrier effect is reinforced by connecting a cold coolant gas to flush the steel chamber, flowing at approx. 25 °C to cool it actively.

Electrical contact

So that there is a reliable electrical connection between the circuit board and the wafer, it is necessary to create a path for the signals through the steel chamber. IMMS has designed and placed in the flushing chamber a ceramic circuit board in aluminium oxide with a glass transition temperature of much higher than 300 °C (Fig. 5). Though aluminium oxide with its electrical resistance of $10^{12} \Omega \cdot m$ serves as an excellent insulator in the relevant temperature range, it is also an excellent thermal conductor in comparison with the circuit board made of FR4 material and possessing 100 times the thermal conductivity, approximately 30 W/(K·m). On the ceramic board there are three gold-plated contact rings known as pads. The innermost circular pad conducts the signals sensed by the needles at temperatures reaching 300 °C as they probe the wafer from their ring, and

Figure 4: Air flushing chamber (background) around measuring apparatus protecting the circuit board (foreground, bottom side with contact rings). Photograph: IMMS.

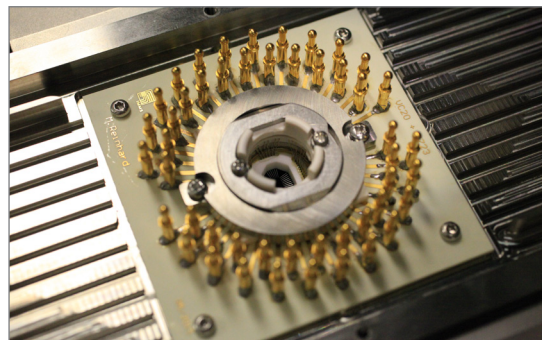
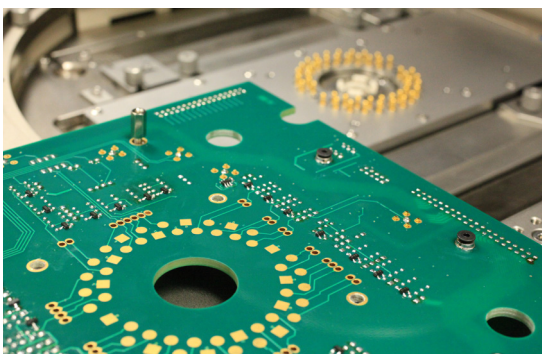


Figure 5: Ceramic board with probe ring to sample wafer and send signals to the circuit board. Photograph: IMMS.

sends the signals on to the two outer pad rings. There are sprung contact pins arranged on these two outer pads. 300 °C is the maximum temperature to which these spring pins are exposed (Fig. 3). The pins ensure that a connection is made between the ceramic board and the underside of the circuit board, right through the steel cooling chamber (Fig. 4). Thermal imaging and the use of temperature sensors has proven that the temperature of the circuit board rises to no more than 65 °C though the wafer temperature is 300 °C (Fig. 6).

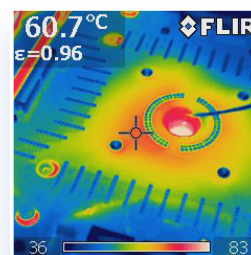


Figure 6: Thermal image of circuit board. Photograph: IMMS.

Conclusions and Outlook

By pursuing the approach described and by this means achieving characterisation of high-temperature ASICs it has been proved that complete semi-automatic testing of wafers at temperatures up to 300 °C is feasible. The ASICs thus processed possess the necessary functionality. They are to be subjected to long-term testing for the rest of the project period. The apparatus was designed in such a way as to be capable of use for planned re-designs and, in the wider field, of easy adaptation for other ASICs operating in this temperature range. The inexpensive standard FR4 circuit boards are adequate for alternative testing which needs to use active components. Besides this valuable feature, the layout of the ceramic board permits different probe rings to be inserted, with different needle positions.

Contact person:

Dipl.-Ing. Marco Reinhard,
marco.reinhard@imms.de

The HoTSens project is funded by the German Federal Ministry of Education and Research in the IKT 2020 programme under the reference 16ES0008..

