

Waferbonden von Glas und Silizium

Mit den diversifizierten Anwendungen in der Miniaturisierung sind auch die Anforderungen an das **WAFERBONDEN** gewachsen. Hohe Stabilität, Biokompatibilität sowie Beständigkeit gegen Chemikalien müssen bei immer weiter steigenden Prozessbelastungen kosteneffizient realisiert werden. Permanente und temporäre Fügeverfahren sind gefragt.

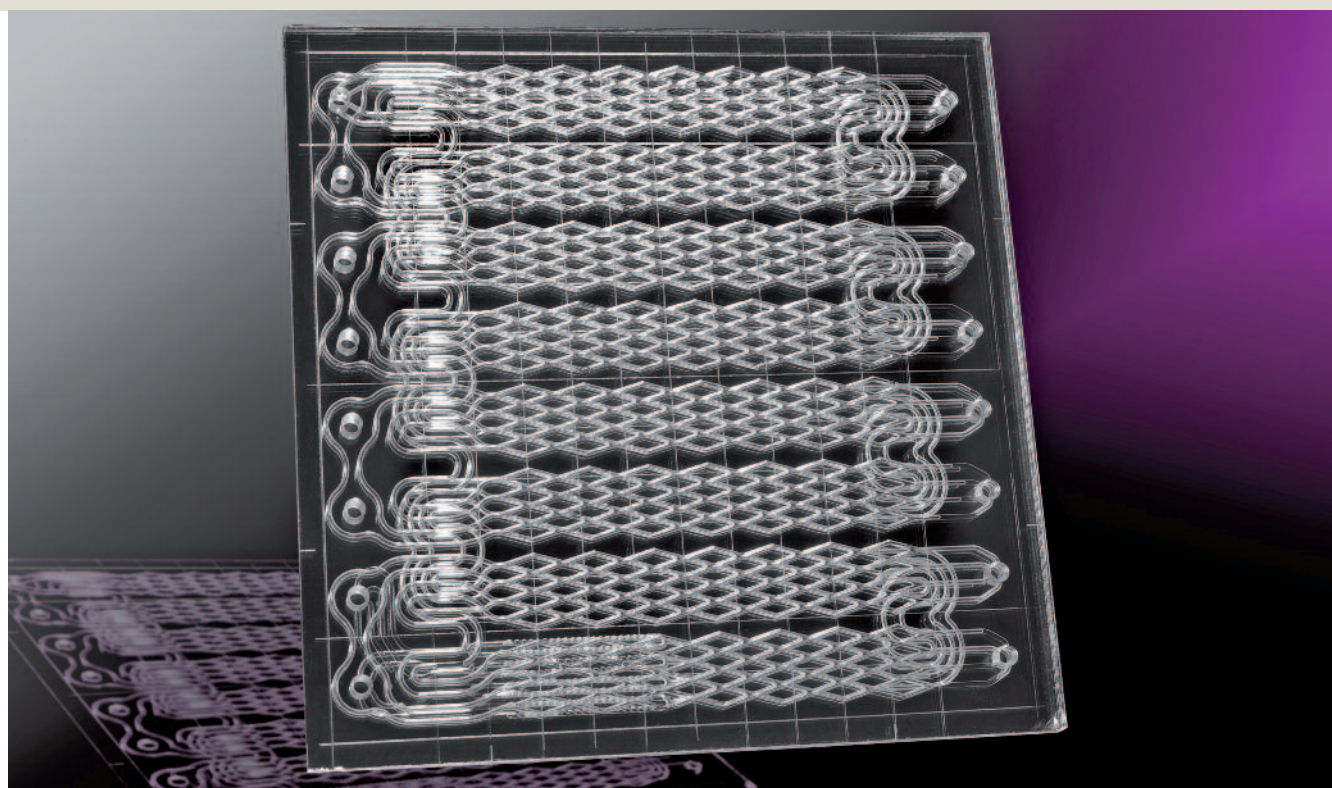


Bild 1. Multistack-Mikroreaktor aus sechs zuvor strukturierten Glassubstraten für Anwendungen in der Chemie und Pharmazie

(Quelle: Chemtrix BV)

NIKLAAS KONOPKA

Das Waferbonden ist eine Fügeverfahren in der Halbleiter- und Mikrosystemtechnik, bei der zwei oder mehrere Substrate miteinander verbunden werden. Es ist eine Technologie, die in der CMOS-Industrie, der Mikrofluidik und der MEMS-Industrie immer relevanter wird. Im CMOS-Bereich wird vermehrt mit temporären Bondtechniken gearbeitet, um die Handhabung sehr dünner und großer Substrate während der eigentlichen Prozessschritte zu erleichtern. Das permanente Bonden hingegen schützt empfindliche interne Strukturen vor umweltbedingten Einflüssen wie Temperatur, Feuchtigkeit, hohem Druck und Oxidation. Die langfristige Stabilität und die Verlässlichkeit der Funktionselemente sind daher unmittelbar abhängig vom Verbindungsvorgang.

