



Abschlussbericht

(Kurzfassung)

Selektives Waferbonden zur Realisierung von Mehrlagenaufbauten auf Silizium – Basis

AiF-Vorhaben-Nr: 12371N

Projektlaufzeit: 01.03.2000 – 28.02.2002

Verfasser: Peter Nommensen

Der vollständige Bericht kann von Interessenten angefordert werden.

**Institut für Mikro- und Informationstechnik
der Hahn-Schickard-Gesellschaft e.V.**

Wilhelm-Schickard-Str. 10
D-78052 Villingen-Schwenningen

Tel.: +49 7721/943-0
Fax: +49 7721/943-210
Email: info@hsg-imit.de
Web: www.hsg-imit.de

Veröffentlichung zum AiF – Projekt:

Selektives Waferbonden zur Realisierung von Mehrlagenaufbauten auf Silizium – Basis

Bedeutung des Waferbonden für die Mikrosystemtechnik:

Für mikromechanische Anwendungen hat sich das Verbinden von Siliziumwafern untereinander (Silicon-Fusion-Bonding) und mit Glas (anodisches Bonden) zu einem entscheidenden technologischen Verfahren herauskristallisiert. Die zunehmende Integration und Miniaturisierung in der Mikrosystemtechnik führen zu einer stärkeren Einbeziehung von Mehrlagenaufbauten. Bauelemente aus zwei oder drei Wafern bestimmen vermehrt die Entwicklung. Solche Waferstapel können durch die genannten Bondverfahren mit hoher Qualität und Produktivität gefügt werden. Gerade die Beherrschung dieser Prozesse ist dabei ein Schlüsselfaktor zur Qualitätserhöhung und Kostensenkung eines so gefertigten Bauteils.

Die Möglichkeit, lokal selektive Verbindungen zu erzeugen, ist für den Aufbau von Mikrosystemen und deren Anwendung darüber hinaus von entscheidender Bedeutung. Der Rahmen dieses Forschungsvorhabens gestaltete sich aus der Auseinandersetzung mit dem erreichten Entwicklungsstand und die Erschließung dieser Verfahren für das Bonden kompliziert gestalteter Mikrostrukturkomponenten, gekoppelt an die Bedingung des simultanen Bondens einer größerer Anzahl von Einzelkomponenten, um fertigungsrelevante Produktivitätswerte zu erreichen.

Selektives, (elektrisch) isolierendes Bonden:

Die Betrachtung der Waferbondprozesse erfolgte schwerpunktmäßig durch die Erzeugung und Einbeziehung selektiv nichtbondender Schichten sowie Bereiche.

Beim selektiven Verbinden gibt es neben den Chipflächen eines Bauteils, die fest miteinander verbunden sein müssen, auch Flächen, die sich zwar berühren aber funktional nicht verbunden sein dürfen. Dies kann zum Beispiel durch eine geeignete Strukturierung der Oxidschicht, eine selektive Vorbehandlung der Oxidschichtoberfläche oder eine selektive Verwendung geeigneter nichtbondender Schichtflächen erzielt werden. Auch die Wirkung verschiedener Ätzprozesse auf die Bondbarkeit einer Siliziumoberfläche soll zur Schaffung nichtbondender Bereiche ausgenutzt werden, um auch hier durch „Aufrauen“ bestimmter Bereiche auf dem Siliziumwafer selektiv Fehlstellen in einer Bondverbindung zu schaffen.

Untersuchung von elektrisch isolierenden Schichten auf ihre Bondbarkeit:

Aus den dazu durchgeführten Versuchsreihen für das Silicon-Fusion-Bonding geht hervor, dass sich die Bondbarkeit von **PECVD – Schichten (Oxid, Nitrid)** ab einer Schichtdicke von 100 nm verschlechtert bzw. kein Bond mehr möglich ist. Eine erhöhte Oberflächenrauigkeit sowie die inhomogene Abscheidung führen auch bei **LPCVD – Oxidschichten (Niedertemperatur – Oxid)** bereits bei geringen Schichtdicken zu nichtbondbaren Oberflächen. Alle drei Schichten werden mittels Abscheidung auf den Siliziumwafern erzeugt und lassen sich als sogenannte „selektive Bondverhinderer“ problemlos in einen Technologieprozess zur Fertigung eines mikromechanischen Bauteils integrieren.

LPCVD – Nitridschichten hingegen verursachen bei Schichtdicken von 100 nm bis 200 nm eine Verringerung der Bondkraft auf bis zu 5 N/mm² (vgl. bis 40 N/mm² bei Si – Si – Verbindung erreichbar). **Thermisch erzeugte Oxidschichten** zeigen bei Schichtdicken von bis zu 2000 nm keinen wesentlichen Einfluss auf die Qualität der Bondverbindung. Das Aufbringen sowie die Strukturierung beider Schichten lässt sich ebenfalls problemlos in einen Technologieablauf integrieren. Als „Bondverhinderungsschichten“ sind sie nicht geeignet.

Die beim anodischen Bond den Fügeprozess unterstützende elektrostatische Anziehungskraft ist ausreichend groß, um auch Wafer mit einer verminderten Oberflächenqualität zu bonden.

Für PECVD-Schichten sowie thermisches Oxid können bei Schichtdicken von bis zu 400 nm mit den folgenden Einstellungen: $U_{\text{Bond}} = 700 \text{ V}$ und $T_{\text{Bond}} = 400^\circ\text{C}$ sichere Bondverbindungen garantiert werden. Die Verwendung dickerer Zwischenschichten ist grundsätzlich mit einer Erhöhung der Bondspannung zu berücksichtigen. Auch LPCVD-Nitridschichten wirken sich für die genannten Schichtdicken auf den anodischen Bondprozess nicht negativ aus und führen ebenfalls zu stabilen Bondverbindungen. Ein vermindertes Bondergebnis zeigt sich lediglich für LPCVD-Oxid-Zwischenschichten bereits ab einer Dicke von 100 nm.

Als „Bondverhinderer“ beim anodischen Bonden sind die hier getesteten Schichten nicht oder nur in bedingtem Maß geeignet. Erhöht man die Schichtdicke, so verringert sich Fügekraft der beiden Bondpartner. Eine Bondreaktion findet immer statt, sodass sich die gebondeten Flächen nur mit erhöhtem Kraftaufwand wieder trennen lassen. Zu den nichtbondenden Schichten zählen Metallschichten wie Aluminium, Titan, Wolfram-Titan oder Chrom. Für Goldschichten ist zu beachten, dass man bei Verwendung die Bondtemperatur unter 380°C hält (eutektische Temperatur für Gold-Silizium-Verbindung).

Aufrauen von Siliziumoberflächen zur Schaffung nichtbondender Bereiche:

Der Bondvorgang steht nur selten am Anfang eines technologischen Prozesses. Es befinden sich oftmals Schichten oder ein ganzes Schichtsystem auf dem Wafer, welches danach wieder zu entfernen ist. Die Bondbarkeit der Oberfläche, die dann letztendlich als Bondoberfläche dienen soll, wird davon beeinflusst. Die Wirkung verschiedener Ätzprozesse auf die Bondbarkeit einer Siliziumoberfläche soll zur Schaffung selektiv nichtbondender Bereiche ausgenutzt werden. Getestet wurden verschiedene Ätzmedien für sowohl Plasmaätzprozesse (speziell mit fluorhaltigen Gasen) als auch Nassätzprozesse:

Nasschemische Ätzung in:

- 33%-iger KOH
- 5%-iger Flusssäure
- heißer Phosphorsäure ($T = 170^\circ\text{C}$)
- gepufferter Flusssäure

Plasmabehandlung in:

- CF_4
- CHF_3
- $\text{CF}_4 + \text{CHF}_3$
- C_4F_8
- SF_6

Bei der Bearbeitung dieser Versuchsreihe wurde generell die Erfahrung gewonnen, dass sich die Bondbarkeit einer Siliziumoberfläche durch einen voranliegenden Ätzschritt verschlechtert. Alle hier untersuchten Ätzmedien führen bei Anwendung und mit zunehmender Bearbeitungszeit zu einer Aufräumung der Siliziumoberflächen und somit zu einem verminderten Bondergebnis. Dennoch sind im allgemeinen relativ lange Ätzzeit nötig, um eine Siliziumoberfläche unbondbar zu machen. Die Versuche wurden mit ganzflächig geätzten Wafern realisiert. Zur selektiven Bearbeitung von Siliziumoberflächen spielt bei der Auswahl des Ätzmediums, die Ätzdauer und die Möglichkeit der Maskierung eine wichtige Rolle. Nachteilig zeigen sich insbesondere die Methoden der nasschemischen Bearbeitung. Hier besteht das Problem einer idealen Maskierung, die aufgrund der hohen Prozesszeiten dem Ätzmedium standhält. Als Maskierung zur lokalen trockenchemischen Behandlung von Siliziumoberflächen können idealer Weise Fotolackmasken verwendet werden, die auch für längere Ätzzeiten eine ausreichende Passivierung gegenüber dem Ätzprozess bieten. Als am geeignetsten stellten sich die Ätzmedien KOH (nasschemisch) und SF_6 (trockenchemisch) heraus, die bereits nach jeweils kurzer Ätzdauer zu nicht bondbaren Waferoberflächen führen. Gerade das Problem einer idealen Maskierung zur selektiven Bearbeitung der Waferoberfläche stellt sich aufgrund der kurzen Ätzzeiten hier nicht.