SPONSORED BY THE



Federal Ministry
of Education
and Research

HoTSens Entwicklung, Test und Charakterisierung von ASICs bis 300°C



Aufbau des Test-Setups mit integrierter Kühlung für einen kompletten halbautomatischen Wafertest bis 300 °C. Foto: IMMS.

Motivation

Um zunehmend komplexer werdende Maschinen und Anlagen sicher und mit höchstmöglicher Ressourcen- und Energieeffizienz betreiben zu können, müssen die Maschinen- und Prozesszustände schnell, präzise und an vielen Stellen gleichzeitig erfasst werden. Je näher sich ein System aus Sensoren und Auswertungselektronik am Prozess befindet, desto störungsärmer und genauer können Signale erfasst und verarbeitet werden. Soll ein solches System jedoch näher zum Prozess vordringen, muss es immer höheren Temperaturen standhalten.

Im Projekt HoTSens wird daher mit Partnern eine integrierte Systemlösung für Sensorik und Elektronik entwickelt, die bei hohen Temperaturen bis zu 300 °C, unter hohem Druck und bei außergewöhnlichen klimatischen Bedingungen in Industrieanlagen und Maschinen zuverlässig arbeiten kann. Bislang sind spezielle, für den Hochtemperatureinsatz ausgelegte integrierte Mikroelektronikschaltungen für eine maximale Betriebstemperatur bis 225 °C erhältlich. Das angestrebte Sensorsystemmodul mit integrierter Hochtemperaturelektronik soll die primären Signale eines kombinierten Druck- und Temperatursensors verstärken, kalibrieren und vorverarbeiten, um mögliche Fehler des Drucksignals ausgleichen zu können. Damit soll erstmals eine Systemlösung entstehen, die

austauschbare und standardisierte Sensormodule für den Einsatz unter den genannten extremen Bedingungen bereitstellt.

Das IMMS hat anwendungsspezifische integrierte Schaltungen (ASICs) für das System entwickelt, diese getestet und charakterisiert. Hierfür hat das Institut ein neues Test-Setup mit integrierter Kühlung für einen kompletten halbautomatischen Wafertest bis 300 °C und darüber hinaus entwickelt, aufgebaut und erfolgreich eingesetzt.

Design der Hochtemperatur-ASICs

Das IMMS hat für unterschiedliche Lösungsansätze ASICs entwickelt, die die Signale von Drucksensoren in Anwendungen bis +300 °C verarbeiten sollen. Für diese Temperaturen hat das Institut mithilfe von Teststrukturen Charakterisierungsmessungen an Transistoren auf Wafer Ebene bis 300 °C durchgeführt. Auf dieser Basis wurden in Zusammenarbeit mit der X-FAB AG Schaltungsmodelle für Bauelemente erarbeitet. Bisherige Modelle waren nur für Temperaturen bis 250 °C ausgelegt. Somit wurden grundlegende Analog-Schaltungsstrukturen für Operationsverstärker, Spannungsregler und Stromspiegel so modifiziert, dass sie auch für Temperaturen über 250 °C über extrem geringe

Leckströme bzw. eine stark verminderte Abhängigkeit von der Temperatur verfügen. Das Layout von symmetrischen Transistorstrukturen wurde so gestaltet, dass diese jeweils in Bereichen mit gleichen Temperaturen liegen und sich daher praktisch identisch verhalten.

Alle Entwürfe wurden für eine thermische Entkopplung mit einem zusätzlichen, räumlich getrennt aufgebauten Schaltkreis mit Vorregler, Hochvolt-Transistor und Verpolschutz-Diode ergänzt. Die ASICs wurden in der XI10 SOI-(Silicon-on-Insulator)-Technologie der X-FAB AG gefertigt, die für Anwendungen bis +300 °C ausgelegt ist.