Hier ist ausschlaggebend, dass Aspekte wie Schutz vor Umwelteinflüssen, Wärmeabfuhr, Integration von Elementen mit unterschiedlichen Technologien, Kompatibilität zur umliegenden Peripherie und die Gewährleistung des Energie- und Informationsflusses beim Bonden beachtet werden. In der Mikrofluidik werden Bondtechnologien hauptsächlich zum Verschließen von Kanälen und Reaktorkammern verwendet. Chemische Reaktionen von

> KONTAKT

HERSTELLER
iX-factory GmbH
 44263 Dortmund
 Tel. +49 231 47730-580
 Fax +49 231 47730-590
www.iX-factory.de

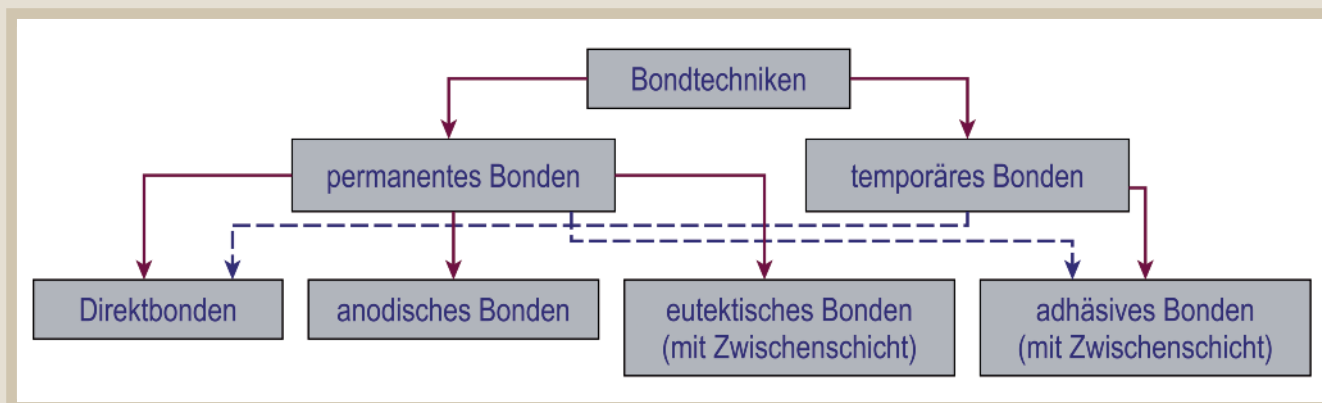


Bild 2. Permanente und temporäre Bondtechniken im Überblick

Flüssigkeiten können so gezielt im Chip durchgeführt werden. Anwendung finden sogenannte mikrofluidische Systeme beispielsweise in der Differenzialdiagnostik oder auch in der Herstellung von Pharmazeutika.

Die iX-factory aus Dortmund greift bei diversen Bondtechniken auf fundierte und langjährige Erfahrung zurück. Das Unternehmen arbeitet mit den Werkstoffen Glas und/oder Silizium auf Substratgrößen von 100 bis 200 mm bei Substratdicken von 100 bis 2000 μm . Im Rahmen zahlreicher Projekte wurde ein anodisches Bondverfahren entwickelt, das nicht nur Glas-Silizium-Verbunde realisiert, sondern auch Verbindungen zwischen Silizium und Siliziumoxid beziehungsweise Silizium und Siliziumnitrid ermöglicht. Des Weiteren besteht die Option, Tripple-Stacks (Glas-Silizium-Glas oder Silizium-Glas-Silizium) in einem Prozessschritt zu bonden. Derzeit entwickelt das Team ein spezielles Verfahren, um zeitgleich einen eutektischen und einen anodischen Bond stressfrei durchführen zu können. Im Bereich der Mikrofluidik fertigt iX-factory verschiedene Mikroreaktoren aus bis zu 20 Glasplatten und ist somit Vorreiter in diesem Technologiefeld (**Bild 1**).

Grundsätzlich lassen sich Bondtechnologien auf zwei unterschiedliche Arten differenzieren. Zunächst wären die permanenten und die temporären Bondprozesse zu unterscheiden. Teilweise sind hier einige Techniken wie das adhäsive Bonden in beiden Bereichen wiederzufinden. Eine weitere Unterscheidung ist die Notwendigkeit einer Zwischenschicht, die als Funktionsschicht zur Durchführung des Bondprozesses aufgebracht wird (**Bild 2**).

Das Direktbonden

Beim Direktbonden wird die Verbindung zwischen zwei oder mehr Wafern durch chemische Oberflächenkräfte erzeugt. Der Bondprozess wird zusätzlich durch hohe Temperaturen unterstützt. Der wichtigste Anwendungsbereich des Direktbondens sind Glas-Glas-Verbindungen in der Mikrofluidik oder der Optofluidik.

Vor dem eigentlichen Bondprozess werden die Glas-Wafer durch mehrere Reinigungsschritte von Partikeln befreit. Kommt es zur Kontaktierung der Oberflächen, entsteht durch sogenannte Van-der-Waals-Kräfte eine schwache Verbindung zwischen den Wafern (Pre-Bond). Der Bond ist temporär und kann, falls notwendig, durch das Anbringen von mechanischen Kräften wieder gelöst werden. Um eine permanente Bindung zu erhalten, müssen die Fügepartner wärmebehandelt werden. Die Temperatur der Wärmebehandlung hängt von der Glas-sorten ab und liegt meist zwischen 500 und 1000 $^{\circ}\text{C}$. Dabei bilden sich freie Silizium-Ionen an den Grenzflächen der Wafer, die mit den Ionen des gegenüberliegenden Substrats rekombinieren. Es entsteht eine starke chemische Bindung. Durch die Wärmebehandlung gewinnt die Verbindung die Stabilität des genutzten Basismaterials. Diese Stabilität eröffnet dem Anwender die Möglichkeit, in den zuvor erzeugten Mikrostrukturen unter enorm hohem Druck zu arbeiten. Wenn das Design es erlaubt, können in einem so hergestellten Stack chemische Reaktionen von Gasen und Flüssigkeiten bei bis zu 3 MPa und 200 $^{\circ}\text{C}$ stattfinden.

Anodisches Bonden

Das anodische Bonden ermöglicht eine flächendeckende Verbindung zwischen Glas- und Silizium-Substraten. Der größte Vorteil dieses Verfahrens ist die starke permanente Bindung bei vergleichsweise sehr niedrigen Temperaturen. Dies ist vor allem dann vorteilhaft, wenn sich Metallstrukturen auf dem Wafer befinden, die keinen Temperaturen über 400 $^{\circ}\text{C}$ ausgesetzt werden können.

Vor dem eigentlichen Bonden kann auf einer iBA8-Gen3-Anlage (Suss MicroTec) ein strukturierter Silizium-Wafer zu einem strukturierten Glas-Wafer

