

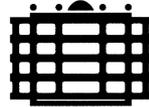


Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik

Professur Mikrotechnologie

Diplomarbeit

- Thema:** Optimierung und Herstellung von Dualband-Fabry-Pérot-Filtern mit neuartigen Schichtmaterialien
- Vorgelegt von:** cand. Ing. Christian Gebauer
geb. am: 03.08.1984 in: Wolfen
- Studiengang:** Mikrotechnik/Mechatronik
Studienrichtung: Mikroproduktionstechnik
- Betreuer:** Prof. Dr. Dr. Prof. h.c. mult. Thomas Geßner
Dr. -Ing. habil. Karla Hiller
- Abgabe:** Chemnitz, den 13. Dezember 2010



TECHNISCHE UNIVERSITÄT
CHEMNITZ

Aufgabenstellung

zur

Diplomarbeit
im Studiengang Mikrotechnik/Mechatronik
in der Studienrichtung Mikroproduktionstechnik

für

Herrn Christian Gebauer
geb. am 3. August 1984 in Wolfen

zum Thema

Optimierung und Herstellung von Dualband-Fabry-Perot-Filtern mit neuartigen
Schichtmaterialien

(ausführliche Aufgabenstellung siehe Rückseite)

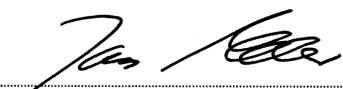
Betreuender Hochschullehrer: Prof. Dr. Thomas Geßner

Ausgabedatum: 01.06.2010

Abgabedatum: 30.11.2010

Tag der Abgabe:

Unterschrift:


Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. J. Mehner
Vorsitzender des Prüfungsausschusses

Ausführliche Aufgabenstellung:

An der TU Chemnitz werden seit einigen Jahren in Kooperation mit der Firma InfraTec Dresden und dem Fraunhofer ENAS Chemnitz mikromechanische Fabry-Perot-Filter entwickelt und hergestellt. Eine erprobte Variante beruht auf dem Ansatz, dicke Reflektorträger aus einkristallinem Silizium zu verwenden, von denen einer beweglich und einer fest angeordnet ist. Auf diesen Reflektorträgern werden Bragg-Reflektoren und Antireflexionsbeschichtungen aufgebracht. Die Variation des Spaltabstandes erfolgt durch elektrostatische Kräfte. Seit kurzem werden neuartige Materialien (ZnS, Ge und YbF₃) für die optischen Schichten getestet, welche vom Projektpartner Jenoptik selektiv über Schattenmasken am Ende der Prozesskette abgeschieden werden. Die beiden Reflektor-Wafer werden mittels SU-8 als Zwischenschicht gebondet.

Nachdem in einem ersten Prozessdurchlauf die prinzipielle Machbarkeit der Technologie nachgewiesen wurde, besteht nunmehr die Aufgabe darin, sowohl am Design als auch an der Technologie Optimierungen durchzuführen, um noch vorhandene Schwachpunkte zu beseitigen. Solche Schwachpunkte, welche die Ausbeute verringern, sind z.B. elektrische Kurzschlüsse zwischen den Elektroden und zum Substrat, Kleben der beweglichen Strukturen, Fehlstellen und teilweise zu geringe Festigkeit der Bondverbindung, Defekte beim Vereinzeln der Wafer. In einem neuen Prozessdurchlauf sollen dann FPI mit verbesserter Performance hergestellt werden, wobei mehrere Varianten zur optischen Beschichtung zu integrieren sind. Parallel zur Montage mittels SU-8 soll auch die Montage mittels direktem Bonden getestet werden.

Im Einzelnen sind folgende Teilaufgaben zu lösen:

1. Analyse der Ergebnisse des ersten Prozessdurchlaufes
2. Voruntersuchungen von neuen optischen Schichtmaterial-Kombinationen in Bezug auf die Prozesskompatibilität (Chemikalien und Plasmen zur Oberflächenaktivierung, Kombination verschiedener Vorbehandlungsschritte, Temperatureinflüsse u.ä.)
3. Entwurf der optimierten Masken nach Vorgaben von InfraTec und ENAS
4. Entwurf des Technologieablaufes
5. Technologische Betreuung der Prozesse und Prozesskontrolle
6. Untersuchungen zur Festigkeit der SU-8-Bondung und zur Optimierung des Bondablaufes
7. Montage und Vereinzeln der Wafer
8. Auswertung, Zusammenstellung und Bewertung der Ergebnisse

Kurzreferat

In dieser Arbeit wurde die alte Designvariante des Fabry-Pérot-Filters (FPI4) hinsichtlich Performance und Ausbeute untersucht. Zielstellung war eine Optimierung, welche die Probleme wie Sticking, Kurzschluss zwischen Schirm und Elektrode sowie Defekte bei den Vereinzelungsverfahren beseitigen sollten. Ferner wurden eine Chipbezeichnung und eine neue geteilte Elektrode anvisiert. Ergebnis dieser Optimierung war das neue Design FPI5. Weiterhin wurde neben der Auslegung des FPI5 für das adhäsive Bonden mit SU8 eine Designvariante für das direkte Bonden realisiert. Das direkte Bonden konnte bereits bei den FPI mit zwei beweglichen Reflektorträgern erfolgreich getestet werden und soll nun auf die Designvariante mit nur einem beweglichen Reflektorträger übertragen werden. Außerdem wurde eine Überprüfung der SU8-Bondfestigkeit durchgeführt. Dabei konnte nachgewiesen werden, dass die bis dato benutzten Bondparameter nicht das Optimum bezüglich der Bondfestigkeit darstellen, da in Testverbunden mit veränderten Bondparametern bis zu 50 % höhere Bondfestigkeiten erreicht wurden.

Abstract

This work presents a new design type of the older well known tunable micromachined Fabry-Pérot filter (FPI4). Compared to the previous system the new design (FPI5) aimed to avoid the problems as sticking, short circuit between the shield and the electrode as well as the malfunction in dicing and separation. Furthermore an identification mark and a new separated electrode were to be improved. The conclusion of this optimization was the new Design FPI5. The whole geometry was in addition to the adhesive bonding with SU8 moreover designed for the direct bonding, which was successfully verified in the FPI design with two moveable reflector carriers. Additionally a verification of the bonding strength at different bonding parameters was done. This verification showed that a 50 % higher bonding strength could be achieved by using the new bonding parameters in comparison to the normally used bonding parameters.

Inhaltsverzeichnis

ABKÜRZUNGS- UND FORMELVERZEICHNIS	VI
1 EINLEITUNG	8
1.1 Motivation	8
1.2 Kapitelübersicht.....	11
2 DAS FABRY-PEROT-INTERFEROMETER	12
3 DAS ALTE DESIGN FPI4	15
3.1 FPI4.....	15
3.2 Optimierungspunkte und Schwachstellen.....	17
4 DAS NEUE DESIGN FPI5	19
4.1 Verhindern von Sticking	20
4.2 Isolator zwischen Schirm und Elektrode.....	22
4.3 Abdichtfolie für den Sägeprozess	22
4.4 Chipbezeichnung	23
4.5 Elektrodenform.....	23
4.6 Zusammenfassung des Redesigns.....	25
5 PROZESSTECHNISCHE REALISIERUNG	27
5.1 FPI5 – Direktbond	27
5.1.1 Oberteil	28
5.1.2 Unterteil.....	30
5.2 FPI5 – SU8.....	31
5.2.1 Oberteil	32
5.2.2 Unterteil.....	34
5.3 Selektive Schichtabscheidung der optischen Schichten.....	36
6 CHARAKTERISIERUNG DER MUSTER	37
6.1 FPI5 – Direktbond	37
6.1.1 Oberteil	38
6.1.2 Unterteil.....	40
6.1.3 Beschichtung der optischen Schichten in Jena.....	42
6.1.4 Zusammenfassung.....	44

6.2 FPI5 – SU8.....	47
6.2.1 Oberteil	48
6.2.2 Unterteil.....	49
6.2.3 Beschichtung der optischen Schichten in Jena	52
6.2.4 Zusammenfassung.....	54
7 BONDEN DER FPI	57
7.1 Vorversuche zur SU8-Bondfestigkeit	57
7.1.1 Realisierung der Bondmuster	59
7.1.2 Charakterisierung der Bondmuster	60
7.1.3 Vereinzelungstests der Bondmuster	63
7.1.4 Bondfestigkeitsüberprüfung der Bondmuster mit abgerundeten Bondrahmen.....	64
7.1.5 Bondfestigkeitsüberprüfung der Bondmuster ohne abgerundeten Bondrahmen.....	67
7.2 Direktbonden der FPI.....	73
7.2.1 Ablauf des Direktbondens	73
7.2.2 Charaktersierung der Bondmuster	76
7.3 SU8-Bonden der FPI.....	78
7.3.1 Präparation der SU8-Rahmenstruktur.....	78
7.3.2 Ablauf des SU8-Bondens.....	80
7.3.2 Charakterisierung der Bondmuster	81
8 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	83
LITERATURVERZEICHNIS	85
ABBILDUNGSVERZEICHNIS	87
TABELLENVERZEICHNIS	88
ANLAGENVERZEICHNIS	90

Abkürzungs- und Formelverzeichnis

Formelverzeichnis

d	μm	Dicke der Wafer
$d_{\text{Äo}}$	μm	Tiefe der oberen Grubenätzung
$d_{\text{Äu}}$	μm	Tiefe der unteren Grubenätzung
$d_{\text{Äuelo}}$	μm	Tiefe der unteren Grubenätzung für den optischen Spalt
$d_{\text{Äuopt}}$	μm	Tiefe der unteren Grubenätzung für den elektrostatischen Spalt
d_{BRAGG}	μm	Dicke des Braggreflektors
d_{elo}	μm	Länge des elektrostatischen Spaltes
d_{eloSt}	μm	Dicke des elektrostatischen Stapels
d_{ON}	μm	Dicke des Oxid-Nitrid-Stapels auf dem Bondrahmen
d_{opt}	μm	Länge des optischen Spaltes
d_{Rahmen}	μm	Höhe des Rahmenprofils
d_{SU8}	μm	Höhe des SU8
p	bar	Bonddruck
A_B	mm^2	Bondfläche
F_{Druck}	kg	Druckkraft
F_{Res}	kg	resultierende Kraft
F_{Scher}	kg	Scherkraft
T	°C	Bondtemperatur
γ	$\frac{J}{m^2}$	Bondenergie der Verbindung
τ	MPa	Scherfestigkeit der Bondung

Abkürzungsverzeichnis

ARC	Anti Reflection Coating – Antireflexionsschicht
Al	Aluminium
BRAGG	Reflexionsschicht
ENAS	Einrichtung für elektronische Nanosysteme
FPI	Fabry-Pérot-Interferometer
H ₂	Wasserstoff
H ₂ O	Wasser
IR	Infrarot
KOH	Kaliumhydroxid
LP-CVD	Low Pressure Chemical Vapor Deposition – Chemische Gasphasenabscheidung im Niederdruckbereich

MEMS	Mikro-Elektro-Mechanisches-System
MgO	Magnesiumoxid
O ₂	Sauerstoff
PE-Nitrid	Plasma Enhanced Nitrid – durch plasmagestützte CVD hergestelltes Nitrid
PE-Oxid	Plasma Enhanced Oxid – durch plasmagestützte CVD hergestelltes Oxid
POCl ₃	Phosphoroxchlorid
SFB	Silicon Fusion Bonding – Silizium Direkt Bonden
Si	Silizium
Si ₃ N ₄	Siliziumnitrid
SiO ₂	Siliziumdioxid
UV	Ultraviolett
YbF ₃	Ytterbiumfluorid
ZfM	Zentrum für Mikrotechnologie

1 Einleitung

1.1 Motivation

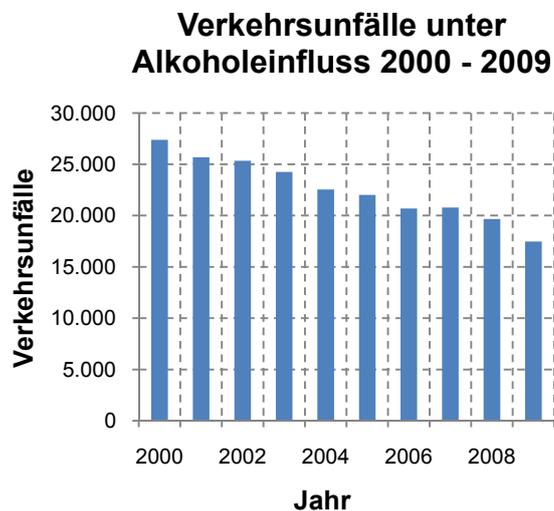
Das Einsatzgebiet von Mikrosystemen beschränkt sich heute nicht mehr nur auf wenige spezielle Sensoraufgaben. Mikrosysteme finden sich mittlerweile in vielen Geräten unseres täglichen Lebens wieder. Dementsprechend sind Mikrosysteme nicht nur Sensoren für Druck, Beschleunigung, Drehrate und Temperatur in der Fahrzeugtechnik und der Automatisierungstechnik, sondern sind beispielsweise auch in Form von Siliziummikrofonen und CCD¹-Chips in Mobiltelefonen verbaut. Moderne Waschmaschinen nutzen mikrosystemtechnische Temperatur-, Drehzahl- und Füllstandssensoren, die Medizintechnik nutzt komplexe Mikrosysteme im Herzkatheder und die chemische Industrie erzeugt moderne Produkte in Mikroreaktoren. [Hil06]

Weitere Einsatzgebiete, in denen die Mikrosystemtechnik bahnbrechende Erfolge liefert, sind Bereiche, die im Zusammenhang mit Sicherheit und der Vermeidung von Gefahren stehen. So birgt Autofahren unter Alkoholeinfluss ein großes Risiko nicht nur für den Fahrer, sondern auch für alle restlichen Verkehrsbeteiligten. Laut der aktuellen Unfallstatistik des deutschen Verkehrssicherheitsrates für das Jahre 2009 (vgl. Abbildung 1.1) verdoppelt sich bei einem Unfall unter Alkoholeinfluss die Wahrscheinlichkeit, dass Personen zu Tode kommen. Die Anzahl der im Jahr 2009 verursachten Alkoholunfälle liegt bei 17.471, wovon bei 443 Unfällen Personen getötet, bei 6.190 Unfällen Personen schwer verletzt und bei 15.591 Unfällen Personen leicht verletzt worden sind. Betrachtet man die Statistik bezogen auf die Jahre 2000 bis 2009, sinkt die Anzahl der Unfälle unter Alkoholeinfluss. Das ist allerdings darauf zurück zu führen, dass die maximal erlaubte Alkoholgrenze in den letzten Jahren gesunken ist, sich die Strafen für Fahrten unter Alkohol ständig erhöhen und die Sicherheitseinrichtungen wie das ESP² im Auto immer besser, schneller und zuverlässiger reagieren. Dessen ungeachtet sind 443 Unfälle mit getöteten Personen enorm hoch. Zum Einen ist eine präventive Aufklärungsarbeit von Nöten, um Fahrten unter Alkoholeinfluss zu verhindern. [Deu10] Zum Anderen kann durch den Einsatz von Diagnosegeräten im Auto vor Fahrtbeginn der Alkoholgehalt in der Atemluft des Fahrers bestimmen werden. Ist dieser zu

¹ Charge Coupled Devices sind lichtempfindliche elektronische Bauelemente, die auf den inneren Photoeffekt beruhen.

² Das elektronische Stabilitätsprogramm verhindert durch gezieltes automatisches Bremsen einzelner Räder sowohl das Übersteuern als auch das Untersteuern eines Fahrzeugs.

hoch, kann das Auto nicht gestartet werden. Diese Diagnosegeräte sind Mikrosysteme, welche dem täglichen Leben Sicherheit verschaffen und zur Vermeidung von Gefahren eingesetzt werden können.



a)

b)

Jahr	Unfälle	Getötete	Schwer- verletzte	Leicht- verletzte
2000	27.375	1.022	11.325	24.417
2001	25.690	909	10.365	23.152
2002	25.333	932	9.953	22.977
2003	24.245	817	9.343	21.900
2004	22.548	704	8.555	20.262
2005	22.004	603	8.002	19.831
2006	20.685	599	7.564	18.733
2007	20.785	565	7.402	18.627
2008	19.660	523	7.023	17.630
2009	17.471	443	6.190	15.591

Abbildung 1.1: a) Verkehrsunfälle unter Alkoholeinfluss 2000-2009, b) Verkehrsunfälle unter Alkoholeinfluss mit Personenschaden 2000-2009 [Sta10]

Auch im Fachgebiet der Medizin dringt die Mikrosystemtechnik in immer speziellere Bereiche vor. Ein Beispiel ist die Überwachung des Anästhetikums bei Narkosepatienten. Durch eine fehlerhafte Dosierung des Narkosemittels auf den Patienten können Wachzustände während der Narkose auftreten. Die Häufigkeit einer bewussten Wachheit mit Erinnerung des Patienten an das Ereignis wird mit 0,2 - 2 %, einer bewussten Wachepisode mit anschließender Amnesie sogar mit 7 - 72 % angegeben. Die Wahrscheinlichkeit eines unbewussten Wachzustandes mit anschließender Erinnerung im Unterbewusstsein wird auf bis zu 80 % geschätzt. Die Tatsache, dass ein Patient während der Narkose eine solche Wachepisode erleben könnte, ist für ihn beunruhigend und belastend. Oft lösen derart bewusste oder unbewusste Erlebnisse ein Gefühl der Angst und Hilflosigkeit aus. Diese können zu Angstgefühlen vor einer erneuten Operation bis hin zu einem therapiebedürftigen posttraumatischen Stresssyndrom führen. [Bük02] Demzufolge ist eine genau auf den Patienten abgestimmte Zusammensetzung des Narkosemittels und eine stetige Überwachung des Anästhetikums während der Narkose von größter Notwendigkeit, um derartige Wachzustände zu vermeiden und die Angst vor diesen Wachzuständen zu verringern.