Eine Ausnahme bildet das Gas C_4F_8 , das eine dünne für das Bonden nicht geeignete Schicht auf die Bondoberfläche legt. Eine lokale Oberflächenbearbeitung ist erneut nicht möglich, da ein selektives Verfahren zum Entfernen der Maskierschicht bis dahin nicht möglich war. Bei allen Wafern lässt sich nachträglich eine bondbare Siliziumoberfläche durch einen anschließenden Polierschritt wieder herstellen.

Die folgenden Abbildungen zeigen mögliche Anforderungsprofile sowie deren Lösungen mit Hilfe der erarbeiteten Ergebnisse:

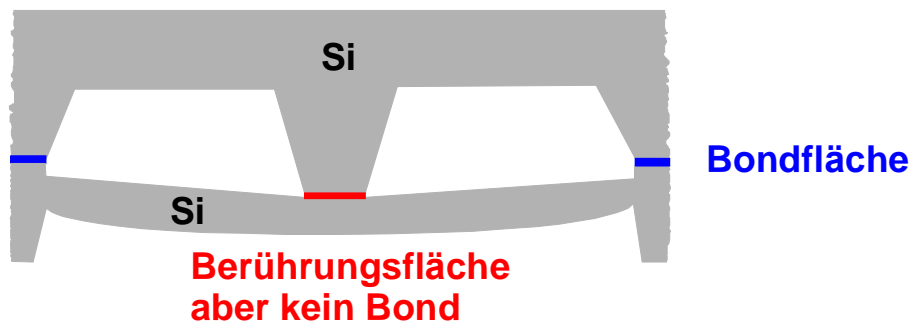


Abbildung 1: Berührungsfläche realisiert mit selektiv aufgerauter Oberfläche (nasschemisch: KOH, trockenchemisch: SF_6)

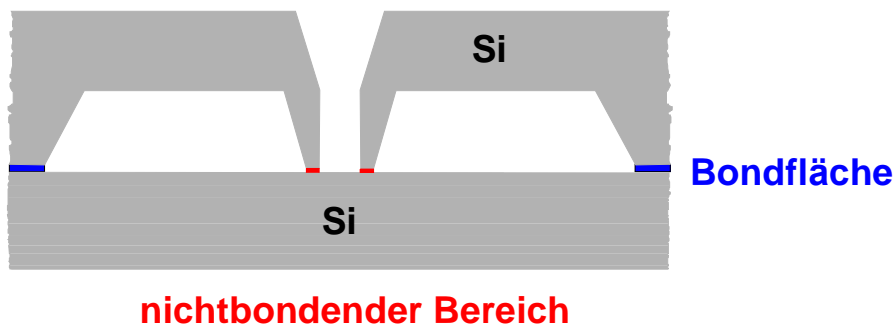


Abbildung 2: Nichtbondender Bereich realisiert mit selektiv bearbeiteter „Bondverhinderungsschicht“ (PECVD – Oxid/Nitrid, LPCVD – Oxid)

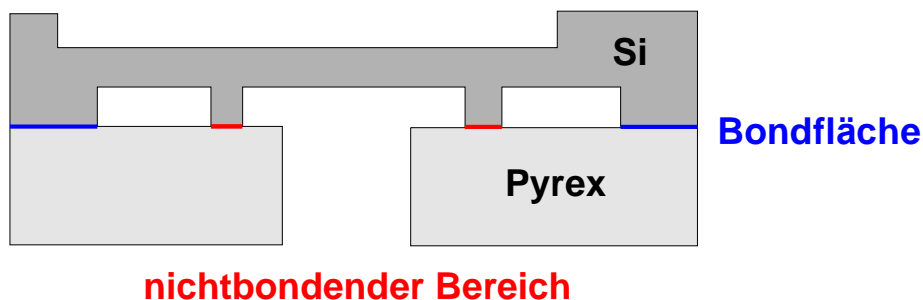


Abbildung 3: Nichtbondender Bereich realisiert mit selektiv bearbeiteter Metallschicht

Selektives, elektrisch leitendes Bonden (Eutektisches Bonden):

Neben dem Silizium-Direkt-Bonden und dem anodischen Bonden, können auch mit dem Verfahren „Eutektisches Bonden“ hermetisch dichte und mechanisch hochfeste Verbindungen mittels einer geeigneten Metall-Multilayerzwischenschicht realisiert werden. Einige Vorarbeiten am HSG-IMIT haben gezeigt, dass die binäre Legierung Gold-Silizium

grundsätzlich geeignet ist, um strukturierte und prozessierte Silizium-Chips selektiv hochfest zu verbinden. Unter dem Gesichtspunkt einer wirtschaftlich kostengünstigen Produktion, war die Entwicklung eines verfügbaren, reproduzierbaren, charakterisierten und dokumentierten eutektischen Bondprozesses im Full-Wafer-Verfahren die Zielsetzung bei der Bearbeitung des zweiten Teils dieses Projektes. Ausgehend von der zuvor erwähnten Gold-Silizium-Legierung, galt es, zudem geeignete Multilayerschichtsysteme für dieses Bondverfahren zu entwickeln.

Der Verbindungsprozess „Eutektisches Bonden“ ist ein Spezialfall des Lötens, wobei das Lot im vorliegenden Fall aus einer Gold-Silizium-Legierung besteht, das bei der sogenannten eutektischen Temperatur von $T = 363^{\circ}\text{C}$ schmilzt. Neben dem erwähnten Fall kann auch Aluminium mit Silizium eine eutektische Legierung bilden. Allerdings liegt hierbei die eutektische Temperatur mit $T = 577^{\circ}\text{C}$ über dem Schmelzpunkt von Gold-Silizium-Verbindungen. Aus diesem Grund werden Aluminium-Silizium-Legierungen eher selten angewendet und wären zudem mit den zur Verfügung stehenden Mitteln technisch nicht durchführbar gewesen. Für das eutektische Bonden ist es entscheidend, eine starke Bondverbindung zwischen beiden Materialien im atomaren Bereich zu erreichen.

Ergebnisse:

Basierend auf der Grundlage eines Gold-Silizium-Eutektikums (= Bondzwischen-schicht) konnte die Bondbarkeit verschiedener Schichtsysteme getestet und nachgewiesen, sowie Parametergrenzen festgelegt werden, die eine homogene Bondverbindung auf Wafer-ebene ermöglichen:

- bezüglich der Schichtdicke ist eine untere Grenze von mindestens 750 nm zu beachten
- die Haftung von Goldschichten auf einer Oxidoberfläche ist nicht ausreichend
- wird der Einbau von Diffusionsbarrieren oder elektrisch isolierender Bereiche auf dem Wafer in Form einer auf dem Silizium befindlichen Oxidschicht notwendig, sollte das Schichtsystem um eine sog. Haftschiicht erweitert werden
- eine geeignete Strukturierung der Multilayerschichten ermöglicht selektives eutektisches Bonden auf Fullwafer-Ebene sowohl für Siliziumverbunde als auch für Silizium - Glas – Verbindungen.

Auswertung der Versuchsreihen:

Zur Beurteilung der Bondverbindungen wurden im Rahmen der durchgeführten Versuchsreihen drei Testmethoden angewendet:

- Infrarot – Analyse (Zerstörungsfreie Analyse von Silizium – Silizium – Verbindungen)
- Zugversuche (Messung der Zugkraft für Silizium – Silizium – Verbindungen und eutektischen Bondverbindungen)
- Ultraschallmessungen (bietet optischen Eindruck über die Qualität von eutektischen Bondverbindungen)

Dieses Forschungsvorhaben wurde aus Haushaltsmitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMW) über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen "Otto von Guericke" e.V. gefördert. Wir danken für die finanzielle Unterstützung, die dieses Projekt ermöglicht hat. Der gesamte Abschlussbericht kann von Interessenten angefordert werden.