Besondere Anforderungen an den Testaufbau und Stand der Technik

Mit den beschriebenen Anforderungen an integrierte Sensorik und Auswerteelektronik steigen auch die für den Test von ASICs auf Wafer-Ebene. Standard-Leiterkarten für Wafer-Prober sind Nadelkarten auf Epoxidharzbasis und erlauben nur Testtemperaturen bis 175 °C. Andere, wesentlich teurere Materialien für diese Karten, wie Polyimid und Teflon, stoßen bereits bei einer Dauerbelastung zwischen 220 °C und 280 °C an ihre Grenzen.

In der Regel werden für den Hochtemperatur-Wafertest einerseits Nadelkarten aus mehr als 300 °C belastbaren Keramiken verwendet. Andererseits werden Nadelkarten aus den o.g., bis 280 °C zugelassenen Materialien direkt oder mit einer zusätzlichen Temperaturbarriere in Form einer mit Luft gefüllten Kammer über dem Wafer platziert. Vereinzelt werden diese Kammern mit kalter Luft durchspült, um einen zusätzlichen Kühleffekt zu erzielen. In den meisten Fällen wird die elektrische Verbindung von den Nadeln, die den Wafer antasten, hin zum Messgerät über lange geschirmte Kabel realisiert. Somit befindet sich für den Test keinerlei Elektronik in der Nähe der Nadelkarte. Folglich wird der zu untersuchende ASIC u.a. mit einer viel zu großen elektrischen Kapazität belastet, die durch die lange Zuleitung hervorgerufen wird. Da ein Chip mitunter nicht dafür ausgelegt ist, können mit derartigen Aufbauten vorrangig Messungen an einfachen Bauelementen durchgeführt wer-

den, wie z.B. an Transistoren. Andernfalls muss in Kauf genommen werden, dass die Messergebnisse durch den Messaufbau verfälscht werden.

Ein ausreichender Abstand schied für HoTSens als Lösungsweg für den Hochtemperatur-Wafer-Test aus, da die hier entwickelten ASICs z.B. aufgrund ihrer nicht für den Messaufbau ausgelegten Treiberfähigkeit zu sehr davon beeinflusst würden. Die Testbedingungen entsprächen somit nicht mehr dem späteren Einsatzszenario. Daher musste die Leiterkarte samt Elektronik nahe genug am ASIC platziert werden. Somit waren auch die Randbedingungen für die aktiven Bauelemente zu berücksichtigen, die für den Test der HoTSens-Chips direkt auf der Leiterkarte sitzen sollten. Da solche Bauelemente, wie z.B. Operationsverstärker, in der Regel nur bis 85 °C spezifiziert sind, musste eine thermische Entkopplung von der 300 °C heißen Testumgebung geschaffen werden.

Lösung des IMMS für Wafer-Tests bei 300 °C

Um die ASICs bei hohen Temperaturen exakt messen und charakterisieren zu können, hat das IMMS das Vorgehen des Standard-Wafertests (Abb. 1) mit dem des Hochtemperatur-Wafer-Tests vereint. Das Institut hat dazu eine Vorrichtung entwickelt, die den Wafer antastet, die Signale vom Wafer zu einer Leiterkarte mit Auswerteelektronik weiter zu einem modularen PXI-Messgerät¹ führt und dabei die Leiterkarte und die Elektronik mit einer Spülkammer für die Kühlung vor zu hoher Temperatur schützt (Abb.2).

Kühlung der Leiterkarte mit Auswerteelektronik

Die Leiterkarte besteht aus kostengünstigem Standard-Material, einem Verbundwerkstoff aus Epoxidharz und Glasfasergewebe (Klasse FR4), das bei einer Glasübergangstemperatur von 170 °C instabil wird (Abb. 3). Zum Schutz vor den auf dem Wafer vorherrschenden Temperaturen um 300 °C wurde als

¹ PXI PCI eXtensions for Instrumentation, Standard für modulare Messgeräte

Abbildung 2: Lösungsansatz des IMMS für den Hochtemperaturtest auf Wafer-Ebene mit thermisch entkoppelter Leiterkarte. Grafik: IMMS.

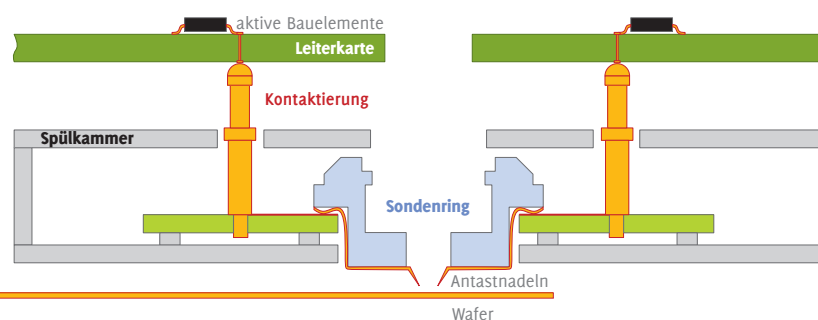
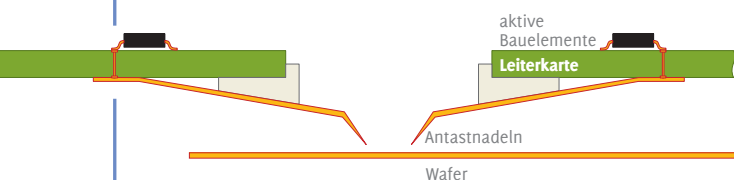


Abbildung 1: Prinzipdarstellung einer klassischen Nadelkarte mit aktiven Bauelementen für Messungen auf Wafer-Ebene. Grafik: IMMS.



IMMS

WIR VERBINDEN DIE IT MIT DER REALEN WELT.

© IMMS GmbH. Alle Rechte sind vorbehalten. Vervielfältigung und Veröffentlichung nur mit Genehmigung der IMMS GmbH.

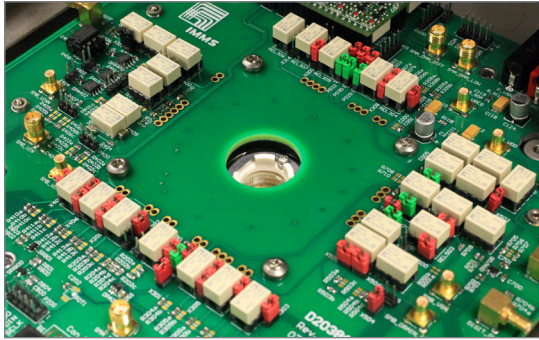


Abbildung 3: Leiterkarte mit der erforderlichen Auswertelektronik. Foto: IMMS.

Barriere eine Spülkammer konstruiert (Abb. 4). Ihre Abmessungen mit 4,5 Zoll Breite orientierten sich an Standardmaßen für Nadelkartenhalterungen. Als Material für die Spülkammer wurde der paramagnetische Edelstahl 1.4305 ausgewählt, da er Vorteile im Vergleich zu anderen Metallen bietet. Die Spülkammer besitzt damit eine um den Faktor 10 – 20 geringere thermische Leitfähigkeit, eine um den Faktor 1,5 – 2 geringere thermische Ausdehnung und eine um 2 – 3mal größere Steifigkeit als solche aus Aluminium oder Kupfer. Dadurch stellt sie eine ideale thermische Barriere zwischen dem heißen Wafer und der kalten Leiterkarte dar. Verstärkt wird diese Wirkung durch den Anschluss für ca. 25 °C kalte Spülluft, die die Kammer durchströmt und diese aktiv kühlt.

Kontaktierung

Um die elektrische Verbindung zwischen Leiterkarte und Wafer sicherzustellen, musste ein Signalweg durch die Spülkammer geschaffen werden. Dazu hat das IMMS eine Keramik-Leiterplatte aus Aluminiumoxid mit einer Glasübergangstemperatur von weit über 300 °C entworfen und in der Spülkammer platziert (Abb. 5). Aluminiumoxid ist mit einem elektrischen Widerstand von $10^{12} \Omega \cdot m$ im angestrebten Temperaturbereich zwar ein sehr guter Isolator, aber im Vergleich zur Leiterkarte aus FR4-Material mit einer 100mal höheren Wärmeleitfähigkeit von ca. 30 W/(K·m) ein sehr guter thermischer Leiter. Auf dieser Keramik befinden sich drei vergoldete Kontakttringe. Deren innerer Padring leitet die Signale, die die Na-

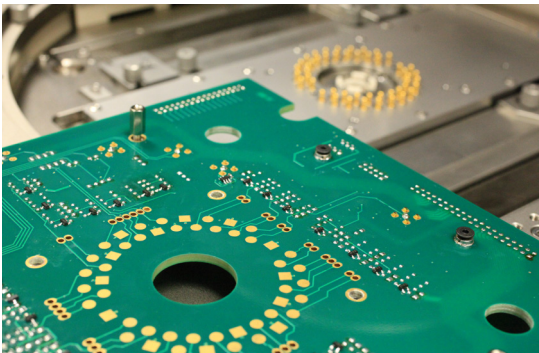


Abbildung 4: Spülkammer (hinten) zur Kühlung des Messaufbaus u. zum Schutz der Leiterkarte (vorn, Unterseite mit Kontaktpads). Foto: IMMS.

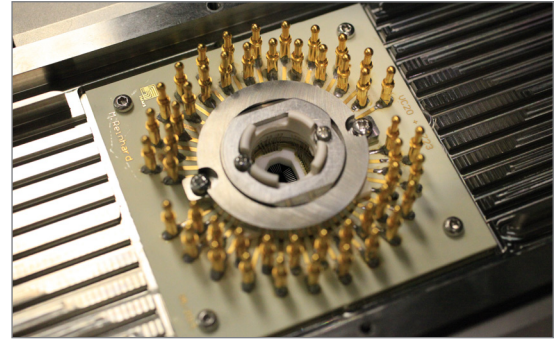


Abbildung 5: Keramikplatine mit dem Sondenring zur Antastung des Wafers und Führung der Signale zur Leiterkarte. Foto: IMMS.

deln beim Antasten des Wafers über den Sondenring bei max 300 °C aufgreifen, an die beiden äußeren Padringe weiter. Auf diesen äußeren beiden Ringen sind gefederte Kontaktstifte angeordnet, die max. 300 °C ausgesetzt werden (Abb. 3). Mit diesen Stiften wird durch die Spülkammer hindurch (Abb. 4) die Verbindung von der Keramik zur Unterseite der Leiterkarte sichergestellt. Mit Wärmebildern und Temperatursensoren wurde bei einer Wafer-Temperatur von 300 °C eine Erwärmung der Leiterkarte auf maximal 65 °C nachgewiesen (Abb. 6).

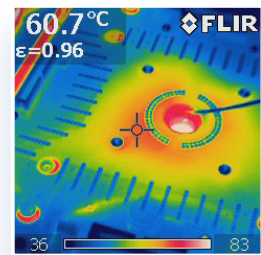


Abbildung 6: Wärmebild der Leiterkarte. Foto: IMMS.

Zusammenfassung und Ausblick

Mit dem entwickelten Konzept und der damit realisierten Charakterisierung von Hochtemperatur-ASICs wurde gezeigt, dass ein kompletter halbbautomatischer Wafertest bis 300 °C durchführbar ist. Die prozessierten ASICs zeigen die erforderliche Funktionalität und werden bis zum Projektende Langzeittests unterzogen. Der Aufbau wurde so gestaltet, dass er für angestrebte Redesigns genutzt und darüber hinaus für andere ASICs in diesem Temperaturbereich mit geringem Aufwand angepasst werden kann: Zum einen sind die kostengünstigen Standard-FR4-Leiterkarten für alternative Tests, für die aktive Bauelemente genutzt werden sollen, ausreichend. Das Layout der Keramikleiterplatte erlaubt es darüber hinaus, neue Sondenringe mit anderen Nadelpositionen einzusetzen.

Kontakt:

Dipl.-Ing. Marco Reinhard, marco.reinhard@imms.de

Das Projekt HoTSens wird vom Bundesministerium für Bildung und Forschung im Programm „IKT 2020 – Forschung für Innovationen“ unter den Kennzeichen 16ES0008 gefördert.