Dies sind zwei Beispiele, die zeigen, dass die Mikrosystemtechnik im Laufe der Zeit zum Bestandteil des Lebens geworden ist und auch weiterhin ein großes Entwicklungspotenzial besitzt. So wird zur Überwachung und Analyse von Luft und Gasen von der Fraunhofer ENAS gemeinsam mit dem Zentrum für Mikrotechnologien der TU Chemnitz und der Firma

InfraTec GmbH Dresden ein neuartiges Fabry-Perot-Filter entwickelt. Dieses Filter (Abbildung 1.2) ist in zwei bestimmten Wellenlängenbereichen durchstimmbar und wird in einem Infrarot-Detektor eingesetzt, der Gase und Gasgemische aufgrund ihrer Absorptionseigenschaften bei infraroter Strahlung detektiert.

Wenn die Filter-Detektor-Einheit Alkohol in der Atemluft des Fahrers feststellt, lässt sich das Auto nicht starten. Da das Filter permanent die Konzentration des Anästhetikums in der Atemluft misst, bekommt der Patient unter Narkose stets die auf ihm abgestimmte Menge des Narkosemittels. Der Infrarot-Detektor mit abstimmbarem Fabry-Perot-Filter wurde im Januar 2010 mit dem Prism Award ausgezeichnet. [Fra10]

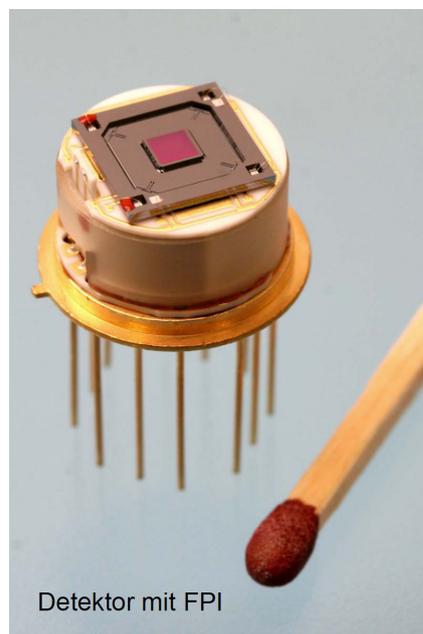


Abbildung 1.2: Detektor mit abstimmbarem Fabry-Perot-Filter zur Infrarot-Gasanalyse [Inf10]

Zielstellung dieser Diplomarbeit ist die Optimierung und Herstellung von Dualband-Fabry-Pérot-Filtern mit neuartigen Schichtmaterialien. In einem ersten Prozessdurchlauf (FPI4) konnte die prinzipielle Machbarkeit der Technologie nachgewiesen werden. Nun besteht die Aufgabe darin, eine Optimierung an Design und Technologie vorzunehmen, um noch vorhandene Schwachpunkte des alten Designs zu beseitigen. Dazu sollen in einem neuen Prozessdurchlauf (FPI5) FPI mit verbesserter Performance hergestellt werden, wobei zwei Varianten zur optischen Beschichtung zu realisieren sind. Darüber hinaus wird parallel zu Herstellung und Optimierung der FPI ebenso eine Optimierung der Bondfestigkeit durchgeführt, was in Vorversuchen bezüglich des SU8-Bondens resultiert.

1.2 Kapitelübersicht

Zu Beginn dieser Arbeit wird das Fabry-Pérot-Interferometer vorgestellt. In diesem Abschnitt soll die Funktionsweise und somit die Anwendung der spektralen Analyse von Gasen und Gasgemischen verdeutlicht werden. Kapitel 3 befasst sich mit dem alten Design, dem FPI4. Zuerst wird das FPI im Aufbau beschrieben, gefolgt von einer detaillierten Analyse der Schwachstellen und Optimierungspunkte des alten Designs. Inhalt von Kapitel 4 ist das Redesign vom FPI4 bis hin zum FPI5. Ausführlich werden im Zusammenhang dazu Möglichkeiten dargelegt, um die in Kapitel 3 beschriebenen Schwachstellen und Optimierungspunkte zu beseitigen. Ziel dabei ist es, ein FPI in zwei Varianten herzustellen, das in Zukunft eine erhöhte Performance und Ausbeute erlangen soll. In Kapitel 5 folgt ein allgemeiner Überblick über die prozesstechnische Realisierung des FPI mit den wichtigsten Schritten der Siliziumtechnologie. In diesem Zusammenhang werden insbesondere die Gemeinsamkeiten und Unterschiede zwischen den beiden unterschiedlichen FPI-Varianten herausgearbeitet. Eine ausführliche Charakterisierung der Muster während der Herstellung ist Gegenstand von Kapitel 6. Etwaige Fehlerquellen und Einflussfaktoren werden durch eine umfangreiche Betrachtung der Messergebnisse bestimmt. Kapitel 7 beschäftigt sich mit der Verbindungsbildung von Ober- und Unterteil des FPI-Chips. Dazu werden Vorversuche durchgeführt, die einen Überblick über den Einfluss der Parameter der Verbindungsbildung geben. Abschließend werden die Ergebnisse der Vorversuche auf die realen Chips angewendet.

2 Das Fabry-Pérot-Interferometer

Durchstimmbare optische Filter sind das Schlüsselkonzept für viele Anwendungen wie beispielsweise die Überwachung von verschiedensten industriellen Prozessen oder ökologischen Messungen zur Kontrolle der Wasserqualität. Die rasche Entwicklung der Mikrotechnologien in den vergangenen 20 Jahren hat die Entwicklung von abstimmbaren MEMS Filtern basierend auf die bekannte Fabry-Pérot-Interferometerstruktur zugelassen. Aufgrund der guten optischen Performance, des großen Abstimmbereiches und des potentiell geringen Kostenbedarfes bei großen Stückzahlen, werden auf MEMS basierte elektrostatisch abstimmbare optische Filter angestrebt. [Blo10]

Bereits vor über 100 Jahren, im Jahr 1897, veröffentlichten die französischen Physiker Alfred Pérot und Charles Fabry eine Reihe von Artikeln über das Funktionsprinzip des von ihnen entwickelten Interferometers, bei dem Licht zwischen zwei teilverspiegelten Oberflächen zur Vielstrahlinterferenz gelangt. Fabry und Pérot verwendeten dabei zunächst eine Glasplatte, deren äußere Seiten exakt parallel, eben poliert und mit einer dünnen Silberschicht zur Reflektionserhöhung beschichtet waren. Als mögliche Anwendung dachten Fabry und Pérot zunächst an neue, präzisere Eichmaße für absolute Längen- oder Frequenzmessungen. Schnell wurde jedoch auch die Bedeutung des Instruments für die Spektroskopie klar. Das neue Instrument war, trotz seiner Einfachheit, um ein Vielfaches sensitiver als das bis dato gebrauchte Michelson-Interferometer, da es nicht nur zwei, sondern unendlich viele Teilstrahlen zur Interferenz brachte. Bereits 60 Jahre zuvor gelang dem englischen Astronomen George Airy die Erklärung der ringförmigen Helligkeitsvariationen, die an dünnen Schichten beobachtet werden können. Diese Arbeit von Airy wurde von Fabry und Pérot als Grundlage verwendet. Neben der Vermessung der Interferenzringe gibt es jedoch auch eine weitere Möglichkeit mit einem FPI Spektroskopie zu betreiben: den sogenannten Scanmodus, bei dem die transmittierte Intensität als Funktion des Plattenabstandes gemessen wird. Allerdings sind die nötigen Abstandsänderungen derart gering, dass diese Methode erst mit der Verfügbarkeit von Piezoaktuatoren, etwa seit den 70er Jahren, zuverlässig funktioniert. Ein herausragender Aspekt des FPI im Scanmodus ist, dass das FPI so als durchstimmbares Filter direkt in den Strahlengang eingesetzt werden kann. Dies ermöglicht zweidimensionale Spektroskopie bei guter spektraler und viel höherer zeitlicher Auflösung sowie Lichtstärke. [Doe08]

Derzeit werden im Rahmen eines Verbundprojektes an der Technischen Universität Chemnitz die aktuellen FPI-Varianten als Dualbandfilter für den Wellenlängenbereich $4\ \mu\text{m}$ bis $4,7\ \mu\text{m}$ und $8\ \mu\text{m}$ bis $10,5\ \mu\text{m}$ entwickelt, welche in Kombination mit einem pyroelektrischen Detektor in Infrarot-Gasanalyse-Systemen der Firma InfraTec GmbH zum Einsatz kommen. Der schematische Aufbau dieses Gasanalyse-Systems ist in Abbildung 2.1 dargestellt.

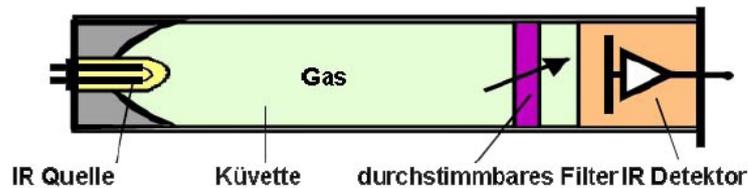


Abbildung 2.1: Schematischer Aufbau des Gasanalyse-Systems [Inf10]

Dabei wird eine Infrarotstrahlung von einer IR-Quelle emittiert und durchläuft eine Kuvette mit dem zu analysierenden Gasmischung. Das FPI ermöglicht im Verbund mit dem Detektor die spektrale Analyse der Reststrahlung. Dabei wird der in das FPI einfallende Lichtstrahl im Inneren zwischen den Spiegeln mehrfach reflektiert und erzeugt auf der Austrittsseite ein Interferenzmuster (vgl. Abbildung 2.2).

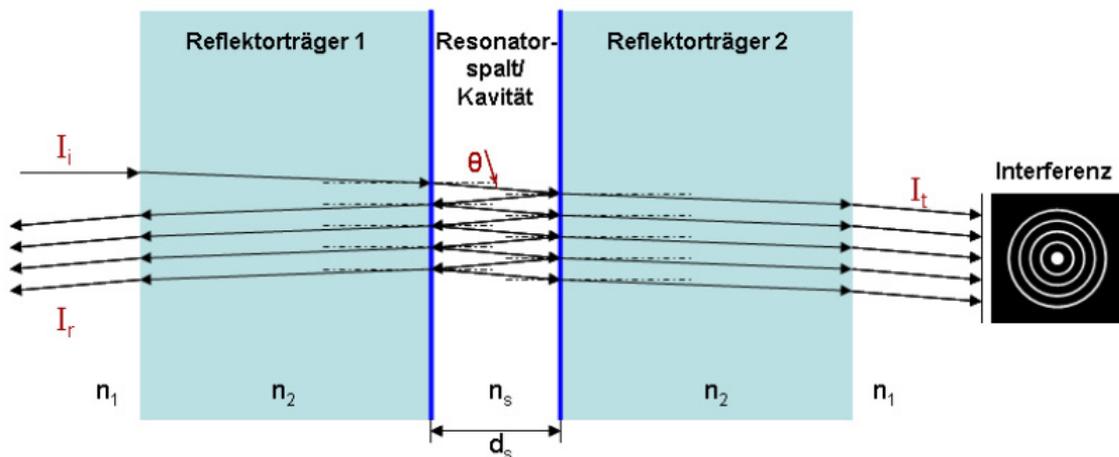


Abbildung 2.2: Erzeugung der Vielstrahlinterferenz [Gri07]

Entsprechend der Ordnung des jeweiligen Interferenzstreifens erhält man einen Transmissionspeak in Abhängigkeit vom Plattenabstand. Die anderen Ordnungen werden durch einen dem FPI vorgeschalteten Breitbandpass ausgeblendet (vgl. Abbildung 2.3). In Abhängigkeit vom Spiegelplattenabstand findet nur für eine Wellenlänge eine konstruktive Interferenz und Transmission durch das FPI statt. Der dem FPI nachgeschaltete Detektor erfasst und analysiert das austretende transmittierte Licht. Dabei nutzt der Detektor die Eigenschaft

der Gase, bei genau definierten Wellenlängen charakteristische Absorptionsbanden zu besitzen, was folglich auf die Zusammensetzung der Gase schließen lässt. Dementsprechend kann durch eine sehr kleine Bewegung der Spiegelplatten zueinander ein Wellenlängenbereich von wenigen Zehntel Nanometern, der sogenannte freie Spektralbereich, untersucht werden. Demzufolge können auch kleinste Verschiebungen oder Verbreiterungen einzelner Spektrallinien gemessen werden, wodurch die Möglichkeit besteht, unterschiedlichste Gase zu detektieren.

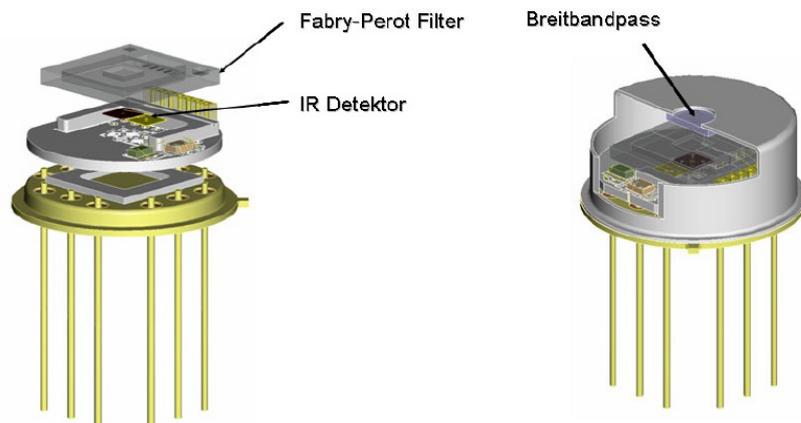


Abbildung 2.3: Detektoraufbau des Infrarot Gasanalyseystems [Inf10]

3 Das alte Design FPI4

Den Vorgänger des neuen und optimierten FPI5 stellt das FPI4 dar, welches in einem ersten Prozessdurchlauf die prinzipielle Machbarkeit der Silizium-Technologie nachgewiesen hat und in Abbildung 3.1 als 3D-Modell abgebildet ist. Dieser erste Prozessdurchlauf konnte erfolgreich mit dem Bonden und Vereinzeln der letzten zwei Verbunde beendet werden. Nun besteht die Aufgabe darin, vorhandene Schwachpunkte des alten Designs zu erfassen und eine Optimierung an Design und Technologie vorzunehmen.

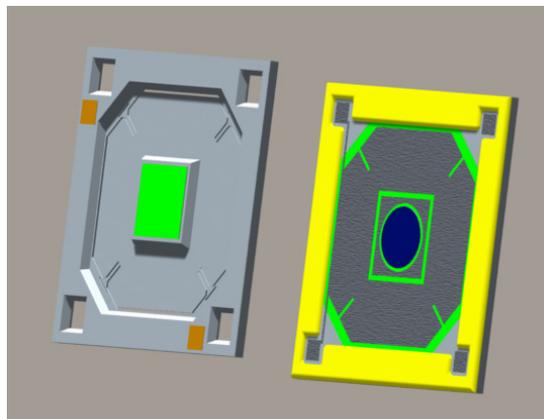


Abbildung 3.1: 3D-CAD-Modell des FPI4

3.1 FPI4

Das FPI4 besteht ebenso wie sein Nachfolger, das FPI5, aus zwei Reflektorträgern. Der obere Reflektorträger ist durch vier diagonal angeordnete Federn beweglich gelagert, der untere ist der feststehende Reflektorträger. Der Verbund bei dieser Variante wird durch adhäsives Bonden mit dem Negativfotoresist SU8 realisiert. Der schematische Aufbau ist in Abbildung 3.2 dargestellt. Zu erkennen sind jeweils Ober- und Unterteil und das Bondmedium SU8 zwischen beiden. Auf den jeweiligen Außenseiten der beiden Reflektorträger ist der ARC-Schichtstapel zu erkennen, welcher notwendig ist, damit nur ein geringer Teil der Strahlung reflektiert wird. Ohne diese Antireflexionsbeschichtung würden bereits 30 % der eintreffenden Strahlung reflektiert werden. [Gri07] Auf der jeweiligen Innenseite der Reflektorträger liegen die BRAGG-Stapel, welche die Vielfachreflexion der eintreffenden Strahlung realisieren. Bestimmend bei der Herstellung der FPI4 ist die Einhaltung der Abstände für den optischen Spalt und den elektrostatischen Spalt. Da bei den FPI4 Ätzungen zur Erzeugung der Spalte nur in das Unterteil vorgenommen werden, sind zwei unterschiedlich tiefe Gruben zu

ätzen, um die entsprechend differenzierten Spaltmaße zu ermöglichen. Dies spiegelt sich in einem zweistufigen Ätzprozess wider, bei dem zuerst das optische Gebiet mit der entsprechenden Tiefe vorgeätzt wird, um dann im zweiten Ätzschritt mit der elektrostatischen Grube weitergeätzt zu werden. Die Einstellung des optischen Spaltes erfolgt bei den FPI4 elektrostatisch. Wird zwischen der isolierten Elektrode auf dem Unterteil und dem Substrat des beweglichen Oberteils eine Steuerspannung angelegt, kann der obere Reflektorträger ausgelekt und der optische Spalt eingestellt werden.

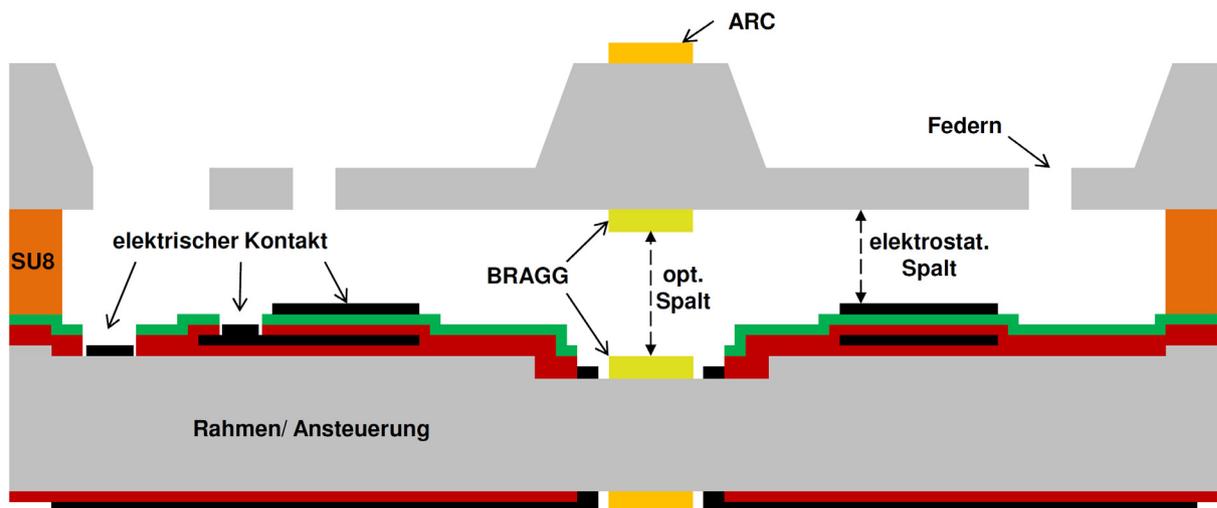


Abbildung 3.2: Schematischer Aufbau FPI4

Nachteilig bei dieser Variante mit nur einem beweglichen Reflektorträger ist der Einfluss des Gravitationsfeldes, welches zu einer Schrägstellung des oberen Reflektorträgers und damit zur Verkippung beider Reflektorträger zueinander führen kann. Solch eine Verkippung wirkt sich dementsprechend negativ auf die einwandfreie Funktionsweise des FPI aus. Aus diesem Grund ist die FPI-Variante mit einem beweglichen Reflektorträger mit relativ dicken Federn versehen (vgl. Abbildung 3.3) um die Steifigkeit ebendieser zu erhöhen. Allerdings schlägt sich dies auch in einer erhöhten Steuerspannung nieder.

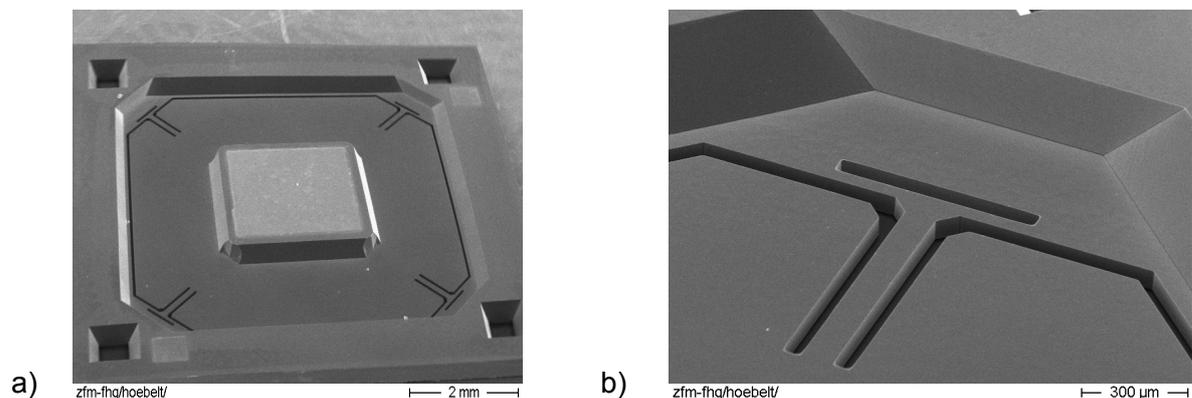


Abbildung 3.3: a) Vereinzelter FPI4-Chip, b) Detailansicht einer Feder eines FPI4-Chips

3.2 Optimierungspunkte und Schwachstellen

Bei der Fertigung der FPI4 sind Schwachstellen aufgetreten, welche die Performance und schließlich auch die Ausbeute verringert haben. Durch ein Redesign können nun ebendiese Schwachstellen beseitigt und Neuerungen eingefügt werden, welche die Performance der FPI erhöhen sollen.

Das Hauptaugenmerk liegt dabei auf der Beseitigung des Sticking der FPI. Beim Sticking kleben Ober- und Unterteil zusammen und lösen sich nur schwer bzw. nicht wieder voneinander. Dies kann zum Einen durch eine zu hohe Anregungsspannung induziert werden, welche im Pull-in³ resultiert. Zum Anderen konnte dieser Effekt aber auch bei Chips beobachtet werden, die gerade vereinzelt, also noch nicht elektrostatisch angeregt worden sind. In Abbildung 3.4 ist ein Chip dargestellt, der nach dem Sticking aufgebrochen worden ist. Es ist zu erkennen, dass eine Kollision zwischen den optischen Flächen erfolgte, was zur Verbindungsbildung führte. Da das Sticking ein Hauptproblem ist, welches die Ausbeute der Chips drastisch reduziert, muss eine geeignete Lösung für dieses Phänomen gefunden werden.

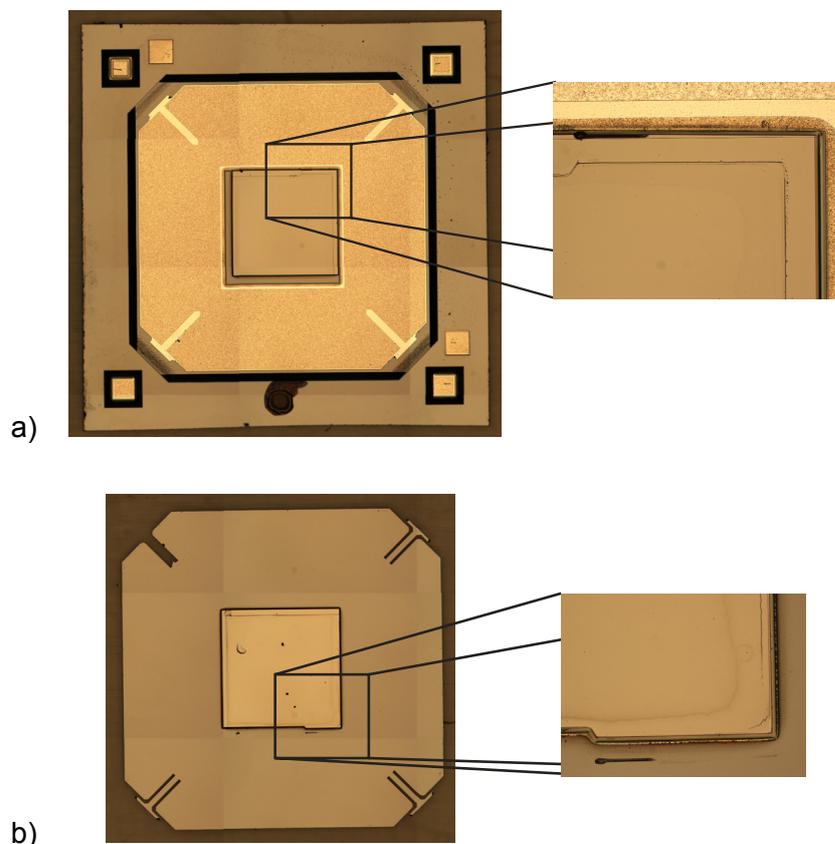


Abbildung 3.4: Aufgebrochener stickender Chip **a)** Unterteil-Vorderseite mit BRAGG-Reflektor und **b)** Oberteil-Rückseite mit BRAGG-Reflektor

³ elektrostatische Kraft > mechanische Rückstellkraft

Eine weitere Herausforderung stellt die bis dato benutzte Klebefolie beim Sägen dar. Diese Folie dient zum Abdichten der Chips und soll verhindern, dass Sägewasser sowie Sägeschlamm oder andere Partikel während des Sägevorganges in den Chip eindringen können. Bisher wurde eine thermische Folie benutzt, welche sich nach dem Sägen problemlos mittels Hitze einwirkung vom Chip ablösen ließ. Nachteilig war, dass diese Folie zum Einen vermehrt Klebereste in den Kontaktlöchern bzw. auf den Kontaktpads hinterließ. Zum Anderen dichtete die Folie nur unzureichend ab, sodass zahlreiche Chips mit Sägewasser und -schlamm vollliefen oder die Kontaktlöcher und -pads der Chips Verschmutzungen aufwiesen (vgl. Abbildung 3.5).

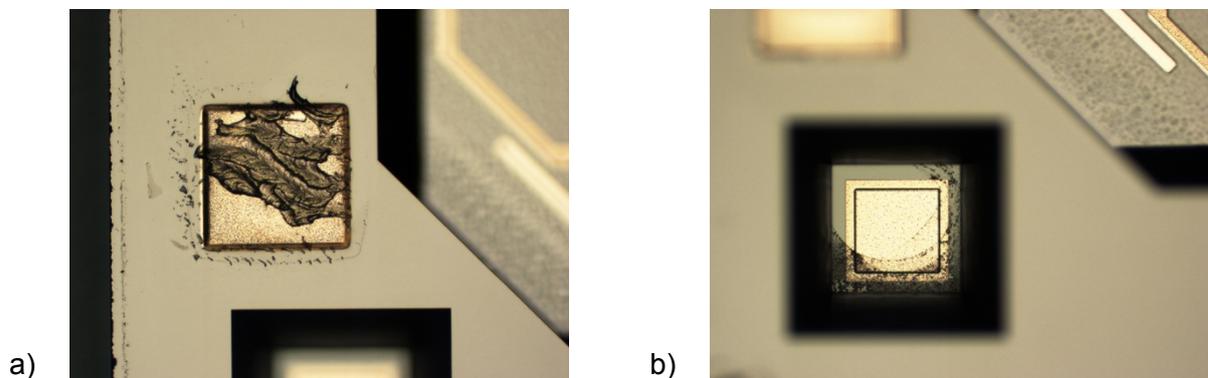


Abbildung 3.5: Durch thermische Abdichtfolie verschmutztes a) Kontaktpad und b) Kontaktloch

Eine andere Schwachstelle stellen der Schirm und die Elektrode dar. Es konnte bei zahlreichen Chips ein Kurzschluss zwischen Elektrode und Schirm festgestellt werden, welcher auf zwei grundlegende Sachverhalte zurückzuführen war. Erstens weist das Material des Schirmes eine hohe Rauigkeit auf und erzeugt teilweise kleine Spitzen, die den Isolator zwischen Elektrode und Schirm „durchstechen“. Zweitens ist der Isolator zwischen Elektrode und Schirm etwas zu dünn bemessen worden.

Ein weiterer optimierungsbedürftiger Punkt ist die Bondfestigkeit im Hinblick auf das adhäsive Bonden mit SU8. Beispielsweise lösten sich gebondete Verbunde nach dem Sägen, die nach dem Bonden als nahezu perfekte Bondung charakterisiert werden konnten. Daher wird geprüft, bei welchen Bondparametern das beste Bondresultat zu erwarten ist, um bekannte Fehler zu vermeiden. Neben der angestrebten Optimierung werden im Bereich der Messtechnik einige Neuerungen anvisiert. Beispielsweise soll eine Bezeichnung der Chips eingefügt werden, die das Vertauschen von Chips untereinander verhindert und eine schnellere und eindeutigere Zuordnung ermöglicht. Weiterhin wird eine neue, geteilte Elektrode erprobt, die eine kapazitive Detektion der Steuerspannung und des Elektrodenabstandes während gleichzeitiger elektrostatischer Anregung gewährleisten soll.

4 Das neue Design FPI5

Das Redesign wird für das FPI4 einerseits durchgeführt, um die Schwachstellen, die während der Herstellung der Chips auftraten, zu vermeiden und andererseits, um eine Optimierung durchzuführen, welche die Performance und die Ausbeute erhöht. Mit der Präparation der neuen FPI5 wird eine Optimierung am eigentlichen Chip und in der Technologie angestrebt. Die Präparation wird in zwei Varianten gegliedert, so dass je Variante unterschiedliche Ansätze zur Optimierung getestet werden können. Das Hauptunterscheidungsmerkmal beider Varianten ist das genutzte Bondverfahren. Variante-SU8 wird adhäsiv mittels des Negativfotoresists SU8 gebondet, wohingegen die Variante-SFB (Silicon Fusion Bond) direkt im unteren Temperaturregime⁴ gebondet wird. Des Weiteren werden pro Variante zwei unterschiedliche optische Designs der BRAGG-Reflektoren realisiert, das optische Design V2f und V5g. Das optische Design V2f wurde bereits in der beendeten Präparation der FPI4 getestet. Das optische Design V5g wird in der Präparation des FPI5 erstmals erprobt. Die optischen Designs V2f und V5g unterscheiden sich hinsichtlich der Zusammensetzung der BRAGG-Stapel und durch den Abstand zwischen den Reflektoren, somit muss je Variante ein anderer Gesamtabstand realisiert werden. Die Schichtstapel bestehen dabei aus Germanium (Ge), Ytterbiumfluorid (YbF₃), Zinksulfit (ZnS) und Magnesiumoxid (MgO). Die Abmessungen und die Schichtabfolge der dielektrischen Schichten sind in Tabelle 4.1 verdeutlicht.

Tabelle 4.1: Vergleich der optischen Designs V2f und V5g

	V2f	V5g
Stapeldicke in μm	3,51	3,64
optischer Spalt in μm	5,44	5,37
Gesamtabstand in μm	12,46	12,64
Stellweg 8-10,5 μm in μm	1,80	1,86
Schichtdesign	Ge – YbF ₃ – Ge – ZnS – Ge	Ge – YbF ₃ – Ge – YbF ₃ – ZnS – Ge

⁴ In Vorversuchen [Ros09] konnte bei den optischen Schichten eine Temperaturbeständigkeit bis maximal 380 °C bestätigt werden. Das Direktbonden liegt an der Grenze des Machbaren für die optischen Schichten, weswegen das Direktbonden im unteren Temperaturregime bei den FPI eingesetzt wird.

4.1 Verhindern von Sticking

Das bei den zuletzt gefertigten Chips auftretende Sticking wurde vermehrt beobachtet. Hier zeigt sich ein großer Optimierungsbedarf. Generell wurde davon ausgegangen, dass es erst während des Betriebes des FPI zum Sticking kommen kann, in dem eine zu hohe Steuerungsspannung gewählt wird und der Pull-in eintritt. Im Gegensatz dazu trat das Sticking jedoch bereits vor dem eigentlichen Vermessen der fertig präparierten FPI auf. Grund dafür können zwei Schritte in der Herstellung sein: das Bonden der beiden Wafer und das Vereinzeln des gebondeten Verbundes zu Chips. Beim Bonden werden Ober- und Unterteil gepaart und durch eine mit Druck beaufschlagte Membran zusammengedrückt. Bei der alten FPI4-Variante bestand bei diesem Schritt die Möglichkeit des Durchdrückens im Bereich der ARC-Stapel, da diese die „Nulllinie“ der beiden Wafer überragen, was in der Kollision von Ober- und Unterteil im Bereich der BRAGG-Reflektoren resultiert. Weiterhin kann es dazu führen, dass der Chip unter Spannung gebondet wird, da das Unterteil nicht beweglich gelagert ist. Untersuchungen haben aber gezeigt, dass das Sticking noch nicht nach dem Bonden festgestellt werden konnte. Die oberen Reflektorträger der Chips waren beweglich und wiesen somit kein Sticking auf. Ebenfalls liegt der optische Abstand rechnerisch mit ca. 5 μm über den Dicken beider ARC-Reflektoren, welche zusammen ca. 4 μm ausmachen. Dennoch sind strukturierte Auflagenwafer aus Glas gefertigt worden, die im Bereich des ARC-Stapels Gruben aufweisen, um trotz allem das Durchbiegen der beiden Reflektorträger zu verhindern. Demzufolge muss angenommen werden, dass das Sticking nicht durch das Bonden verursacht, sondern durch den Sägeprozess herbei geführt wird.

Beim Sägen wird der komplette Verbund mit der Unterseite auf Bluetape geklebt und mit einer zweiten Folie von der Oberseite her abgedichtet. Die obere Abdichtfolie wird dazu per Hand unter Druckeinwirkung mit einer Rolle fest an den Verbund gedrückt. Dies kann als potenzieller Auslöser für das Sticking wirken. Durch den hohen und nicht über den kompletten Verbund homogenen Druckeinfluss kann es dazu kommen, dass das Oberteil derart stark ausgelenkt wird, dass es am Unterteil anschlägt und festklebt. Da der optische Abstand zwischen den beiden BRAGG-Stapeln von oberem und unterem Reflektorträger mit ca. 5 μm der kleinste Abstand ist, kommt es unwillkürlich an diesen beiden Flächen zur Kollision der Reflektorträger. Der elektrostatische Abstand zwischen Elektrode und oberem Reflektorträger beträgt ca. 7 μm . Nach dem Aufbringen der Folien wird der Verbund einen Tag stehen gelassen, damit die Klebefolie ihre komplette Klebekraft entwickeln kann, die für das Sägen benötigt wird. Untersuchungen nach dem Sägen haben gezeigt, dass hier das Sticking der Chips auftrat. Dies ist zum einen deutlich an der Auslenkung des oberen Reflektorträgers

nach dem Vereinzeln in der Aufnahme am Weißlichtinterferometer⁵ in Abbildung 4.1 a) zu erkennen. Zum anderen kann das Zusammenkleben auch an den Interferenzringen in der Aufnahme im IR-Durchlicht in Abbildung 4.1 b) erfasst werden.

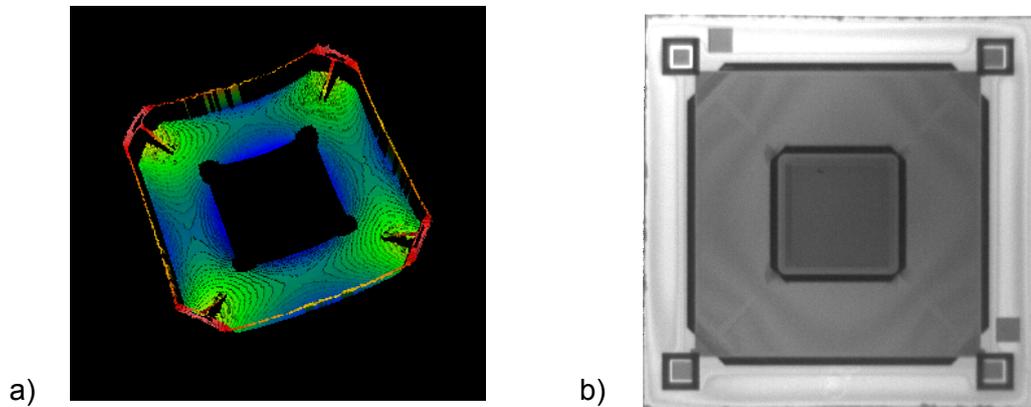
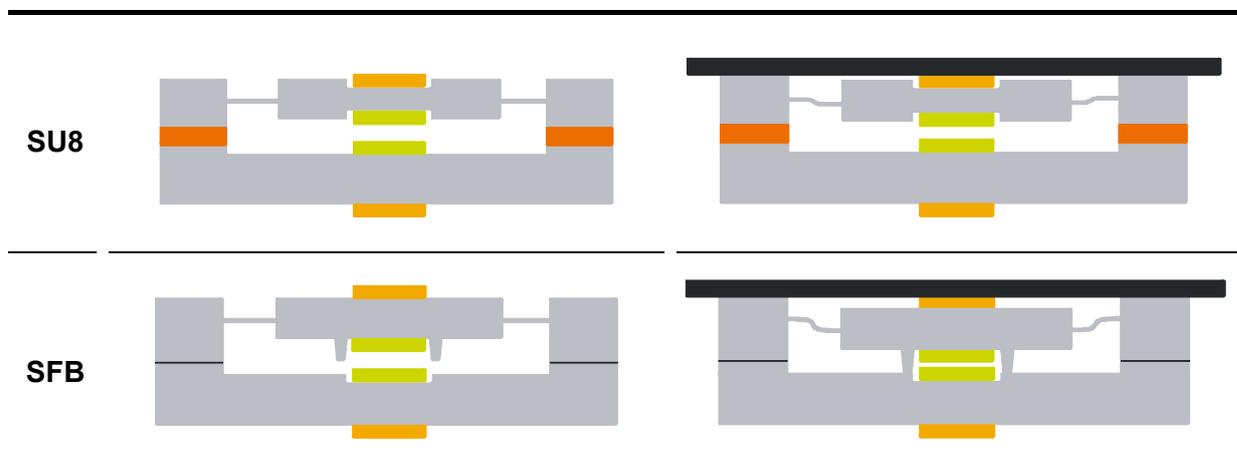


Abbildung 4.1: a) WLI-Aufnahme und b) IR-Aufnahme eines nicht elektrostatisch angeregten, aber stickenden Chips mit ausgelenkten und festklebenden Oberteil nach dem Vereinzeln

Als Lösungsansatz ist für jede Variante eine unterschiedliche Herangehensweise gewählt worden, welche in Tabelle 4.2 schematisch dargestellt ist. So sind bei der SU8-Variante die optischen Stapel auf dem Oberteil teilweise in das Oberteil vergraben worden, sodass diese nicht mehr komplett herausstehen. Bei der Direktbond-Variante wurden auf der Unterseite des Oberteils Abstandshalter realisiert, welche das Aufschlagen des oberen Reflektorträgers auf dem unteren Reflektorträger verhindern sollen. Bei den Abstandshaltern handelt es sich um vier $40\ \mu\text{m} \times 40\ \mu\text{m}$ symmetrisch um den BRAGG-Stapel angeordnete Pyramidenstümpfe, die beim Aufschlagen den Isolatorstapel berühren und somit das Ankleben der optischen Stapel verhindern sollen.

Tabelle 4.2: Lösungsansätze zur Vermeidung von Sticking



⁵ Zygo NewView6000

4.2 Isolator zwischen Schirm und Elektrode

Um das Problem der Kurzschlüsse zwischen Schirm und Elektrode zu lösen, ergaben sich zwei verschiedene Ansätze. Der erste Ansatz sieht die Verwendung einer alternativen Abscheideanlage für das Material des Schirms und der Elektrode vor. Mit der alternativen Anlage wird das Abscheiden einer glatteren Materialschicht angestrebt. Alternativ dazu wird der Isolatorstapel zwischen Schirm und Elektrode von 1,1 μm auf insgesamt 1,2 μm erhöht.

4.3 Abdichtfolie für den Sägeprozess

Ein weiterer optimierungsbedürftiger Punkt betrifft den Sägeprozess. Die Abdichtung der thermisch ablösbaren Folie bei dem Sägeprozess war nicht ausreichend, da stets Chips mit Sägewasser vollliefen. Lösung ist hier die Verwendung einer neuen UV-Folie, die besser abdichtet und somit eine höhere Ausbeute erzielt als die thermisch ablösbare Folie. Des Weiteren kann das Verkleben der Kontaktlöcher- und pads mit der neuen UV-Folie umgangen werden, da diese keinerlei Rückstände in den Kontaktlöchern und auf den Kontaktpads hinterlässt. Als kompliziert erwies sich allerdings das Ablösen der neuen UV-Folie von der ARC-Beschichtung des Oberteils. Die UV-Folie hat selbst nach der UV-Belichtung noch eine sehr hohe Restklebekraft auf der ARC-Schicht, was zum Herausreißen von einigen Chips während der Ablöseprozedur führt. Abhilfe ermöglicht die Verwendung einer strukturierten Zwischenschicht. So wird die UV-Folie mit einem Tangentialplotter⁶ derart strukturiert, dass diese in den Bereichen der ARC-Beschichtung Öffnungen aufweist. Die Dicke der Zwischenfolie beträgt dabei ca. 200 μm . Als Abdichtfolie stehen Bluetape und eine weitere Lage der UV-Folie zur Auswahl (vgl. Abbildung 4.2).

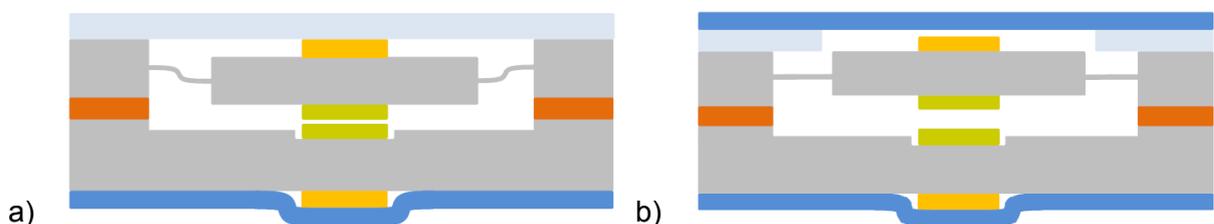


Abbildung 4.2: a) Festkleben der Abdichtfolie am ARC und b) Verhindern des Festklebens der Abdichtfolie am ARC durch den Einsatz einer strukturierten Zwischenschicht

⁶ Tangentialplotter S75 T Series

4.4 Chipbezeichnung

Eine der beiden Neuerungen ist die Chipbezeichnung. So findet während des *KOH*-Ätzprozesses der Bondmarken auf der Vorderseite aller Oberteile eine gleichzeitige Ätzung von Buchstaben und Zahlen statt. Folglich erhält jeder Chip die für ihn zugeteilte Bezeichnung, was eine eindeutige Zuordnung der Chips ermöglicht. Die Größe der Bezeichnung beträgt $200\ \mu\text{m} \times 100\ \mu\text{m}$ und ist, wie in Abbildung 4.3 zu erkennen, auf dem oberen Rahmenbereich links neben dem Kontaktpad realisiert.

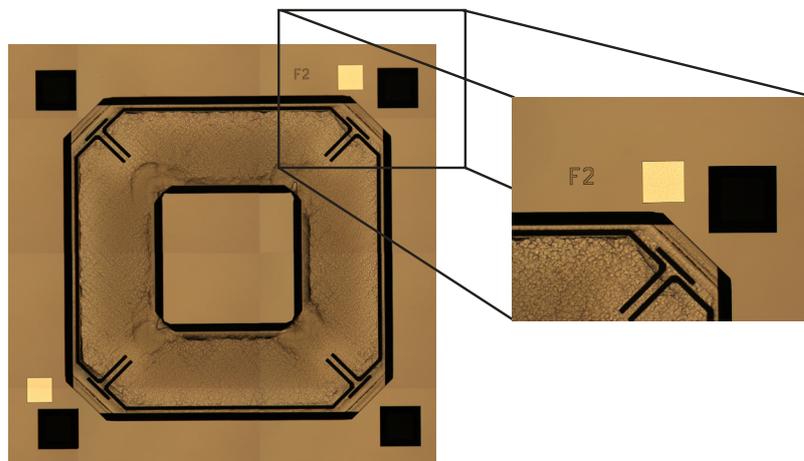


Abbildung 4.3: Chipbezeichnung auf dem Oberteil

4.5 Elektrodenform

Eine Umwandlung der normalen vollflächigen Elektrodenform (vgl. Abbildung 4.4 a)) in eine geteilte Elektrodenform ist von Seiten der Messtechnik her angestrebt worden. Mit Hilfe der geteilten Elektrode kann während der elektrostatischen Anregung gleichzeitig die Auslenkung kapazitiv gemessen werden. Dabei ist auf das Flächenverhältnis von $2/3$ innenliegend zum Anregen und $1/3$ außenliegend zum Messen eingegangen worden (vgl. Abbildung 4.4 b)). Die Anregungsfläche liegt innen, damit sich aufgrund der weit außen liegenden Elektrodenflächen nicht ein zusätzliches Moment aufbauen kann. Eine mögliche Schiefstellung des Reflektorträgers würde dieses Moment verstärken. Um die maximale Steuer-spannung zu erreichen, können beide Elektrodenteile zusammengeschlossen werden. Zwischen den beiden Elektrodenflächen befinden sich ein Isolator und ein Schirm.

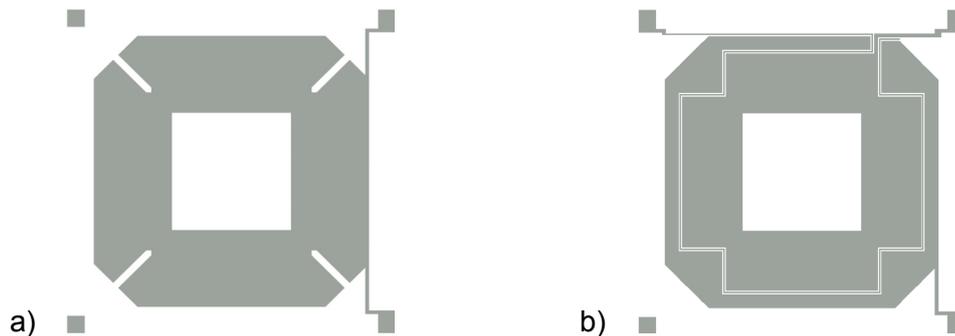


Abbildung 4.4: a) normale Elektrode und b) neue geteilte Elektrode

Damit jedoch der Reflektorträger auch bei 2/3 der Elektrodenfläche komplett ausgelenkt werden kann, muss das elektromechanische Design überarbeitet werden. Dies resultiert in einer zweiten Federform die als „supersoft“ charakterisiert wird. In Tabelle 4.3 ist in a) die normale Feder und in b) die neue supersofte Feder dargestellt. Die normale Feder ist durch eine Breite von $49,5\ \mu\text{m}$, eine Länge von $725,5\ \mu\text{m}$ und eine eckigen Federform gekennzeichnet. Dies resultiert bei einer Zieldicke von $75\ \mu\text{m}$ in einer Federsteifigkeit von ca. $12\ \text{kN/m}$ und benötigt eine Steuerspannung von $80\ \text{V}$, um den Reflektorträger komplett auszulenken. Die neue supersofte Feder ist dagegen mit $900\ \mu\text{m}$ länger und mit $50\ \mu\text{m}$ auch etwas breiter als ihr Vorgänger. Dies schlägt sich bei der Zieldicke von $60\ \mu\text{m}$ in einer Federsteifigkeit von $4,4\ \text{kN/m}$ nieder. Demzufolge kann die Auslenkung des Reflektorträgers unter Benutzung der geteilten Elektrode mit einer Steuerspannung von $62\ \text{V}$ realisiert werden.

Tabelle 4.3: Vergleich a) der normalen Feder gegenüber b) der supersoften Feder

	normale Feder	supersofte Feder
Federsteg in μm	725,5	900
Federbreite in μm	49,5	50
Federform	eckig	rund
Zieldicke in μm	75	60
Steifigkeit in kN/m	ca. 12	ca. 4,4
Elektrodenform	ungeteilt	geteilt – 2/3 der Fläche
Steuerspannung in V	80	62

4.6 Zusammenfassung des Redesigns

Die aus dem Redesign resultierenden Änderungen und die Umsetzung in das FPI ergeben zwei Hauptversuchsvarianten, die Variante-SFB und -SU8 (vgl. Tabelle 4.4). Bei Variante-SFB wird die Neuerung des Bondverfahrens geprüft und damit die Auslegung der gesamten Geometrie nach dem Verfahren des Direktbondens im unteren Temperaturregime einschließlich der Abstandshalter durchgeführt. Wird das Oberteil derart stark ausgelenkt, dass die Möglichkeit einer Kollision zwischen den optischen Schichten auf Ober- und Unterteil besteht, berühren die Abstandshalter des Oberteils den Isolatorstapel des Unterteils. Die Abstandshalter haben eine Fläche von $40\ \mu\text{m} \times 40\ \mu\text{m}$ und werden zusammen mit der Grubenätzung in das Oberteil geätzt. Da stets von Justageversatz ausgegangen werden muss, beträgt die Isolatorfläche, auf welcher die Abstandshalter aufschlagen können, $320\ \mu\text{m} \times 320\ \mu\text{m}$. Um keine neuen Schwachstellen in diese Technologievariante einzubauen, fließen die Neuerungen von Feder und Elektrode nicht mit in diese Variante ein. Infolge von Verschmutzungen oder Partikeln können beim Direktbonden enorme Bonddefekte auftreten. Aus diesem Grund müssen die Masken teilweise geändert werden, so dass der Bondrahmen immer frei von Maskenrückständen oder anderen Schichtablagerungen bleibt. Um die notwendige partikelfreie Bondfläche zu gewährleisten, wird der Wafer vor dem Bonden einem speziellen Reinigungsschritt, dem Buffing, unterzogen. Um diesen speziellen Reinigungsschritt zu ermöglichen, muss die gesamte Geometrie verteilt angepasst werden, damit keine Elemente die „Nulllinie“ der Bondfläche überragen.

Die SU8-Variante konnte bereits in früheren Prozessdurchläufen etabliert werden, daher werden in dieser Variante die Änderungen der weichen Federn und der geteilten Elektrode eingesetzt. Die geometrische Auslegung der beiden optischen Designs unterscheidet sich in den Unterteilen nicht. Die Oberteile der beiden Varianten unterscheiden sich in den Ätzungen der Federdicken und der Gruben zum Vergraben der optischen Stapel, um die zwei unterschiedlichen Spaltabstände zu ermöglichen. Variante-SU8 wird abermals entsprechend des optischen Designs in zwei Gruppen aufgeteilt. Demzufolge stellt letztendlich Variante-SU8-V2f die Sicherheitsvariante dar, in die lediglich das Vergraben der optischen Schichten im Oberteil und der dickere Isolatorstapel einfließen. In Variante-SU8-V5g werden zusätzlich die neue weichere Feder und die neue geteilte Elektrode getestet.

Tabelle 4.4: Vergleich der Variante-SFB mit der Variante-SU8

	Variante-SFB-V2f	Variante-SFB-V5g	Variante-SU8-V2f	Variante-SU8-V5g
Verhindern von Sticking	Abstandshalter	Abstandshalter	Vergraben der opt. Schichten	Vergraben der opt. Schichten
Federdicke	75 µm	75 µm	60 µm	60 µm
Federdesign	alt	alt	alt	neu
Elektrode	voll	voll	voll	geteilt

5 Prozesstechnische Realisierung

Das aktuelle FPI besteht aus zwei Siliziumwafern, welche in unterschiedlichen Varianten hergestellt werden. Die Variante-SU8 wurde für das adhäsive Bonden, Variante-SFB für das direkte Bonden ausgelegt. Weiterhin kommen jeweils zwei unterschiedliche optische Designs zum Einsatz, wodurch die Variantenzahl auf vier unterschiedliche Varianten steigt. Um die Zahl der Variantenvielfalt dennoch zu reduzieren, werden beispielsweise alle Oberteile der Direktbond-FPI gleich tief geätzt. Die Grundlage der FPI bildet der Wafer, der durch verschiedenste Prozessschritte mit Dünnschichtmaterialien prozessiert wird. Prozessschritte wie Oxidation, Lithografie, Abscheidung, Strukturierung und Bonden stellen die wichtigsten Etappen in der Fertigung der FPI dar. Die Beschichtung der optischen Gebiete erfolgt für alle Wafer bei der Firma JENOPTIK Laser, Optik, Systeme GmbH in Jena.

5.1 FPI5 – Direktbond

Die Prozessschritte für das Direktbonden konnten bereits bei früheren Durchläufen der FPI mit zwei beweglichen Reflektorträgern erprobt werden, stellen aber für die Direktbondvariante der FPI5 mit einem beweglichen Reflektorträger eine Neuerung dar. Die Änderungen in dieser Variante sind neben der komplett neuen Auslegung der Abstände und Ätztiefen weiterhin die Grubenätzung in das Oberteil und somit die Realisierung der Abstandshalter. In dieser Variante dienen niederohmige⁷ Wafer als Ausgangsmaterial, wodurch ein Dotierungsschritt entfällt. In das Unterteil werden zwei verschieden tiefe Gruben geätzt, um die zwei unterschiedlichen Spaltmaße zu erzeugen. Infolgedessen wird der elektrostatische Spalt in der SFB-Variante durch die Grubenätzung auf dem Unter- und dem Oberteil sowie dem elektrostatischen Stapel bestimmt. Der optische Spalt hingegen ist in der Grubenätzung im Oberteil und den beiden Grubenätzungen im Unterteil begründet. Bei der SFB-Variante besteht nicht wie bei der SU8-Variante die Möglichkeit, mit SU8 etwaige Abweichungen zu korrigieren. Daher bedarf bei der Direktbondvariante die Einhaltung der Abmessungen aller Ätzungen und Schichten größte Aufmerksamkeit, um die elektrostatischen und optischen Abstände zu gewährleisten. Weiterhin muss stets darauf geachtet werden, dass der Bondrahmen frei von Schichtresten oder sonstigen Ablagerungen bleibt. Schichtreste oder Partikel auf den Bondflächen können beim Direktbonden zu gravierenden Bondfehlern führen. Die schematische Darstellung der SU8-Variante ist in Abbildung 5.1 verdeutlicht.

⁷ 10 .. 50 Ω cm

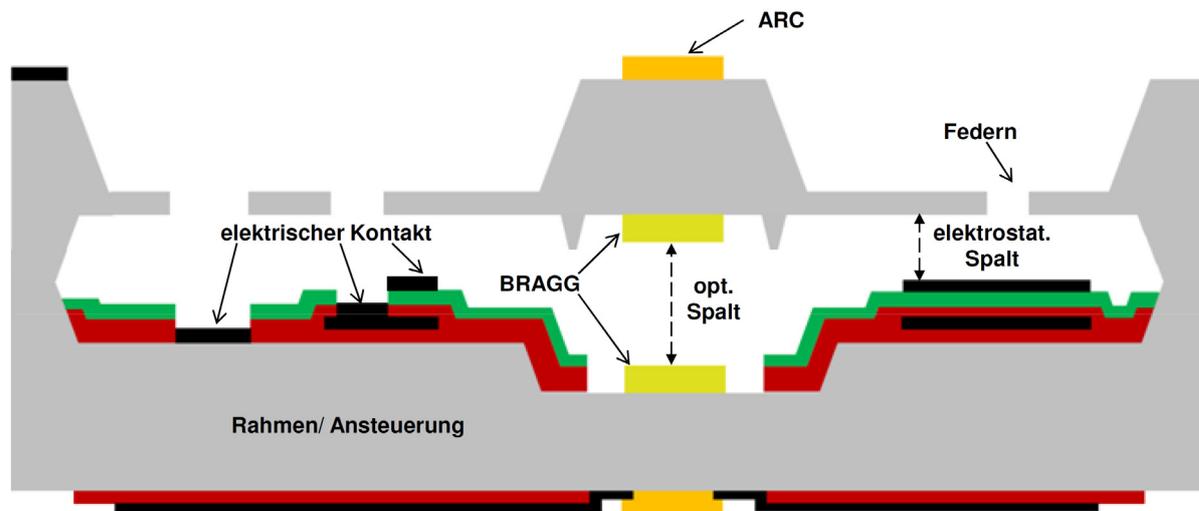


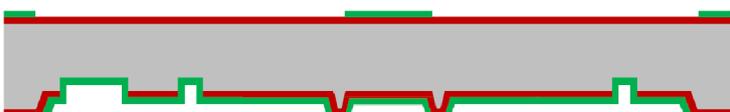
Abbildung 5.1: Schematische Darstellung FPI-SFB

5.1.1 Oberteil

Das Oberteil der FPIs beinhaltet jeweils den beweglichen Reflektorträger. Die prozesstechnische Realisierung der Direktbond-Variante ist in dem in Tabelle 5.1 dargestellten Ablauf verdeutlicht. Charakteristisch ist die Verwendung eines dreistufigen Ätzprozesses. Der erste Ätzschritt ist das Grubenätzen der Abstandshalter, gefolgt vom Trockenätzen der Federbreite von der Rückseite her. Danach wird der dritte Ätzschritt, das Nassätzen der Federdicke von der Vorderseite her vollzogen.

Der 4"-Wafer wird zu Beginn oxidiert und so mit einer 1 µm dicken Maskierungsschicht aus SiO_2 für die Ätzung der Grube und der vier Abstandshalter versehen. Daraufhin wird die Ätzung der Grube und der vier Abstandshalter mit einer Tiefe von 6,3 µm von der Rückseite her vollzogen. Die Grubenätzung erfolgt für beide optische Designs gleich tief, da die Einstellung der verschiedenen optischen Abstände durch die Grubenätzung im Unterteil realisiert wird. Danach werden alle Schichten entfernt, neues thermisches Oxid mit 1 µm Dicke erzeugt und derart strukturiert, dass es als Maske für die folgende Trockenätzung der Federn von der Rückseite her genutzt werden kann. Als nächstes werden die soeben geätzten Federn sowie die gesamte Rück- und Vorderseite mit der Passivierungsschicht Si_3N_4 versehen. Von der Vorderseite her wird die Si_3N_4 Maske strukturiert und das Silizium kann mittels KOH -Lösung bis zur Rückseitenpassivierung geätzt werden. Das Entfernen aller Maskierungsschichten und das selektive Abscheiden von Aluminium auf den Kontaktierungsflächen bilden die letzten Präparationsschritte der Oberteile.

Tabelle 5.1: Prozesstechnische Realisierung der SFB-Oberteile

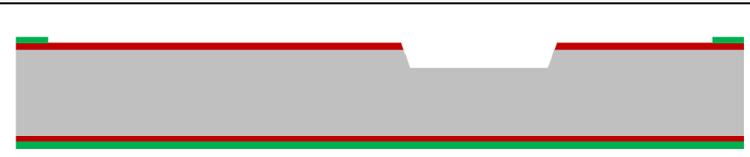
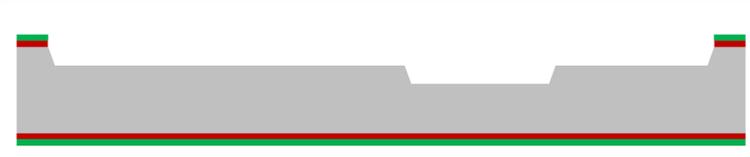
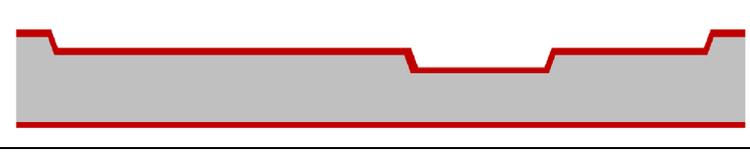
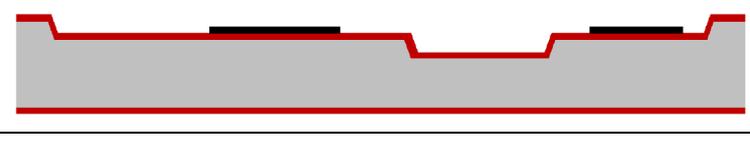
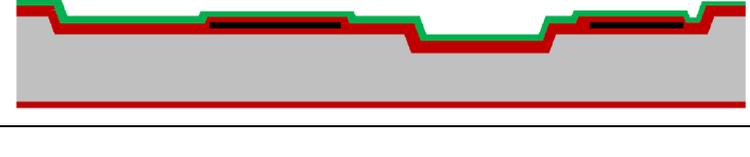
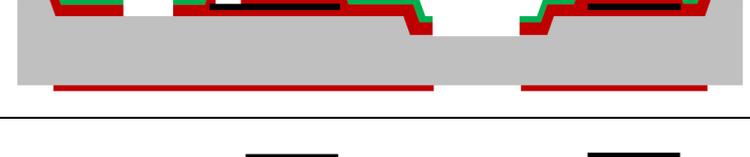
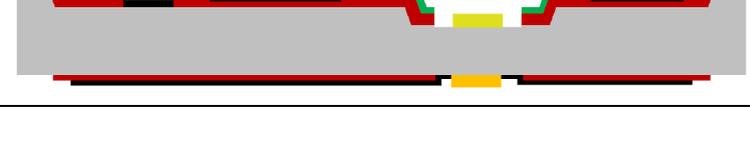
	4"-Wafer blank
	Oxidation: SiO_2 als Maskierungsschicht
	Strukturieren der Maskierungsschicht mit der Maske für die Ätzung der Grube und der Abstandshalter
	<i>Si-KOH</i> -Ätzen
	Abätzen der Maskierungsschicht und Oxidation für neues thermischen Oxid
	Strukturieren der Maskierungsschicht mit der Federformmaske
	Trockenätzen der Federdicke
	Passivierung mittels Si_3N_4 und Strukturierung der Maskierungsschicht
	<i>Si-KOH</i> -Ätzen der Struktur → Einstellen der Federdicke
	Selektives Abscheiden von Aluminium im Kontaktgebiet; Abscheidung der optischen Schichten in Jena

5.1.2 Unterteil

Die Herstellung des Unterteils ist in Tabelle 5.2 veranschaulicht und ist deutlich aufwändiger, da hier unterschiedlichste dielektrische Dünnschichten sowie die Kontaktierung des Substrates, der Schirmelektrode und der Steuerelektrode realisiert werden müssen. Das Substrat des FPI-Unterteils ist ebenfalls ein 4"-Silizium-Wafer und in seinen Eigenschaften identisch mit dem des Oberteils. Die Herstellung des Unterteils wird mit der Oxidation zu $1\ \mu\text{m}\ \text{SiO}_2$ und der Abscheidung von Si_3N_4 mit 70 nm Dicke als Maskierungsschichten begonnen. Daraufhin wird die Nitridschicht mit der Maske der späteren Grubenätzung für den elektrostatischen Abstand strukturiert. Als nächster Schritt wird die Oxidmaske im Bereich des optischen Gebietes freigeätzt. Das Vorätzen des optischen Spaltes mit $1,12\ \mu\text{m}$ bei dem optischen Design V2f und $1,3\ \mu\text{m}$ bei dem optischen Design V5g bilden den nächsten Technologieschritt. Ist diese erste Ätzung erfolgt, wird die Oxidmaske auch im Bereich der Grube geöffnet und sowohl das optische Gebiet als auch die soeben geöffnete Grube $5,04\ \mu\text{m}$ tief *KOH* geätzt. Dadurch werden im optischen Gebiet bei der V2f-Variante insgesamt $6,16\ \mu\text{m}$ und bei der V5g-Variante $6,34\ \mu\text{m}$ geätzt. Anschließend werden alle Maskierungsschichten entfernt, neues thermisches Oxid mit $1,5\ \mu\text{m}$ erzeugt, der Wafer ganzflächig mit 200 nm Aluminium besputtert und der Schirm strukturiert. Es entsteht ein Aluminiumschirm, der unter einer $1\ \mu\text{m}$ dicken PE-Oxidschicht und einer 200 nm dicken PE-Nitridschicht vergraben wird. Als nächstes werden die Bereiche des optischen Gebietes auf Vorder- und Rückseite, sowie des Substratanschlusses von dem 200 nm dicken Nitrid und dem insgesamt $2,5\ \mu\text{m}$ dicken Oxid befreit, um auf das Silizium mittels Aluminium kontaktieren zu können. Ebenfalls wird im Bereich des Kontaktpads das Nitrid und Oxid abgeätzt, so dass eine Kontaktierung des Schirmes realisiert werden kann. Letztendlich wird $1\ \mu\text{m}$ Aluminium ganzflächig auf der Vorder- und $100\ \text{nm}$ Aluminium auf der Rückseite aufgesputtert und so strukturiert, dass die oben genannten Kontaktierungen, die Elektroden sowie eine Blende um das optische Gebiet herum entstehen.

Tabelle 5.2: Prozesstechnische Realisierung der SFB-Unterteile

	4"-Wafer blank
	Aufbringen und Vorderseitenstrukturierung der Maskierungsschichten SiO_2 und Si_3N_4

	Vorätzen des optischen Spaltes
	Entfernen der Nitridschicht im Gruben- gebiet; Ätzen des elektrostatischen- und Weiterätzen des optischen Spaltes; Definierung des Bondrahmens
	Alle Schichten abätzen; neues thermi- sches Oxid beidseitig
	Aluminium auf Vorderseite sputtern und mit Schirmmaske strukturieren
	Vergraben des Schirmes mittels PE- Oxid und PE-Nitrid
	Plasmaätzen des Nitrids und Nassät- zen des Oxids im optischen- und im Kontaktierungsgebiet sowie auf den Bondflächen
	Aluminium auf Vorder- und Rückseite aufsputtern; Strukturieren mit entspre- chenden Masken für Kontaktierung und Elektrode
	Jena: Abscheidung der optischen Schichten

5.2 FPI5 – SU8

Das Bonden der FPI mit SU8 konnte bereits in früheren Durchläufen erprobt werden und ging stets mit einer guten Ausbeute einher. Die Änderungen in der neuen FPI5-SU8-Variante betreffen die Grubenätzung auf dem Oberteil und somit das Vergraben der optischen Schichten, sowie die Anpassung des elektrostatischen Stapels bezüglich der Dicke. Die schematische Darstellung der SU8-Variante ist in Abbildung 5.2 verdeutlicht.

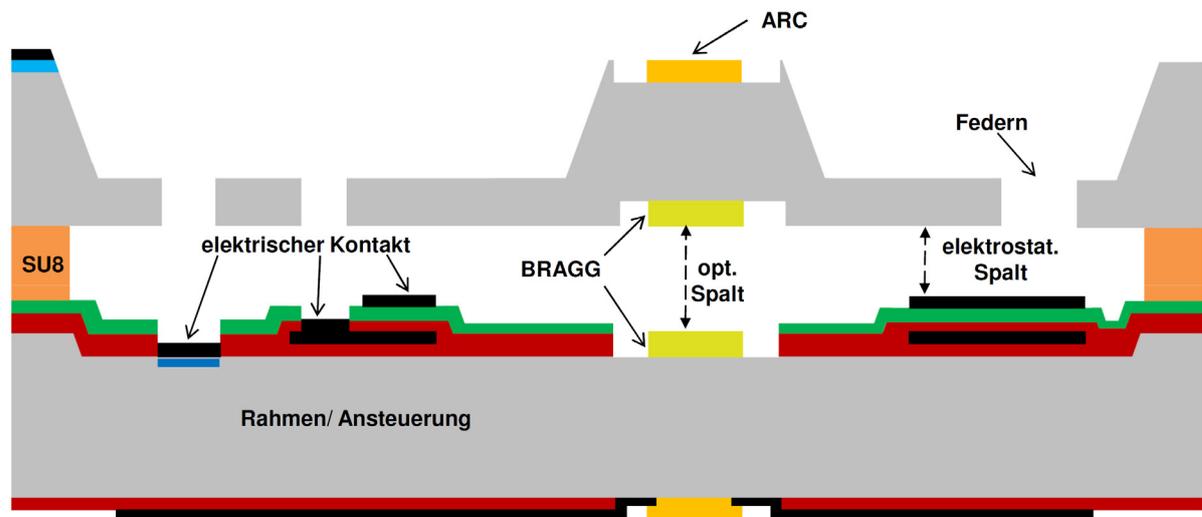


Abbildung 5.2: Schematische Darstellung FPI-SU8

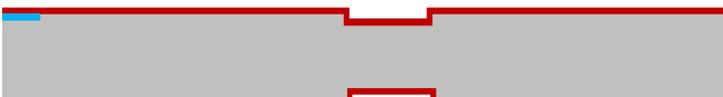
Als Ausgangsmaterial dient niedrigdotiertes Substratmaterial, beispielsweise Float-Zone gezogenes Silizium, da dieses wenig Sauerstoff enthält. [TUC07] Dadurch wird die Absorptionsbande des Sauerstoffs bei $9\ \mu\text{m}$ weitestgehend vermieden und es liegt ein Substrat vor, welches eine gute Transmission aufweist. Jedoch ist aufgrund der geringen Anzahl von Dotanten der elektrische Leitwert von diesem Substrat derart gering, dass in den Bereichen der Anschluss pads in oberflächennahen Tiefen eine zusätzliche Dotierung vorgenommen werden muss, um die Kontaktierung zu gewährleisten. [Ros09] Bei dieser Variante ist die Einhaltung der Abmaße der einzelnen Ätzungen und Schichtabscheidungen von genauso großer Wichtigkeit wie bei dem alten Design. Da zur Vermeidung des Stickings die optischen Schichten auf dem Oberteil in die geätzte Grube verlagert wurden, entfällt eine weitere Grubenätzung des Unterteils neben der Grubenätzung für den elektrostatischen Spalt. Demzufolge wird der elektrostatische Spalt in der SU8-Variante durch die Grubenätzung auf dem Unterteil, dem Oxid-Nitrid-Stapel auf dem Bondrahmen, der SU8-Dicke und dem elektrostatischen Stapel bestimmt. Der optische Spalt hingegen ist von der Grubenätzung im Oberteil, der Dicke des SU8, dem Oxid-Nitrid-Stapel auf dem Bondrahmen und der Grubenätzung im Unterteil abhängig.

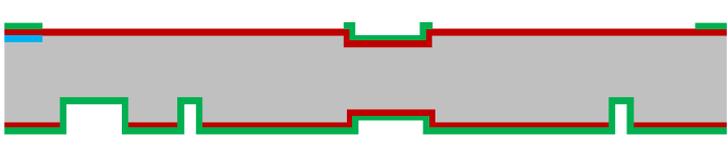
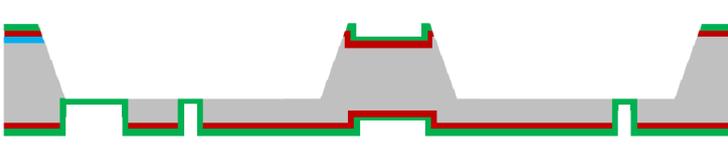
5.2.1 Oberteil

Die in Tabelle 5.3 verdeutlichte Herstellung der Oberteile der SU8-Bondvariante ähnelt dem der Direktbondvariante, spezialisiert sich aber aufgrund der Grubenätzungen. So wird der 4"-Wafer zu Beginn abermals mit einer $1\ \mu\text{m}$ dicken Maskierungsschicht aus SiO_2 für die Ätzung der Gruben mittels Schichtwachstum versehen. Daraufhin folgt die Ätzung der Grube in den beiden Varianten der optischen Designs. Demzufolge werden bei der V2f-Variante

1,12 μm und bei der V5g-Variante 1,3 μm geätzt. Um die Kontaktierung zu gewährleisten, werden die Bereiche der späteren Anschluss pads in oberflächennahen Tiefen mit zusätzlichen Dotanten versehen. Dies erfolgt über eine vorher per LP-CVD abgeschiedene und durch Trockenätzen strukturierte Si_3N_4 Maske, einer folgenden POCl_3 Vorbelegungsdiffusion und Tiefendiffusion. Der nächste Schritt beinhaltet die Entfernung aller Schichten und die Erzeugung von neuem thermischen Oxid mit 1 μm Dicke. Anschließend wird die SiO_2 Maskierungsschicht so strukturiert, dass mittels Trockenätzung die Federn in den beiden Varianten von der Rückseite her geätzt werden können. Danach werden die soeben geätzten Federn sowie die gesamte Rück- und Vorderseite mit der Passivierungsschicht Si_3N_4 versehen. Die Si_3N_4 Maske wird auf der Vorderseite mit der Maske des Reflektorträgers strukturiert und das Silizium kann mittels KOH -Lösung bis zur Rückseitenpassivierung geätzt werden. Daraufhin erfolgt erneut eine Entfernung aller Maskierungsschichten. Als letzter Schritt wird auf der Vorderseite Aluminium über eine Maske abgeschieden, das als Anschlusselektrode für den elektrostatischen Antrieb dient.

Tabelle 5.3: Prozesstechnische Realisierung der SU8-Oberteile

	4" - Wafer blank
	Aufwachsen von SiO_2 als Maskierungsschicht
	Strukturieren der Maskierungsschicht; Grubenätzung für die optischen Schichten per Si-KOH -Ätzen
	Abscheidung und Strukturierung der Maskierungsschicht Si_3N_4 sowie Dotierung des Kontaktgebietes
	Entfernen aller Maskierungsschichten; Oxidation zu neuem thermischen Oxid und dessen Strukturierung für die Federätzung
	Trockenätzung der Federn

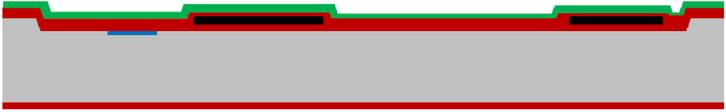
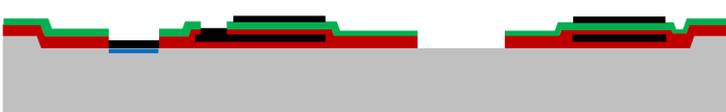
	Passivierung beider Seiten mit Si_3N_4 und Strukturierung der Si_3N_4 Schicht für die Reflektorträgerätzung
	Si - KOH -Ätzen des Reflektorträgers und damit Einstellen der Federdicke
	Maskierungsschichten entfernen; Aufspuffern von Aluminium im Kontaktgebiet; Abscheidung der optischen Schichten in Jena

5.2.2 Unterteil

Die Herstellung der Unterteile der SU8-Bondvariante ähnelt dem der Direktbondvariante, ist aber durch nur einen Ätzschritt gekennzeichnet. Die Herstellung des Unterteils ist in Tabelle 5.4 veranschaulicht. Ebenso ist das Substrat ein 4"-Silizium-Wafer, auf dem zu Beginn die Maskierungsschicht aus thermischem Oxid mit 1 μm Dicke realisiert, strukturiert und die 3,64 μm tiefe Grube durch KOH -Ätzen hergestellt wird. Bei der Grubenätzung in das Unterteil erfolgt keine Unterscheidung zwischen beiden optischen Designvarianten, da diese bereits in den Oberteilen realisiert ist. Neben der Grubenätzung für den elektrostatischen und den optischen Abstand entsteht somit gleichzeitig der Bondrahmen. Daraufhin wird Si_3N_4 abgeschieden und strukturiert, was wiederum als Maske für den folgenden Dotierungsschritt dient. Nach erfolgreicher Dotierung werden alle Maskierungsschichten entfernt, neues thermisches Oxid mit 1,5 μm hergestellt, der Wafer ganzflächig mit 200 nm Aluminium besputtert und nasschemisch strukturiert. Es entsteht ein Aluminiumschirm, der unter einer 1 μm dicken PE-Oxidschicht und einer 200 nm dicken PE-Nitridschicht vergraben wird. Im Anschluss daran werden die Bereiche des optischen Gebietes auf Vorder- und Rückseite sowie des Substratanschlusses von dem 200 nm dicken Nitrid und dem insgesamt 2,5 μm dicken Oxid befreit, um auf das Silizium mittels Aluminium kontaktieren zu können. Außerdem wird im Bereich des vergrabenen Schirms das Nitrid und Oxid abgeätzt, so dass deren Kontaktierung ebenfalls realisiert werden kann. Als Abschluss folgt das ganzflächige Aufspuffern von 1 μm Aluminium auf der Vorderseite und 100 nm Aluminium auf der Rückseite. Dieses Aluminium wird derart strukturiert, dass die oben genannten Kontaktierungen, die Elektrode sowie eine Blende um das optische Gebiet herum hergestellt werden können. Die Realisierung der Elektrode geschieht dabei in zwei Varianten. Die optische Designvariante V2f erhält die nor-

male Elektrode, wohingegen die optische Designvariante V5g mit der geteilten Elektrode ausgestattet wird.

Tabelle 5.4: Prozesstechnische Realisierung der SU8-Unterteile

	4"- Wafer blank
	Aufbringen und Vorderseitenstrukturierung der Maskierungsschicht SiO_2
	Si - KOH -Ätzen der Grube für den elektrostatischen und den optischen Abstand; Definierung des Bondrahmens
	Aufbringen und Strukturieren von Si_3N_4 Ätzen der Si_3N_4 Schicht, $POCl_3$ -Vorbelagungsdiffusion und Tiefendiffusion im Kontaktgebiet
	Alle Schichten abätzen; neues thermisches Oxid beidseitig
	Aluminium auf Vorderseite aufsputtern, strukturieren und ätzen
	Vergraben des Schirmes mittels PE-Oxid und PE-Nitrid
	Trockenätzen des Nitrids; Nassätzen des Oxids sowohl im optischen- als auch im Kontaktierungsgebiet
	Aluminium auf Vorder- und Rückseite aufsputtern; Aluminium für die Elektrode strukturieren
	Jena: Abscheidung der optischen Schichten

5.3 Selektive Schichtabscheidung der optischen Schichten

Die Abscheidung der verschiedenen dielektrischen Schichtmaterialien, welche über Schattenmasken aufgedampft werden, erfolgt selektiv nacheinander (vgl. Abbildung 5.3). Der gesamte Abscheidungsprozess der dielektrischen Schichten findet bei der Firma JENOPTIK Laser, Optik, Systeme GmbH in Jena statt. Damit beim späteren Bondvorgang die Ober- und Unterteile miteinander gebondet werden können, müssen die Bragg-Reflektoren auf die später innen liegende und die ARC-Schichten auf die später außen liegende Waferseite abgeschieden werden. Der Vorteil der selektiven Schichtabscheidung ist darin begründet, dass eine unnötige Beschichtung des restlichen Wafers mit dielektrischem Schichtmaterial verhindert wird und darauf folgende Strukturierungen eingespart werden. Von größter Notwendigkeit ist die Einhaltung eines geringen Justageversatzes. Wird der Maskenwafer nicht optimal zum beschichtenden Wafer ausgerichtet, kann ein Justageversatz auftreten. Dabei kann der Justageversatz minimal sein und die optischen Schichtstapel geringfügig von der optimalen Position verschieben. Ist der Justageversatz beispielsweise bei der Beschichtung der BRAGG-Reflektoren auf dem Unterteil zu groß, können die strukturierten Isolatorstapel mit beschichtet werden und so die Funktionsweise der Abstandshalter verringern. Demzufolge ist bei der Beschichtung eine möglichst optimale Justage von zu beschichtenden Wafer zu Maskenwafer zwingend notwendig.

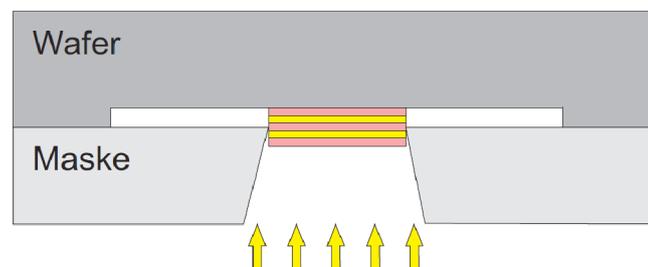


Abbildung 5.3: Schematische Darstellung der selektiven Beschichtung

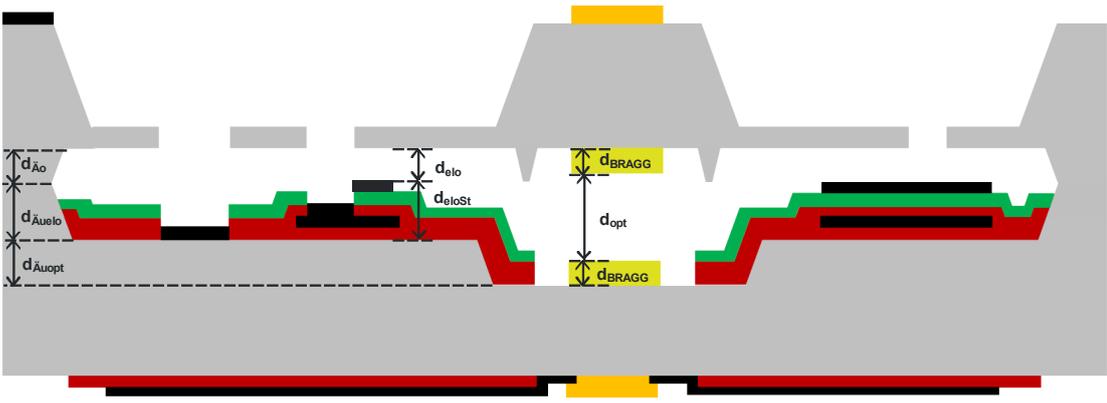
6 Charakterisierung der Muster

Von entscheidender Wichtigkeit für die einwandfreie Funktionsweise der FPI ist die Einhaltung sowohl des optischen als auch des elektrostatischen Abstandes. Stimmen diese vorher berechneten Abstände nicht mit den real hergestellten Abständen überein, kann nicht von der einwandfreien Funktionsweise der FPI ausgegangen werden. Ein zu geringer elektrostatischer Abstand kann dazu führen, dass das Sticking bereits bei normaler Steuerspannung auftritt. Ein zu großer elektrostatischer Abstand resultiert in einer erhöhten Steuerspannung. Gleichzeitig müssen auch die Werte der optischen Abstände übereinstimmen, da sonst der exakt berechnete Wellenlängenbereich nicht durchgescannt werden kann.

6.1 FPI5 – Direktbond

Die SU8-Variante besteht insgesamt im Oberteil aus drei und im Unterteil aus zwei Ätzschritten in das Silizium. Auf dem Unterteil erfolgt die komplette Schichtabscheidung von Isolator-, Schirm- und Elektrodenmaterial. Die Zielwertvorgaben der einzelnen Ätztiefen und Schichtdicken sind jeweils als Parameter in Tabelle 6.1 für die zwei optischen Designs verdeutlicht.

Tabelle 6.1: Zielwertvorgaben der Geometrie für die SFB-Variante



	V2f	V5g
$d_{\ddot{A}o}$ – Grubenätzung oben in μm		6,30
$d_{\ddot{A}uopt}$ – Grubenätzung unten opt. in μm	1,12	1,30
$d_{\ddot{A}ueo}$ – Grubenätzung unten elo. in μm		5,04
d_{BRAGG} – Dicke BRAGG in μm	3,51	3,64
d_{opt} – optischer Spalt in μm	5,44	5,37
d_{eloSt} – Dicke elektrostatischer Stapel in μm		3,90
d_{elo} – elektrostatischer Spalt in μm		7,44

Die Präparation umfasst insgesamt zwölf Wafer, wobei jeweils sechs Ober- und sechs Unterteile hergestellt werden. Von diesen sechs Verbunden sind drei für das optische Design V2f und drei Verbunde für das optische Design V5g ausgelegt. Die Messung der geometrischen Abmaße erfolgt, gemäß Abbildung 6.1, je Wafer an fünf unterschiedlichen Messpunkten und wird mit einem Oberflächenmessgerät⁸ durchgeführt.

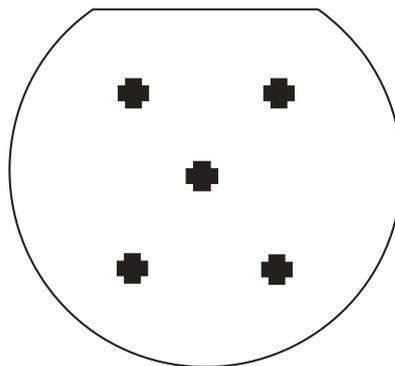


Abbildung 6.1: schematische Darstellung der fünf Messpunkte je Wafer

6.1.1 Oberteil

Zur Minimierung der Variantenvielfalt erfolgt bei den Oberteilen keine Unterscheidung der beiden optischen Designs bezüglich der optischen Spaltmaße und somit der Grubenätzungen im Oberteil. Die Ätzung der Abstandshalter und der Grube im Oberteil mit einer Tiefe von $6,3\ \mu\text{m}$ erfolgt bei allen sechs Wafern mittels *KOH*-Ätzen 30/60⁹. Das Ergebnis der ersten Ätzung im Oberteil ist in Tabelle 6.2 dargestellt. Der angestrebte Zielwert der Grubenätzung von $6,3\ \mu\text{m}$ konnte mit durchschnittlich $6,31\ \mu\text{m}$ verteilt über alle Wafer sehr gut getroffen werden.

Tabelle 6.2: Grubenätzung im Oberteil der SFB-Variante

Wafer #	Ø Grubenätzung in μm	Zielwert der Grubenätzung in μm
1-SFB-V2f	6,31	6,30
2-SFB-V2f	6,31	6,30
3-SFB-V2f	6,31	6,30
4-SFB-V5g	6,30	6,30
5-SFB-V5g	6,30	6,30
6-SFB-V5g	6,31	6,30

⁸ Alphastep 500 Surface Profilometer von KLA Tencor

⁹ *KOH*-Lösung 30/60: Das *KOH*-Ätzen bei $60\ ^\circ\text{C}$ und 30 %-iger Kalilauge ermöglicht ein besseres Einstellen der Grubentiefe. Die Rate mit der geätzt wird, liegt bei ca. $0,3\ \mu\text{m}/\text{min}$.

Die beiden darauf folgenden Ätzungen, das Trockenätzen der Federform von der Rückseite her und das *KOH*-Ätzen der Federdicke von der Vorderseite ausgehend, sind in Tabelle 6.3 verdeutlicht. Dazu ist zuerst von der Rückseite her die Federform mittels Trockenätzen geätzt worden. Die Tiefe dieser Trockenätzung ergibt sich dabei aus $75\ \mu\text{m}$, dem Zielwert der Federdicke und einer zusätzlichen Ätzsicherheit von $5\ \mu\text{m}$. Aufgrund des besonders im Randbereich auftretenden inhomogenen Ätzverhaltens ist diese Ätzsicherheit vonnöten, damit auch die Federn in diesen Randbereichen durch die folgende *KOH*-Ätzung vollständig frei geätzt werden. So konnte die Federätzung aller sechs Wafer sehr gut realisiert werden und liegt über den geforderten $80\ \mu\text{m}$ im Mittel bei $83,32\ \mu\text{m}$. Beim *KOH*-Ätzen von der Vorderseite her können die Federn dann schrittweise an den Zielwert der Federdicke angepasst werden, bis alle Federn frei geätzt sind. Zuerst erfolgt bei Wafer #1 bis #6 das Vorätzen der Struktur mit einer Tiefe von $200\ \mu\text{m}$, um anschließend die noch zu ätzenden geringen Tiefen von 16 bis $20\ \mu\text{m}$ (abhängig von der Waferdicke) exakt zu ermöglichen. Wafer #1 ist als Testwafer für die Federätzung herangezogen worden und weicht daher in den Werten von den restlichen Wafern etwas ab. Während der *KOH*-Ätzung 30/80¹⁰ trat jedoch eine auffallende Inhomogenität bezüglich der Äztiefe auf. So waren nahezu alle Federn bei der Zielätzung der Restdicke mit $75\ \mu\text{m}$ nicht annähernd frei geätzt. Auch konnte eine starke Inhomogenität im Chip selbst festgestellt werden. Dieser Sachverhalt führte dazu, dass solange geätzt werden musste, bis alle Federn frei von Rückständen waren. Demzufolge ergibt sich bei Wafer #1 eine viel geringere Federdicke von $65,89\ \mu\text{m}$ als die angestrebten $75\ \mu\text{m}$. Die Messung der Restdicken der Federn erfolgte dabei mit einem Membrandickenmessgerät¹¹. Während der Herstellung der Oberteile und den damit verbundenen Komplikationen ist die Federdicke nochmals überarbeitet worden. Dies schlägt sich in weicheren Federn und somit in einer geringeren Steuerspannung nieder. Die Dicke der Federn wird daher auf $63\ \mu\text{m}$ verringert. Folglich wurde bei den Wafern #2 bis #6 eine Zieldicke von $63\ \mu\text{m}$ angestrebt. Die Zieldicken der Wafer #2 bis #6 konnten im Mittel mit $62,86\ \mu\text{m}$ sehr gut erreicht werden. Eine erneute Messung der Restdicke, speziell an den vier Federn eines Chips sollte Aufschluss über die Inhomogenität der Ätzung geben. Die Messung zeigt, dass sich die Federn in einem Chip teilweise bis zu $6\ \mu\text{m}$ unterscheiden. Dieses Resultat bestätigt das bei der Ätzung beobachtete Verhalten und ist auf die Vorbelastung des Ätzbades zurückzuführen.

¹⁰ *KOH* 30/80: Das *KOH*-Ätzen bei $80\ ^\circ\text{C}$ und 30 %-iger Kalilauge ermöglicht ein schnelleres Ätzen von großen Tiefen. Die Rate mit der geätzt wird, liegt bei ca. $1\ \mu\text{m}/\text{min}$.

¹¹ BMT – Breitmeyer Waferdickenmessgerät TRIRCI

Tabelle 6.3: Federätzung im Oberteil der SFB-Variante

Wafer #	Ø Tiefe der Federätzung in μm	Ø Dicke der Federn in μm	Zielwert der Federdicke in μm
1-SFB-V2f	83,47	65,89	75,00
2-SFB-V2f	83,20	62,44	63,00
3-SFB-V2f	83,57	63,21	63,00
4-SFB-V5g	83,70	62,49	63,00
5-SFB-V5g	83,20	63,20	63,00
6-SFB-V5g	82,80	62,94	63,00

6.1.2 Unterteil

Die Verringerung der Variantenvielfalt durch das Ätzen einer definierten Grubentiefe bei den Oberteilen der SFB-Variante führt dazu, dass die Unterteile mit unterschiedlich tiefen Gruben bezüglich der beiden optischen Designs angepasst werden müssen. Demzufolge wird bei der Variante SFB-V2f die optische Grube mit 1,12 μm und bei Variante SFB-V5g mit 1,3 μm per *KOH*-Ätzen vorgeätzt. Da der elektrostatische Abstand bei beiden Varianten aufgrund der übereinstimmenden Federgeometrie identisch ist, folgt eine weitere *KOH*-Ätzung in der alle Unterteile mit den 5,04 μm tiefen Gruben versehen werden. Gleichzeitig bleibt die optische Grube geöffnet und wird daher ebenfalls 5,04 μm weitergeätzt. Folglich stellt sich nach Zielvorgaben bei der Variante SFB-V2f eine Gesamttiefe der optischen Grube von 6,16 μm und bei der Variante SFB-V5g eine Gesamttiefe von 6,34 μm ein. Betrachtet man die durchschnittlichen Ätzungen der verschiedenen Gruben in Tabelle 6.4, so wird ersichtlich, dass die Grubenätzungen der optischen Gruben bei beiden Varianten sehr gut getroffen worden sind. Diese liegen im Mittel bei der Variante SFB-V2f mit 1,13 μm und bei der Variante SFB-V5g mit 1,32 μm geringfügig neben der Zielvorgabe. Die darauf folgende Ätzung der Grube für den elektrostatischen Abstand und die Weiterätzung der Grube für den optischen Abstand wurden jeweils mit 5,04 μm angestrebt. Gemäß Tabelle 6.4. konnte diese Zielvorgabe mit 5,05 μm im Mittel sehr gut realisiert werden. Die größte Abweichung stellt Wafer #2 mit 30 nm Überätzung dar.

Tabelle 6.4: Grubenätzungen im Unterteil der SFB-Variante

Wafer #	Ø Grubenätzung opt. Fenster in μm	Zielwert in μm	Ø Grubenätzung elektrost. Spalt in μm	Zielwert in μm
1-SFB-V2f	1,13	1,12	5,06	5,04
2-SFB-V2f	1,13	1,12	5,07	5,04
3-SFB-V2f	1,13	1,12	5,04	5,04
4-SFB-V5g	1,29	1,30	5,04	5,04
5-SFB-V5g	1,33	1,30	5,06	5,04
6-SFB-V5g	1,33	1,30	5,05	5,04

Nach der erfolgreichen Strukturierung der beiden unterschiedlich tiefen Gruben ist die Abscheidung und Strukturierung des Aluminiumschirms der nächste Schritt. Die Abscheidung des Schirmmaterials soll möglichst glatt erfolgen, um die Spitzenbildung des Schirmmaterials zu verhindern und somit einen Kurzschluss zu vermeiden. Dazu wurde der gesamte Wafer mit Aluminium besputtert und anschließend mit der entsprechenden Maske für den Schirm strukturiert. Die Messung der Dicke und der Rauigkeit des Aluminiumschirms mit dem Zielwert von 0,2 μm ist in Tabelle 6.5 erfasst. Der Mittelwert der Messung des Aluminiumschirms liegt mit 0,18 μm etwas unterhalb des Zielwertes. Die Spitzen im Material konnten teilweise mit 30 nm Höhe ermittelt werden.

Tabelle 6.5: Dicke und Rauigkeit des Aluminiumschirmes im Unterteil der SFB-Variante

Wafer #	Ø Dicke des Al-Schirmes in μm	Zielwert in μm	Ø Rauigkeit des Al-Schirmes in nm
1-SFB-V2f	0,18	0,20	3,4
2-SFB-V2f	0,18	0,20	2,7
3-SFB-V2f	0,18	0,20	2,0
4-SFB-V5g	0,18	0,20	2,2
5-SFB-V5g	0,18	0,20	2,4
6-SFB-V5g	0,18	0,20	3,0

Nach der Strukturierung des Aluminiumschirmes folgt das Vergraben des Schirmes mit einem Isolatorstapel aus PE-Oxid und PE-Nitrid. Infolgedessen wird ein 1,2 μm dicker PE-Stapel aus 1 μm PE-Oxid und 0,2 μm PE-Nitrid abgeschieden. Anschließend wird der gesamte Isolatorstapel in den Bereichen der optischen Fenster und der Substratkontaktierung freigeätzt um mittels Aluminium kontaktieren zu können. Der PE-Stapel wird vor dem Ätzen selektiv durch eine Lackmaske geschützt. Die Ätzung erfolgt durch Trockenätzen und nasschemisches Ätzen. Während der nasschemischen Ätzung des Isolatorstapels war die Lackhaftung nicht mehr ausreichend, so dass sich dieser im Ätzbad von den zu schützenden Bereichen ablöste. Als Ergebnis liegen sechs Wafer vor, von denen nur Wafer #6 eine homogene und ausreichend dicke Isolatorschicht aufweist. Bei den Wafern #1 bis #5 ist die Isolatorschicht teilweise in den Ecken am optischen Fenster und vor allem in den Bereichen der späteren Kontaktierung angegriffen. Der Prozessablauf wurde trotz dieser Schädigung weiter durchgeführt. Jedoch muss in späteren Tests¹² geprüft werden, inwieweit ein Kurzschluss zwischen Schirm und Elektrode auftritt.

¹² Kurzschlussüberprüfung mittels Prober PM5 der Firma SÜSS MicroTec

Der letzte Schritt, das Aufputtern und Strukturieren der Elektrode, konnte erfolgreich durchgeführt werden. Dazu wird der Wafer ganzflächig mit Aluminium besputtert, das Aluminium mit der Lackmaske der Elektrode versehen und geätzt. Die Zieldicke des Aluminiums soll laut Anforderung an den elektrostatischen Stapel 1 μm betragen. Jedoch konnte nur eine Elektrode mit einer Dicke von 0,82 μm realisiert werden. Die fehlenden 0,18 μm der Elektrodendicke wirken sich wie die geringere Dicke des Isolatorstapels negativ auf den elektrostatischen Abstand aus. Zum Vergleich sind in Tabelle 6.6 die Dicken der Elektrode und des kompletten elektrostatischen Stapels dargestellt. Bei allen Wafern ist die zu dünne Elektrode deutlich zu erkennen. Weiterhin fällt auf, dass der gesamte elektrostatische Stapel große Schwankungen zwischen 3,37 μm und 3,62 μm aufweist. Dies ist auf das Anätzen der PE-Stapel zurückzuführen.

Tabelle 6.6: Dicke der Aluminiumelektrode und des gesamten elektrostatischen Stapels im Unterteil der SFB-Variante

Wafer #	Ø Dicke der Al-Elektrode in μm	Zielwert in μm	Ø Dicke elektrostatischer Stapel in μm	Zielwert in μm
1-SFB-V2f	0,80	1,00	3,62	3,90
2-SFB-V2f	0,82	1,00	3,51	3,90
3-SFB-V2f	0,82	1,00	3,54	3,90
4-SFB-V5g	0,82	1,00	3,50	3,90
5-SFB-V5g	0,84	1,00	3,37	3,90
6-SFB-V5g	0,81	1,00	3,60	3,90

Die Kurzschlussüberprüfung bestätigte die Vermutung, dass der Angriff der PE-Schichten Einfluss auf deren Isolatorwirkung hat. So traten bei allen Chips Kurzschlüsse zwischen Schirm und Elektrode auf. Der PE-Stapel wurde speziell an den Kanten und infolgedessen vermehrt an den Kontaktierungsflächen weggeätzt. Dadurch kann keine Isolierung erfolgen. Dies führt dazu, dass die Elektrode an diesen Stellen direkt auf dem Schirm liegt. Die Kurzschlussüberprüfung zwischen Substrat und Elektrode erzielte ein besseres Ergebnis. Nur vereinzelt konnte ein Kurzschluss festgestellt werden. Dies ist darauf zurückzuführen, dass das thermische Oxid zwischen Substrat und Schirm nicht derart stark angegriffen ist.

6.1.3 Beschichtung der optischen Schichten in Jena

Nach der Beschichtung der Wafer in Jena werden diese vermessen und einer optischen Kontrolle unterzogen. Die Vermessung des BRAGG-Reflektors der V2f-Variante (vgl. Tabelle 6.7) ergab Schichtdicken von durchschnittlich 3,45 μm . Die abgeschiedene Schichtdicke liegt hierbei 60 nm unter dem theoretischen Wert des V2f-Schichtdesigns. Das optische Design V5g weist mit einer durchschnittlichen Stapeldicke von 3,65 μm nur eine Abweichung

von 10 nm von der Zieldicke auf. Bei der optischen Kontrolle wurde bei einigen Wafern ein erheblicher Partikelbefall festgestellt. Ebenso traten Defekte in der optischen Beschichtung und in der Justage der Schichtstapel auf, wobei die fehlerhafte Justage überwiegend in den Unterteilwafern beobachtet werden konnte. Die Justage der Schichtstapel bei den Oberteilwafern ist bis auf Oberteilwafer #6 gut. Der Unterteilwafer #2 ist während der Beschichtung gebrochen, sodass dieser nicht mehr für die Bondung zur Verfügung steht. Bei den Unterteilwafern #1, #5 und #6, sowie bei den Oberteilwafern #2 und #3 sind während der Beschichtung Teile des Wafers im Randbereich abgebrochen. Dies ist auf die Vorrichtung für das Einspannen der zu beschichtenden Wafer und der Maskenwafer zurückzuführen. Werden die Wafer in der Vorrichtung nicht fest genug eingespannt, können diese verrutschen, was eine undefinierte Beschichtung zur Folge hat. Wird die Einspannung der Wafer zu fest vorgenommen, können Defekte wie das Anbrechen im Randbereich oder das Zerbrechen eines Wafers auftreten. Des Weiteren muss davon ausgegangen werden, dass sich das Anbrechen der Wafer im Randbereich negativ auf das Bondverhalten auswirken kann.

Tabelle 6.7: Auswertung der optischen Beschichtung der SFB-Variante (OS: Defekte in optischer Schicht, P: Partikel auf optischer Schicht, Justagebewertung: sehr gut = 1, gut = 2, ok = 3, schlecht = 4, sehr schlecht = 5)

Wafer #	Ø Dicke des BRAGG in μm	Zielwert in μm	Justage BRAGG / ARC	Defekte – Partikel BRAGG / ARC
OT-1-SFB-V2f	3,46	3,51	gut / gut	0xOS 3xP / 0xOS 8xP
OT-2-SFB-V2f	3,43	3,51	gut / gut	7xOS 1xP / 4xOS 6xP
OT-3-SFB-V2f	3,45	3,51	gut / gut	1xOS 1xP / 1xOS 9xP
OT-4-SFB-V5g	3,65	3,64	gut / gut	1XOS 4xP / 2xOS 10xP
OT-5-SFB-V5g	3,66	3,64	gut / gut	0xOS 3xP / 1xOS 12xP
OT-6-SFB-V5g	3,65	3,64	gut / ok	4xOS 3xP / 1xOS 10xP
UT-1-SFB-V2f	3,45	3,51	schlecht / gut	6xOS 7xP / 2xOS 7xP
UT-2-SFB-V2f	-	-	-	-
UT-3-SFB-V2f	3,46	3,51	ok / gut	1xOS 8xP / 0xOS 6xP
UT-4-SFB-V5g	3,65	3,64	schlecht / ok	2xOS 17xP / 2xOS 6xP
UT-5-SFB-V5g	3,63	3,64	ok / gut	3xOS 25xP / 2xOS 5xP
UT-6-SFB-V5g	3,64	3,64	schlecht / ok	0xOs 7xP / 0xOS 15xP

In Abbildung 6.2 ist der Versatz in der Justage des Unterteil-Wafers #1 dargestellt. In a) ist der Chip E4 mit einer guten Justage, in b) der Chip E10 mit einer sehr schlechten Justage abgebildet. So kann die schlechte Justage im Chip E10 beispielsweise zu einer asymmetrischen Beschichtung beider BRAGG-Stapel zu einander bzw. im Unterteil zwischen ARC und BRAGG führen, was sich negativ auf die optischen Eigenschaften des Filters auswirkt. Im

Falle einer Beschichtung des strukturierten Isolatorstapels mit dem optischen Schichtstapel muss von einer eingeschränkten Funktionsweise der Abstandshalter ausgegangen werden. Ist die Justage der optischen Stapel derart schlecht, dass sich diese wie in Abbildung 6.2 b) teilweise auf der Elektrode befinden, ist ein Kurzschluss zwischen Elektrode und Substrat unumgänglich. Daraus folgt, dass bei zukünftigen Beschichtungen der optischen Stapel auf eine bessere Justage geachtet werden muss.

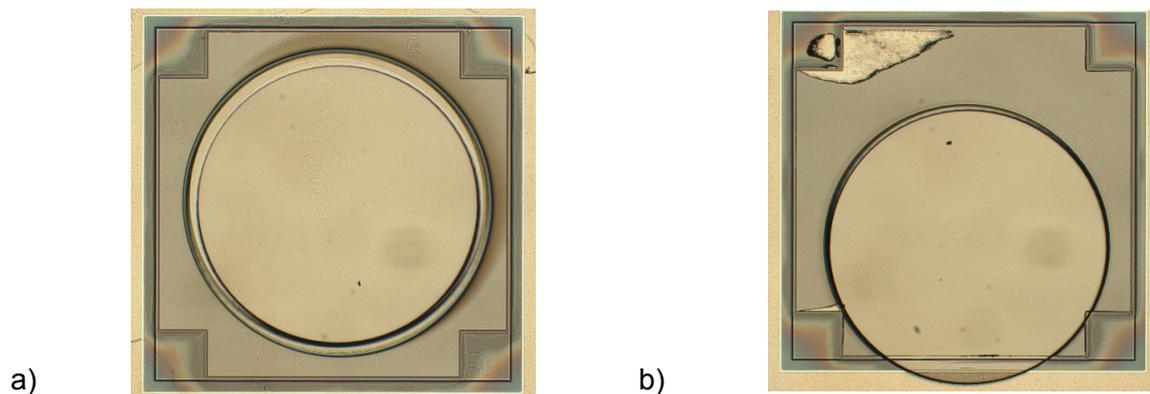


Abbildung 6.2: Justage der optischen Schichten im Unterteil-Wafer #1 a) gute Justage im Chip E4 b) sehr schlechte Justage im Chip E10

6.1.4 Zusammenfassung

Die Einhaltung der Ätztiefen für die unterschiedlichen Ätzungen und Schichtdicken der Schichtabscheidungen ist von oberster Wichtigkeit, um die optimale Funktionsweise der FPI zu gewährleisten. Bei dem FPI müssen für die einwandfreie Funktionsweise zwei Abstände realisiert und eingehalten werden, der optische und der elektrostatische Abstand.

Der optische Abstand

Zur Berechnung des optischen Abstandes (vgl. Formel 6.1) fließen bei der SFB-Variante die Ätzung im Oberteil, beide Ätzungen im Unterteil sowie die Schichtabscheidung des BRAGG-Reflektors ein.

$$d_{\text{optisch}} = d_{\text{Ätzung OT}} + d_{\text{Ätzung UT optisch}} + d_{\text{Ätzung UT elektrostatisch}} - (2 \cdot d_{\text{BRAGG}}) \quad (6.1)$$

Folglich ergibt sich der in Tabelle 6.8 wiedergegebene Sachverhalt. Sowohl die Ätzung im Oberteil als auch die erste Ätzung im Unterteil können mit sehr guten Resultaten belegt werden. Die Abweichungen betragen bei der Ätzung im Oberteil maximal 10 nm als Überätzung. Die erste Ätzung im Unterteil ist mit maximal 30 nm als Über- und 10 nm als Unterätzung etwas größer. Bei Betrachtung der zweiten Ätzung im Unterteil sind gleiche große Abweichungen von maximal 30 nm Überätzung ersichtlich. Zusammen bilden die Ätzungen und

die zwei BRAGG-Reflektoren die Gleichung für den optischen Abstand. Zusammenfassend kann der mögliche optische Abstand gemäß Tabelle 6.8 bewertet werden. Da die Dicke der BRAGG-Reflektoren zweimal in die Berechnung des optischen Abstandes einfließt, erhöhen diese vor allem bei dem optischen Design-V2f in großem Maß die Abweichung vom Zielwert. Dementsprechend beträgt die maximale Abweichung 0,17 μm bei Verbund #2. Die Beschichtung der Wafer #4 bis #6 mit dem optischen Design-V5g kann aufgrund der geringeren Abweichung der BRAGG-Reflektoren mit guten Ergebnissen bezüglich des optischen Abstandes belegt werden. Entsprechend Tabelle 6.8 beträgt der mögliche optische Abstand bei allen drei Verbunden 5,34 μm und damit nur 30 nm unter dem Zielwert.

Tabelle 6.8: Ermittlung des optischen Abstandes der möglichen SFB-Verbunde (Abweichungen vom Zielwert in nm)

Verbund #	Ø Ätzung OT in μm	Ø opt. Ätzung UT in μm	Ø elektrost. Ätzung UT in μm	Ø Dicke BRAGG in μm	Ø opt. Abstand in μm
Ziel V2f	6,30	1,12	5,04	3,51	5,44
1-SFB-V2f	6,31 (+10)	1,13 (+10)	5,06 (+20)	3,45 (-60)	5,60 (+160)
2-SFB-V2f	6,31 (+10)	1,13 (+10)	5,07 (+30)	3,45 (-60)	5,61 (+170)
3-SFB-V2f	6,31 (+10)	1,14 (+20)	5,04 (± 0)	3,45 (-60)	5,59 (+150)
Ziel V5g	6,30	1,30	5,04	3,64	5,37
4-SFB-V5g	6,30 (± 0)	1,29 (-10)	5,04 (± 0)	3,65 (+10)	5,34 (-30)
5-SFB-V5g	6,30 (± 0)	1,33 (+30)	5,06 (+20)	3,65 (+10)	5,34 (-30)
6-SFB-V5g	6,31 (+10)	1,33 (+30)	5,05 (+10)	3,65 (+10)	5,34 (-30)

Der elektrostatische Abstand

Bei der Berechnung des elektrostatischen Abstandes (vgl. Formel 6.2) werden neben der Ätzung im Oberteil, die Ätzung im Unterteil für den elektrostatischen Abstand und die Schichtabscheidungen für den elektrostatischen Stapel einbezogen.

$$d_{\text{elektrostatisch}} = d_{\text{Ätzung OT}} + d_{\text{Ätzung UT elektrostatisch}} - d_{\text{elektrostatischer Stapel}} \quad (6.2)$$

Infolgedessen ergibt sich für den elektrostatischen Abstand ein ähnlicher Sachverhalt in Tabelle 6.9. Die Ätzung im Oberteil und Unterteil wird mit den gleichen Abweichungen einbezogen wie bei der Berechnung des optischen Abstandes. Aufgrund des viel zu geringen elektrostatischen Stapels stellt sich ein größerer elektrostatischer Abstand ein. Da die minimalen Abweichungen der beiden Ätzungen auf die großen Abweichungen des elektrostatischen Stapels addiert werden, stellt sich ein elektrostatischer Abstand ein, der sich zwischen 7,75 und 8 μm befindet. Der Zielwert des elektrostatischen Abstandes für die Nutzung der geringeren Steuerspannungen liegt bei 7,44 μm . Jedoch relativiert sich dies aufgrund der

geringeren Federdicken. Somit sollte trotz des größeren elektrostatischen Abstandes die vorhandene Steuerspannung bei den 12 μm dünneren Federn hinreichend genügen.

Tabelle 6.9: Ermittlung des elektrostatischen Abstandes der möglichen SFB-Verbunde (Abweichungen vom Zielwert in nm)

Verbund #	\varnothing Ätzung OT in μm	\varnothing elektrost. Ätzung UT in μm	\varnothing Dicke elektrost. Stapel in μm	\varnothing elektrost. Abstand in μm
Ziel	6,30	5,04	3,90	7,44
1-SFB-V2f	6,31 (+10)	5,06 (+20)	3,62 (-280)	7,75 (+310)
2-SFB-V2f	6,31 (+10)	5,07 (+30)	3,51 (-390)	7,87 (+430)
3-SFB-V2f	6,31 (+10)	5,04 (± 0)	3,54 (-360)	7,81 (+370)
4-SFB-V5g	6,30 (± 0)	5,04 (± 0)	3,50 (-400)	7,84 (+400)
5-SFB-V5g	6,30 (± 0)	5,06 (+20)	3,37 (-530)	7,99 (+550)
6-SFB-V5g	6,31 (+10)	5,05 (+10)	3,60 (-300)	7,76 (+320)

Weiterhin muss beachtet werden, dass die Abätzung des Isolatorstapels sich ebenso negativ auf die Funktionsweise der Abstandhalter auswirken kann. Der Platz zwischen Abstandhalter und Isolatorstapel, auf dem die Abstandhalter auftreffen und so die Kollision zwischen Ober- und Unterteil vermeiden sollen, ist entsprechend ausgelegt. Evidenterweise muss dieser geringer sein als der optische Abstand zwischen beiden Reflektorträgern, um die Kollision zu verhindern. Nach Prozessplan ist der Abstand zwischen Isolatorstapel und Abstandhalter mit 3,46 μm für Variante V2f und mit 3,64 μm für Variante V5g angestrebt. Der optische Abstand beträgt 5,44 μm für Variante V2f und 5,37 μm für Variante V5g, dementsprechend sind bei Variante V2f 1,98 μm und bei Variante V5g 1,74 μm als Puffer vorhanden. Da bei der Anätzung des Isolatorstapels vorwiegend die PE-Schichten mit einer Dicke von 1,2 μm betroffen waren, kann von einer fehlerfreien Funktionsweise der Abstandhalter bezüglich der Verhinderung des Stickings ausgegangen werden. In Abbildung 6.3 a) ist die Rückseite eines Oberteils mit Abstandhaltern und in Abbildung 6.3 b) die Vorderseite des dazugehörigen Unterteils mit dem strukturierten Isolatorstapel verdeutlicht.

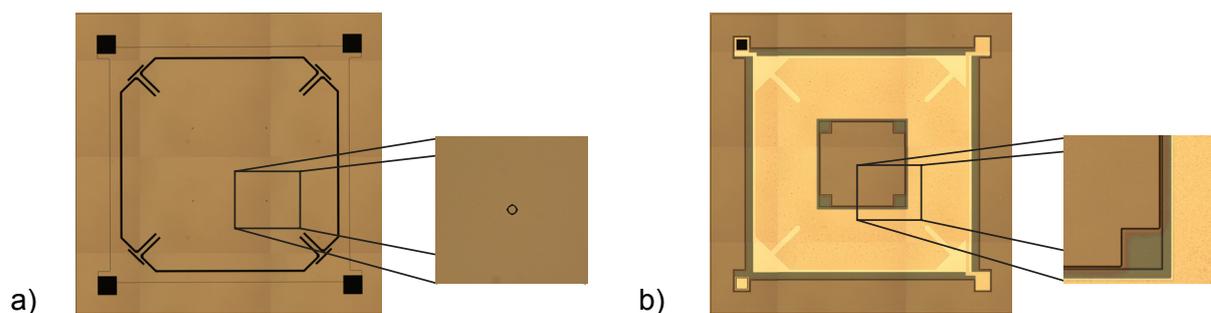
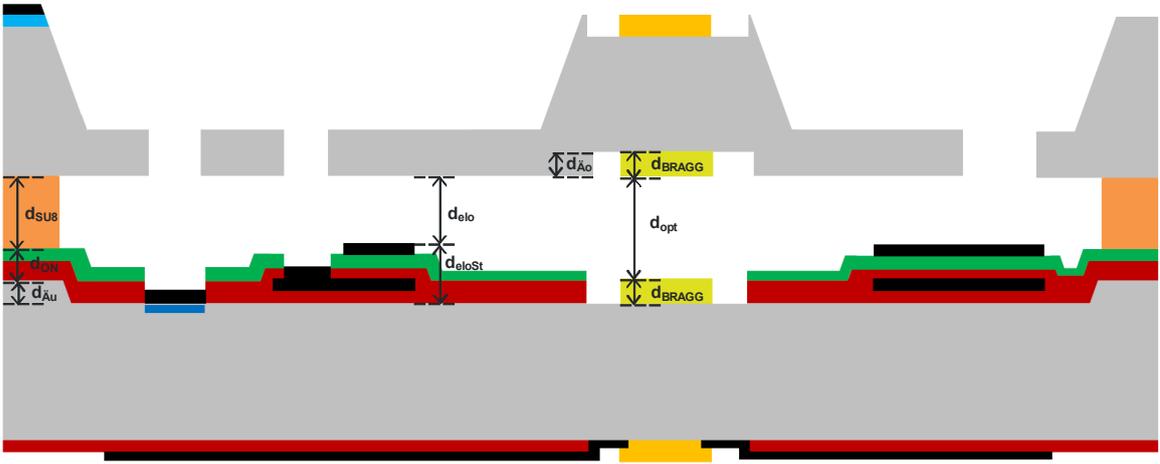


Abbildung 6.3: a) Rückseite eines Oberteils mit Abstandhaltern und b) Vorderseite eines Unterteils mit strukturiertem Isolatorstapel

6.2 FPI5 – SU8

Die SU8-Variante besteht insgesamt im Oberteil ebenfalls aus drei, im Unterteil aber nur aus einem Ätzschritt in das Silizium. Des Weiteren erfolgt wie bei der Direktbondvariante die komplette Schichtabscheidung von Isolator-, Schirm- und Elektrodenmaterial auf den Unterteilen. Die Zielwertvorgaben der einzelnen Äztiefen und Schichtdicken sind als Parameter in der Tabelle 6.10 für die beiden optischen Designs verdeutlicht. Die Präparation umfasst insgesamt 18 Wafer, wobei jeweils neun Ober- und neun Unterteile hergestellt werden. Weiterhin erfolgt in den neun Verbunden eine Einteilung in vier Verbunde für das optische Design V2f und fünf Verbunde für das optische Design V5g.

Tabelle 6.10: Zielwertvorgaben der Geometrie für die SU8-Variante



	V2f	V5g
$d_{\ddot{A}o}$ – Grubenätzung oben in μm	1,12	1,30
$d_{\ddot{A}u}$ – Grubenätzung unten in μm		3,64
d_{BRAGG} – Dicke BRAGG in μm	3,51	3,64
d_{opt} – optischer Spalt in μm	5,44	5,37
d_{ON} – Oxid-Nitrid Bondrahmen in μm		2,70
d_{SU8} – Dicke SU8 in μm		5,00
d_{eloSt} – Dicke elektrostatischer Stapel in μm		3,90
d_{elo} – elektrostatischer Spalt in μm		7,44

6.2.1 Oberteil

Die Präparation des Oberteils der SU8-Variante ist aufgrund der optischen Designs und der unterschiedlich tiefen Gruben in die zwei Untervarianten SU8-V2f und SU8-V5g gegliedert. Je Variante sind drei Ätzungen durchzuführen. Die erste Ätzung ist das *KOH*-Ätzen der Grube des optischen Fensters. Der Zielwert liegt bei Variante SU8-V2f bei 1,12 μm und bei Variante SU8-V5g bei 1,3 μm . Dafür wird in *KOH*-Lösung in mehreren Schritten heran geätzt. Im Mittel liegt die Tiefe der geätzten Grube bei 1,13 μm für Variante SU8-V2f und 1,31 μm für die Variante SU8-V5g. Die Zieltiefen konnten somit sehr gut erreicht werden (vgl. Tabelle 6.11).

Tabelle 6.11: Grubenätzung des optischen Spaltes im Oberteil der SU8-Variante

Wafer #	\varnothing Grubenätzung opt. Spalt in μm	Zielwert der Grubenätzung in μm
1-SU8-V2f	1,12	1,12
2-SU8-V2f	1,13	1,12
3-SU8-V2f	1,12	1,12
4-SU8-V2f	1,13	1,12
5-SU8-V5g	1,31	1,30
6-SU8-V5g	1,30	1,30
7-SU8-V5g	1,30	1,30
8-SU8-V5g	1,32	1,30
9-SU8-V5g	1,31	1,30

Allerdings traten nach dem Grubenätzen auf den soeben geätzten Flächen fleckige Erscheinungen auf. Die Untersuchung dieser Defekte wird in Abschnitt 6.2.2 *Unterteil* durchgeführt. Als nächstes folgt die Ätzung der Federn. Vor dieser Ätzung wurde das *KOH*-Ätzbad aufgrund der stark inhomogenen Ätzung der Direktbond-Oberteile und wegen des Auftretens der Defekte im Grubengrund bei der SU8-Variante erneuert. Ebenso wurde die Federätztiefe verändert. Danach werden neben dem Zielwert von 60 μm Federdicke eine zusätzliche Ätzsicherheit von 15 μm angestrebt. Folglich liegt die Zieltiefe der Federätzung bei 75 μm . Diese konnte im Mittel mit 73,74 μm gut erreicht werden. Daraufhin erfolgt das *KOH*-Ätzen des Massekörpers und der Federn auf Restdicke. Die Restdicke der Federn wurde mit 60 μm anvisiert und konnte entsprechend den Ergebnissen in Tabelle 6.12 sehr gut mit 60,32 μm im Mittel realisiert werden. Die größte Abweichung hat Wafer #5 mit 1,34 μm als Unterätzung inne. Das bei den Oberteilen der SFB-Variante beobachtete stark inhomogene Ätzverhalten in einem Chip konnte bei der *KOH*-Ätzung der SU8-Oberteile nicht derart stark beobachtet werden. Die Abweichungen der vier Federn auf einem Chip betragen maximal 1,2 μm . Letz-

ten Endes muss davon ausgegangen werden, dass das Wechseln des *KOH*-Ätzbades zu dieser Verbesserung der *KOH*-Ätzung geführt hat. Während der Messung der Restdicke des Wafers #2 ist dieser aufgrund eines Bedienfehlers derart stark beschädigt worden, dass Wafer #2 nicht für die folgende Beschichtung in Jena verwendet werden kann.

Tabelle 6.12: Federätzung im Oberteil der SU8-Variante

Wafer #	Ø Tiefe der Federätzung in μm	Ø Dicke der Federn in μm	Zielwert der Federdicke in μm
1-SU8-V2f	75,40	59,93	60,00
2-SU8-V2f	74,35	60,16	60,00
3-SU8-V2f	73,03	59,42	60,00
4-SU8-V2f	73,73	60,76	60,00
5-SU8-V5g	73,22	61,34	60,00
6-SU8-V5g	74,45	60,31	60,00
7-SU8-V5g	73,46	60,29	60,00
8-SU8-V5g	73,15	60,87	60,00
9-SU8-V5g	73,87	59,79	60,00

6.2.2 Unterteil

Zur Minimierung der Variantenvielfalt erfolgt bei den Unterteilen keine Unterscheidung der beiden optischen Designs bezüglich der optischen Spaltmaße und somit der Grubenätzungen im Unterteil. Die Grubenätzung für den elektrostatischen und optischen Abstand erzielte in *KOH*-Lösung bei den Wafern #2 bis #9 im Mittel Ätztiefen von $3,66 \mu\text{m}$. Bei einer angestrebten Ätzung von $3,64 \mu\text{m}$ kann die Grubenätzung demzufolge als sehr gut bewertet werden. Wafer #1 diene als Testwafer bezüglich dieser Ätzung und weist daher die größte Abweichung mit $0,1 \mu\text{m}$ Überätzung auf (vgl. Tabelle 6.13).

Tabelle 6.13: Grubenätzung im Unterteil der SU8-Variante

Wafer #	Ø Grubenätzung in μm	Zielwert der Grubenätzung in μm
1-SU8-V2f	3,74	3,64
2-SU8-V2f	3,64	3,64
3-SU8-V2f	3,65	3,64
4-SU8-V2f	3,69	3,64
5-SU8-V5g	3,66	3,64
6-SU8-V5g	3,66	3,64
7-SU8-V5g	3,66	3,64
8-SU8-V5g	3,66	3,64
9-SU8-V5g	3,65	3,64

Nach dieser Grubenätzung konnte ebenfalls ein Defektbefall des Ätzgrundes beobachtet werden. