

Niedertemperatur-Silizium-Silizium-Bonden (NTB)

Einführung

In der Mikrosystemtechnik ist das Bonden von Wafer auf Wafer ein grundlegender Fertigungsschritt. Nahezu alle bekannten Verfahren brauchen hohe Temperaturen, welche aber die Stabilität von CMOS-Bausteinen beeinträchtigen.

Eines dieser Verfahren, das „Silikon Wafer Direkt Bonden“ (SDB), kommt ohne Zwischenschichten aus und erspart besondere Arbeitsgänge einschließlich der Photolithographie. Außerdem entfällt die Gefahr der Kontamination. Das SDB wird in drei Schritten ausgeführt.

1. Zunächst wird die Oberfläche soweit präpariert, dass bei genügender Annäherung Van-der-Waals-Kräfte die beiden Wafer aufeinander halten.
2. Hierzu – zweitens – werden die beiden Wafer präzise zueinander ausgerichtet und dann aufeinander gepresst. Dieser Schritt erfolgt bei Raumtemperatur, was für die beteiligten Maschinen (Bond-Aligner) ideal ist.
3. Die Partner bonden i.a. spontan, die Verbindungsenergien müssen nur für den Transport zum – drittens – „Annealing“ ausreichen. Bei Temperaturen um 1000°C verwandeln sich die schwachen Bindungen in chemisch und mechanisch stabile Si-O-Brücken.

Nachteilig ist, dass die „normale“ Reihenfolge der Wafer-Strukturierung umgedreht werden muss: Ätzen – Bonden – CMOS-Prozess – Verpacken usw. Ätzen, Bonden und Verpacken werden von der Mikrosystem-Herstellern durchgeführt, der CMOS-Prozess jedoch von den Foundries. Diese lehnen meist das Prozessieren von Wafern wegen des Kontaminationsrisikos ab, die nicht mehr jungfräulich sind.

Könnte man die Wafer bei niedrigeren Temperaturen annealen, käme das SDB dem Ideal nahe.

Ziel des Vorhabens war es, das NTB soweit zu verstehen und zu verbessern, dass industrielle Nutzung möglich wurde (FhG-IZM, Institutsteil Chemnitz; MPI für Mikrostrukturphysik, Halle). Diese sollte anhand von ausgeführten Sensoren der Industriepartner TEMIC CONTI und XFAB nachgewiesen werden. Für eine kommerziell verfügbare Bondanlage waren die entsprechenden Module zu entwickeln (SUSS MicroTec).

Auswahl geeigneter Aktivierungsvarianten

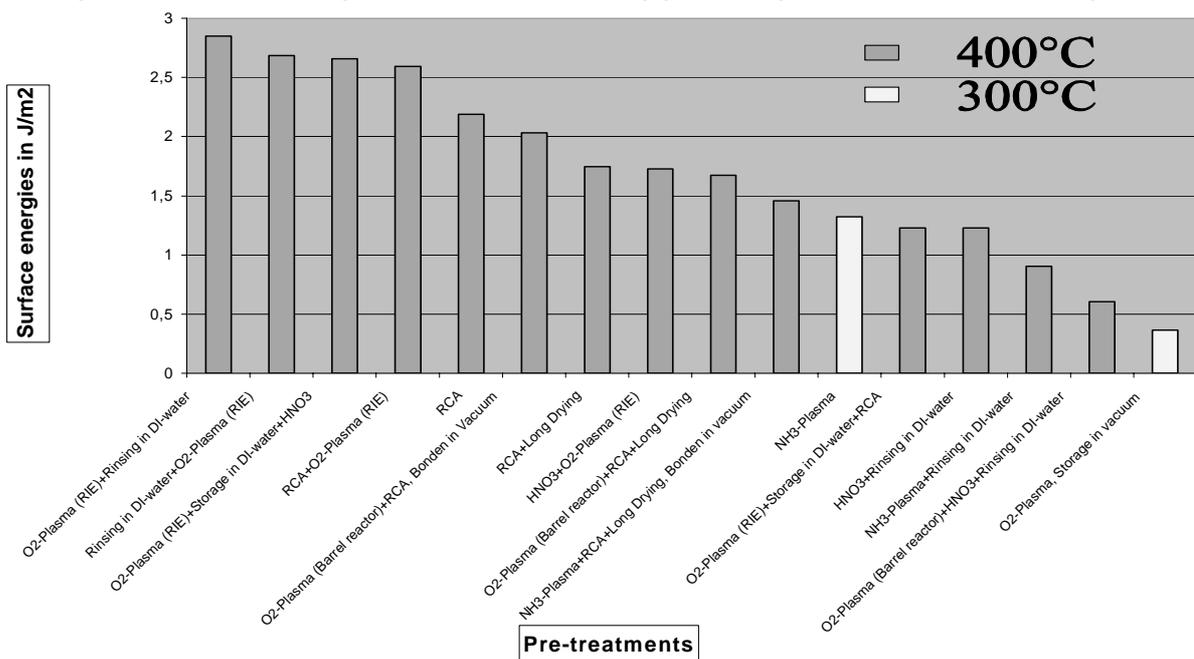
Spezifische Anforderungen an die Bondtechnologie sind die Herstellung der Bondverbindung mit blanken Siliziumsubstraten bzw. auch das Bonden über isolierende Zwischenschichten am Bondinterface (vorzugsweise thermisches Oxid und/oder LPCVD-Nitrid bzw. auch PE-Oxide und PE-Nitride). Die Bondvorbehandlung muss gewährleisten, dass bestimmte Metallschichten, die als Metallisierungs- und Leitbahnebenen eingesetzt werden, nicht zerstört werden. Ein typisches Material hierfür ist Aluminium, welches bei der Vorbehandlung nicht zerstört oder angegriffen werden sollte. Für den Einsatz im Projekt wurden eine Reihe nasschemischer und plasmachemischer Vorbehandlungen sowie deren Kombinationen untersucht und die Oberflächenenergiedichten über die Spaltmethode bestimmt. Die einzelnen Vorbehandlungsarten und deren chemische Zusammensetzung sind in Tabelle 1 zusammengefasst. Für die Wahl der geeignetsten Vorbehandlung wurden auch Kombinationen der genannten Vorbehandlungen bewertet.

Tabelle 1: Auswahl von Vorbehandlungen für das Niedertemperaturbonden

Nr	Vorbehandlung	Chemikalien/Parameter	Zeit/min	Temp.
1.	RCA	1. NH ₃ OH:H ₂ O ₂ :H ₂ O = 1:1:6 2. DI-Spülen 3. HCL:H ₂ O ₂ :H ₂ O = 1:1:6 4. DI-Spülen 5. NH ₃ OH:H ₂ O ₂ :H ₂ O = 1:1:6 6. DI-Spülen	10 15 10 15	75°C RT 75°C RT
2.	HNO ₃	1. HNO ₃ (65%) 2. DI-Spülen	10	RT
3.	O ₂ -Plasma (Rohrreaktor)	1. p=1,33Pa, P=800W, F=700sccm (Normaldruck) 2. RCA oder DI-Spülen	15	-
4.	O ₂ -plasma (RIE-Reaktor)	1. p=10Pa, P=15W, Bias=100V, F=100sccm 2. RCA oder DI-Spülen	5	-
5.	NH ₃ -plasma	1. p=840 Pa, P= 100W, F= 73 sccm 2. DI-Spülen	15	350°C

Die in Abbildung 1 dargestellte Graphik liefert eine Übersicht über die ermittelten Messergebnisse der Untersuchungen verschiedener Vorbehandlungen nach der Maszara Spaltmethode. Deutlich ist zu erkennen, dass die mit RIE-Plasma behandelten Proben wesentlich höhere Oberflächen-Energiedichten ($2,8 \text{ J/m}^2$) liefern als die anderen getesteten Vorbehandlungen.

Abbildung 1: Oberflächenenergiedichtewerte in Abhängigkeit der gewählten Vorbehandlungen



In Auswertung dieser Untersuchungen und der Ergebnisse beim Projektpartner MPI Halle werden für die vorliegenden Anwendungen ein hydrophiles Bonden mittels Plasmaaktivierung (Sauerstoff) in Kombination mit einer DI-Wasser Behandlung favorisiert:

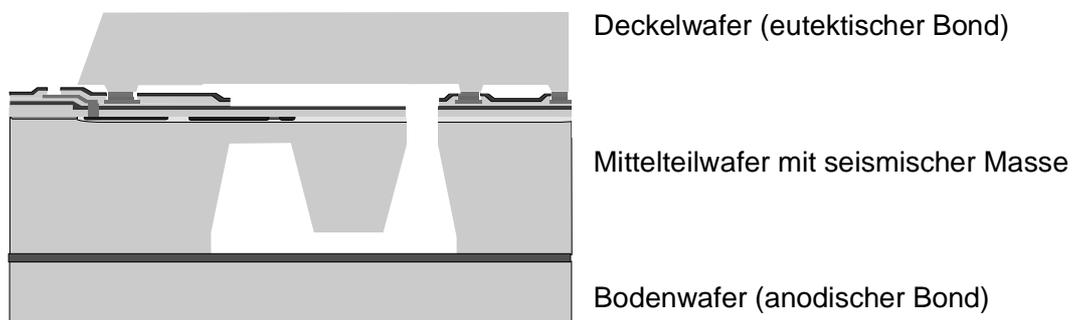
- Druck 10 Pa
- HF-Leistung 15 W (Frequenz 13,7 MHz)
- Biasspannung 100 V
- O₂-Fluß 100sccm
- Aktivierungszeit 5 min
- anschließende Spülung 15 min
- Trocknung an Luft (< 70°C).

Die Lagerzeiten bis zum Bondvorgang der so vorbehandelten Wafer sollten 2h nicht überschreiten.

Niedertemperatur-Bond bei ContiTemic

Maßgeblich für die Qualität der Bondverbindung ist die Oberflächenqualität der Wafer. Rauigkeiten können die Bondfestigkeit reduzieren oder den Bond unmöglich machen. Bei der Sensorherstellung durchläuft der Wafer unterschiedliche Prozesse, welche die Siliziumoberfläche verändern können. Am Beispiel des Beschleunigungssensors (Abbildung 2) sollte demonstriert werden, dass die Vorprozessierung des Siliziumwafers die Bondfähigkeit nicht negativ beeinträchtigt. Zusätzlich muss gezeigt werden, dass der Bondprozess seinerseits die Sensoreigenschaften nicht nachteilig beeinflusst.

Abbildung 2: Airbag Beschleunigungssensor



Zur hermetischen Verschließung des Sensors wird ein Bodenwafer und ein Deckwafer auf den mittleren Wafer gebondet. Während der Deckelbond mit einem eutektischen Bondverfahren realisiert wird, besteht der Bodenbond aus einem anodischen Bondverfahren mit einer Zwischenschicht aus Glas. Dieser doppelte anodische Bond soll durch den Niedertemperaturbond ersetzt werden.

Man erhofft sich dadurch ein besseres Verhalten des Sensors, da durch den reinen Silizium-Silizium Bond keine thermischen Verspannungen auftreten können wie beim derzeitigen anodischen Bond. Außerdem entfällt die aufwendige Vorprozessierung des Bodenwafers als Silizium-Glasverbund, was sowohl die Kosten reduziert als auch die Ausbeute erhöht.

Die Rückseite des Mittelteilwafers, auf der der Niedertemperatur-Bondprozeß erfolgt, ist aufgrund der Vorprozessierung schon mehrfach bearbeitet worden:

- Grinden (mechanisch) von 525µm Ausgangsdicke auf 350µm
- Nasschemisches Rückdünnen (SEZ-Anlage) auf 300µm Enddicke
- Abscheiden einer PO/PN Passivierung (500nm/500nm)
- Nasschemisches Entfernen der Passivierung mit 25%HF

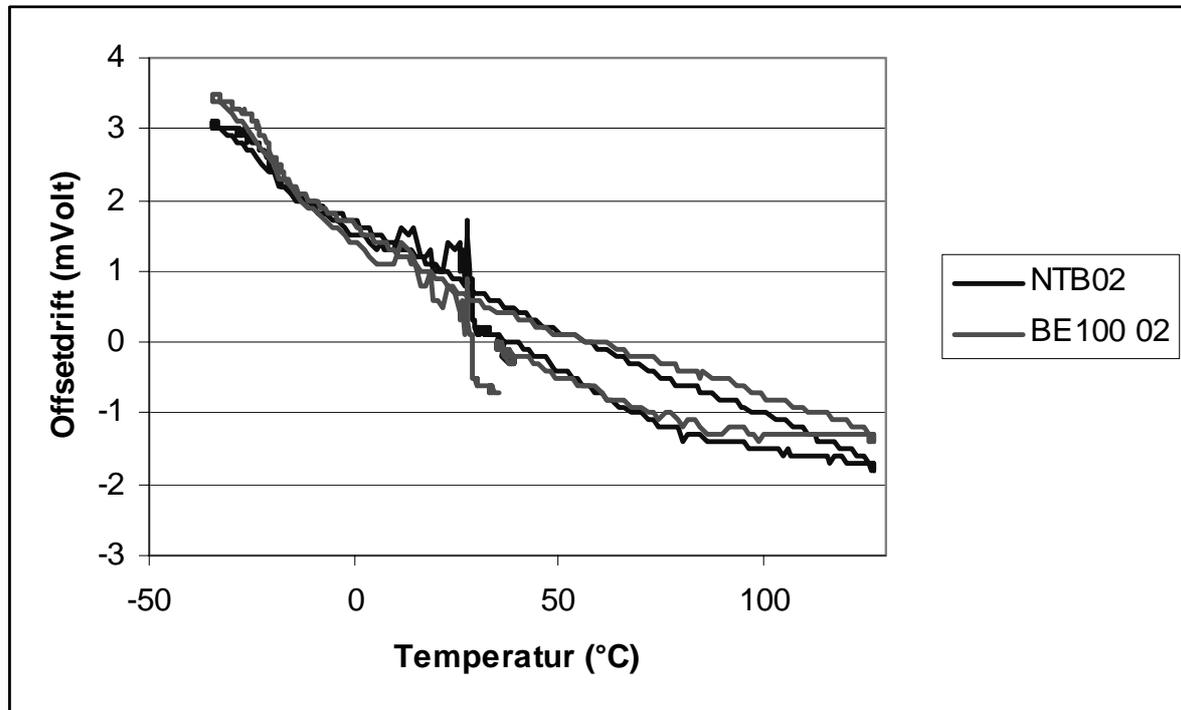
Ergebnisse ContiTemic

Bei den elektrischen Parametern (Kontaktwiderstände, Widerstand der piezo-Widerstände) wurde keine Beeinflussung durch das O₂-Plasma festgestellt. Diese Werte ändern sich durch den Aktivierungs- und Bondprozeß nicht.

Als weiteres wichtiges Kriterium wurde die Offsetstabilität in Abhängigkeit von der Temperatur untersucht. Durch thermische Verspannungen der Materialien kann sich thermisch induzierter Stress auf die Piezo-Auslesewiderstände übertragen und so einen temperaturabhängigen Offset hervorrufen. Diese Temperaturdrift des Offsets im

Temperaturbereich -40°C bis $+125^{\circ}\text{C}$ wurde von einem NTB gebondeten Sensorelement (NTB02) gemessen, und mit dem eines herkömmlichen Sensorelements ohne NTB (B100 02) verglichen (Abbildung 3).

Abbildung 3: Offsetstabilität des Beschleunigungssensors über der Temperatur



Durch den Niedertemperaturbond stellt sich keine Verschlechterung der Offset-Stabilität über der Temperatur ein. Damit konnte gezeigt werden, dass dieses neue Bondverfahren die Performance der Sensorelemente nicht verschlechtert.

Niedertemperatur-Bond bei XFAB

Als Beispiel zum Nachweis der Leistungsfähigkeit des NTB-Verfahrens sollte in der X-FAB ein Relativdrucksensor dienen. Dessen rückseitige Kavität sollte mit einem Deckwafer verschlossen werden, so dass ein Absolutdrucksensor entsteht. Beim Bonden muss dabei Vakuum eingeschlossen werden, damit ein temperaturinvarianter Referenzdruck entsteht. Die Sensorwafer werden im Standardprozess der X-FAB für Membransensoren in großen Stückzahlen gefertigt. Zunächst wird in einem modifizierten CMOS-Prozess die Wafer-Vorderseite bearbeitet. In 4 Ebenen werden die elektrischen Strukturen erzeugt (piezoresistive Widerstände, Zwischenisolator, Bondpads und Leitbahnen, Passivierung) bevor im letzten Maskenschritt, die Rückseitenmaske für die KOH-Ätzung aufgebracht wird. Das KOH-Ätzen erfolgt mit elektro-chemischem Ätzstop an einer Epi-Schicht, wodurch sehr gleichmäßige Membrandicken erreicht werden. Das Bonden erfolgte mit nach dem oben beschriebenen Regime. Als Deckwafer wurden unstrukturierte Si-Wafer verwendet.

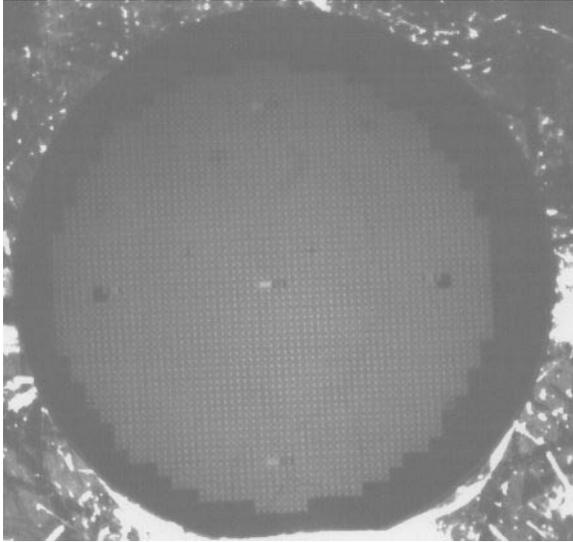


Abb. 5a: vorgebondeter Sensorwafer, komplett gebondet

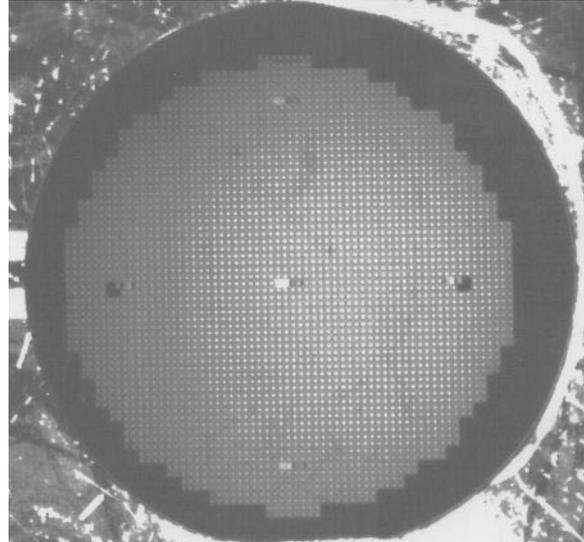


Abb. 5b: getemperter Sensorwafer, keine ungebondeten Gebiete

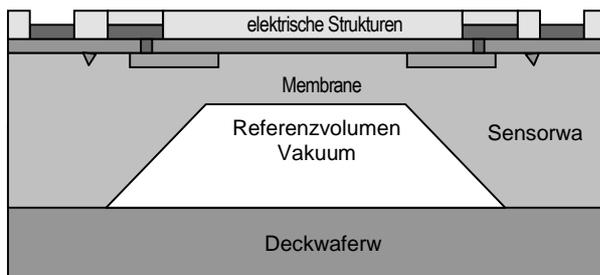


Abb. 5c: Schematischer Aufbau Demonstrator Absolutdrucksensor

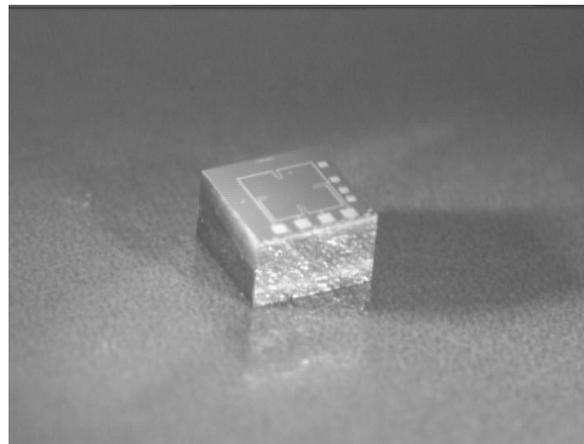


Abb. 5d: Foto gebondeter Absolutdrucksensorchip

Mit der Herstellung der Muster könnte gezeigt werden, dass das entwickelte Niedertemperatur-Bondverfahren sehr gut geeignet ist, um mikromechanische Sensoren durch Bonden prozessierter Wafer zu komplettieren. Elektrische Messungen haben gezeigt, dass die elektrischen Sensorparameter durch die Plasma-Aktivierung und die Temperaturbehandlung während des Bondprozesses nicht verändert werden. Messungen auf dem Wafer ergaben keine Hinweise auf mechanische Spannungen, die von der Bondverbindung auf den Sensor ausgeübt werden. Auf Grund einer reproduzierbaren und dauerhaften Membrandurchbiegung kann geschlossen werden, dass wie gefordert Vakuum in die Kavität eingeschlossen werden konnte und die Bondverbindung, zu mindestens über ein Jahr, als hermetisch dicht anzusehen ist. Somit erfüllen die gefertigten Absolutdrucksensoren die anfangs aufgestellten Forderungen.

Anprobe einer trockenen Aktivierung

Die bisher vorgestellte Technologie zum Bonden von Siliziumwafern bei niederen Temperaturen enthält direkt vor dem Vorbonden ein Wasserspülen, als Teil der Aktivierung. Mit diesem Schritt sollen zum einen die Oberflächen von Partikeln und Kohlenwasserstoffanlagerungen befreit werden. Zum anderen lagern sich Hydroxylgruppen an der Waferoberfläche an, die das Bonden begünstigen. Dieses Spülen steht einem universellen Einsatz des Bondverfahrens jedoch entgegen, da z.B. oberflächenmikromechanische Strukturen zerstört werden können. Aus diesem Grund wurde angestrebt, auf den Spülprozess zu verzichten. Nachdem erste Versuche am FhG