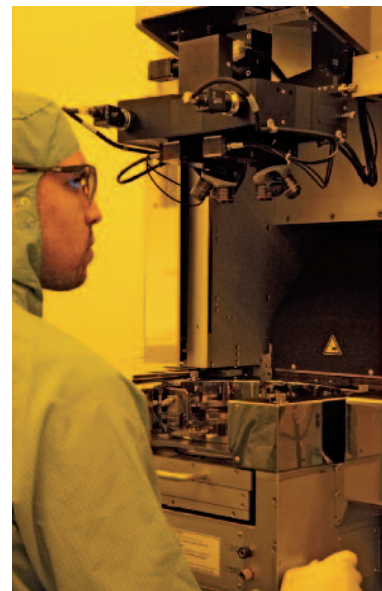
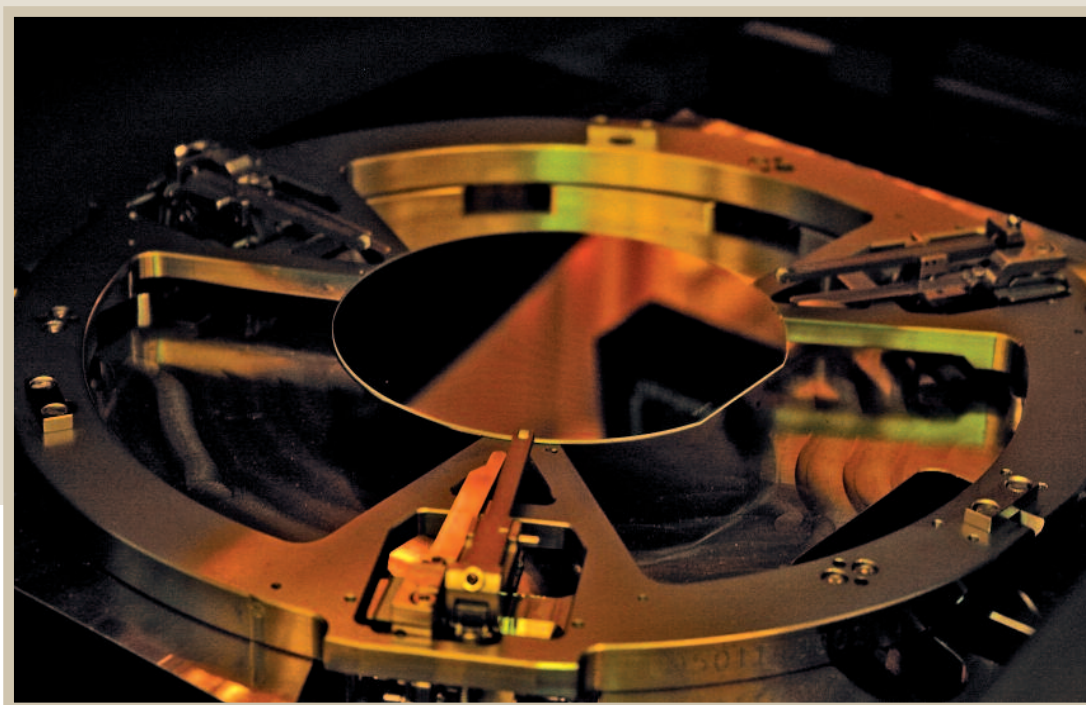


Bild 3. Ein Ingenieur von iX-factory richtet auf einem iBA8-Gen3-Bond-Aligner zwei Wafer aus

Bild 4. Glas- und Silizium-Wafer, zueinander ausgerichtet und zusammengehalten im Bond-Fixture (Suss MicroTec)



ausgerichtet und in einem sogenannten Fixture festgehalten werden (**Bild 3**). Mithilfe des Fixtures kann der Bondprozess auf dem kompatiblen »CB8«-Bonder (Suss MicroTec) ausgeführt werden (**Bild 4**). In der Anlage werden die Wafer durch eine spezielle Druckplatte mit mehreren kN aufeinandergespresst; währenddessen wird die Temperatur auf 300 bis 400 °C erhöht. Durch die Temperaturbehandlung können sich die Glas-Ionen (Natrium [Na+], Kalium [K+]) frei bewegen. Über eine Kontaktstelle wird eine elektrische Spannung (500 bis 2000 V) eingeleitet, die eine Bewegung der Ionen zur Elektrode auslöst. Dadurch bildet sich im Glas eine negative Raumladungszone. Gleichzeitig führt die angelegte Spannung im Silizium-Wafer zu einem entgegengesetzt geladenen Bereich. Es entsteht eine elektrostatische Anziehungskraft zwischen den Wafern, die eine Annäherung bis auf atomare Basis zwischen den Fügepartnern erzeugt. In der Folge bilden sich Sauerstoffbrückenbindungen, die zu einer starken stoffschlüssigen Verbindung im Bereich der Grenzfläche führen.

Bei diesem Verfahren kann es zu starken mechanischen Spannungen im Wafer-Verbund kommen. Um dem entgegenzuwirken, ist es äußerst wichtig, mit den richtigen Wafer-Materialien zu arbeiten. Die thermischen Ausdehnungskoeffizienten des verwendeten Glases und des Siliziums sollten möglichst übereinstimmen, um spannungsbedingten Rissen beim Abkühlvorgang vorzubeugen. Zu den idealen Glas-sorten hierfür zählen beispielsweise Pyrex- und Boro-float-33-Substrate.

Eutektisches Bonden

Beim eutektischen Bonden lässt sich eine permanente Verbindung zwischen zwei Silizium-Wafern beziehungsweise zwischen Glas und Silizium unterhalb von

400 °C herstellen. Ein Silizium-Silizium-Direktbond ohne Zwischenschicht benötigt im Vergleich Temperaturen von über 1000 °C. Bei diesem eutektischen Verfahren wird ausgenutzt, dass Gold und Silizium bei 363 °C und einem atomaren Silizium-Anteil von 18,6 Prozent eine homogene flüssige Mischphase ausbilden – auch Eutektikum genannt. Grundsätzlich sind auch Kombinationen von anderen Metallen mit Silizium möglich. Da die Temperaturen dann allerdings oberhalb von 800 °C liegen, ist der Temperaturvorteil nichtig. Es werden typischerweise Goldschichten von 50 bis 300 nm verwendet. Diese können sowohl aufgesputtert als auch aufgedampft werden. Um die Haftung des Golds zu verbessern, werden vorzugsweise Chrom oder Titan als Adhäsionsschicht auf dem Wafer abgeschieden.

Unter Vakuum werden beide Wafer auf dem Bonder unter hohem Anpressdruck in Verbindung gebracht. Die Temperatur wird bis kurz unterhalb des eutektischen Punkts erhöht. Dabei kommt es zur Diffusion von Gold und Silizium an der Kontaktstelle. Nach kurzer Wartezeit wird der Stack über die eutektische Temperatur erwärmt. An der Grenzfläche zwischen beiden Substraten bildet sich ein flüssiges Eutektikum. Um stressbedingten Rissen im Material vorzubeugen, kann die Anpresskraft leicht reduziert werden. Während des Abkühlvorgangs entsteht eine stoffschlüssige Verbindung zwischen den Wafern.

Das eutektische Bonden wird hauptsächlich bei MEMS und in der Mikrofluidik verwendet (**Bild 5**). So können zum Beispiel reine Silizium-Reaktoren für Infrarotmessungen gefertigt werden. Im CMOS-Bereich wird diese Technik nicht eingesetzt, da die Prozesskompatibilität zu Edelmetallen nicht gegeben ist.

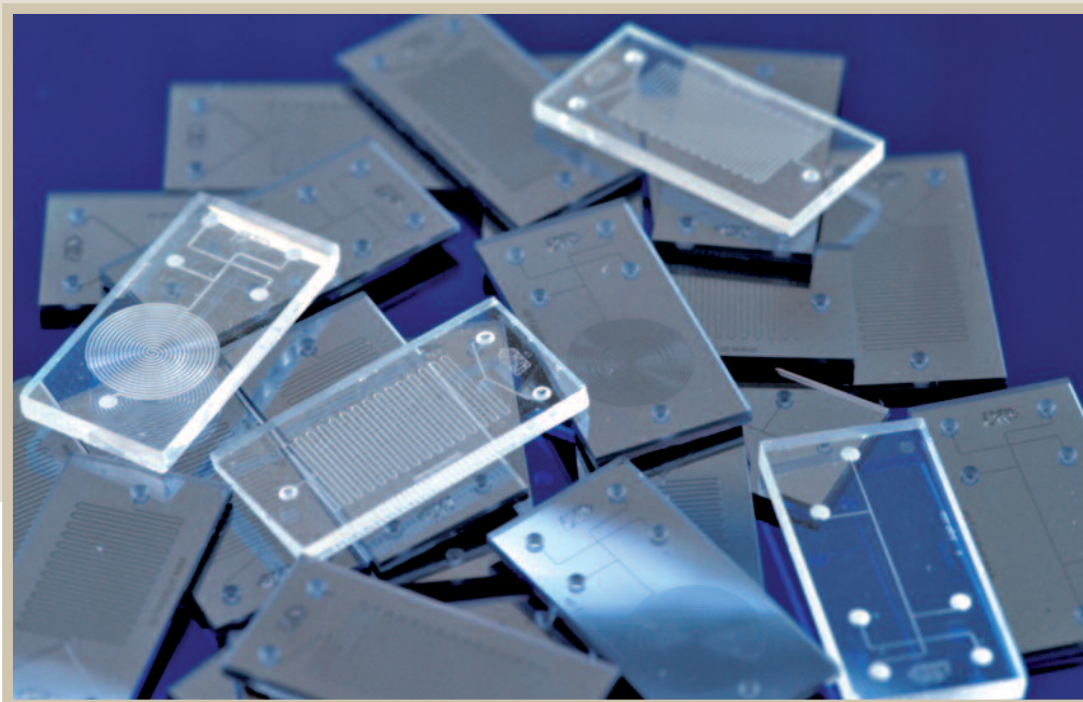


Bild 5. Zwei strukturierte Glas-beziehungsweise Silizium-Wafer, gebondet zu Mikrofluidik-Chips und anschließend durch ein Sägeverfahren vereinzelt

Adhäsives Bonden

Eine alternative Bondtechnologie zur Herstellung von Mikrochips aus Glas oder Silizium ist das adhäsive Bonden. Dabei werden Klebeschichten als Verbindungsmittel verwendet. Ein Beispiel hierfür ist das Bonden mit Polymer SU-8. Im Vergleich zum eutektischen Bonden (370 °C) und dem Silizium-Silizium-Direktbonden (> 1000 °C) wird das Bonden bei deutlich geringeren Temperaturen (130 °C) durchgeführt. SU-8 wird wie beim normalen Strukturierungsprozess mit einer Lackschleuder auf dem Wafer verteilt. Im Gegensatz zur standardisierten SU-8-Lithografie müssen die Ausbacktemperaturen und -zeiten entsprechend angepasst werden, sodass die komplette Vernetzung des Resists noch nicht stattgefunden hat. Ansonsten lässt sich SU-8 wie bei anderen Lithografieprozessen vor dem Bonden fotolithografisch strukturieren. Die Schichtdicken liegen je nach Anwendung zwischen 10 und 100 µm.

Beim Bondvorgang werden die Wafer zunächst auf 100 °C erhitzt. Dabei wird der SU-8-Resist elastisch und unter großen Kräften mit dem zweiten Wafer in Kontakt gebracht. In einem zweiten Temperaturschritt wird der Stack auf 130 °C erwärmt. Es kommt zur Komplettvernetzung des SU-8. So entsteht eine starke Verbindung zwischen beiden Wafers. Wegen der niedrigen Bond-Temperatur wird dieses Verfahren häufig in Verbindung mit Metallelektroden eingesetzt. Ein anderer Vorteil bei diesem Verfahren ist die Biokompatibilität und die Beständigkeit des SU-8 gegen Lösemittel.

Eine kosteneffizientere Methode zum adhäsiven Bonden von Kombinationen aus Glas und Silizium ist der Einsatz von Folien. Dabei werden die Wafer durch spezielle Trockenfilme verbunden. Die dazu benötigten Folien können im ersten Schritt kostenintensiver sein

als beispielsweise das Polymer SU-8. Jedoch sind neben einer Heizplatte und einer Laminierrolle keine speziellen Anlagen notwendig, um dieses Bondverfahren durchzuführen, was sich in den entsprechend niedrigen Prozesskosten widerspiegelt.

Die Trockenresistfilme werden typischerweise bei circa 100 °C auf einer Heizplatte auf das Substrat laminiert. Der Bondprozess, bei dem das zweite Substrat zum ersten ausgerichtet ist, findet bei circa 150 °C statt. Dabei polymerisiert die Folie zwischen den Wafers und verbindet die beiden Substrate. Das Aufbringen einer kleinen Kraft während dieses Polymerisationsprozesses verbessert die Bondqualität. Je nach Wahl von Bond-Temperatur und Kraft kann zwischen einem temporären und einem permanenten Bond gewählt werden. Bei geringen Kräften beziehungsweise niedrigen Temperaturen lassen sich die Wafer wieder separieren.

Im Technologiefeld der Mikrofluidik ist derzeit zu erkennen, dass äußerst spezifische Kundenanforderungen, beispielsweise die Enzymintegration in Kanalsystemen auf Bio-Chips, meist nur mit adhäsiven Bond-Techniken durchgeführt werden können. Klassische Techniken wie das eutektische oder anodische Bonden sind in diesem Anwendungsfeld seltener, und Lösungen müssen an diese Anforderungen angepasst werden. Für spezielle Anwendungen wird bei iX-factory daher ein anodisches Niedrigtemperaturverfahren entwickelt, bei dem das anodische Bonden bei Temperaturen von 250 °C möglich ist. Dies schafft weitere wegweisende Alternativen in den oben genannten Marktfeldern. ■ MI110247

AUTOR

NIKLAAS KONOPKA ist Projektleiter bei der iX-factory GmbH in Dortmund; info@ix-factory.de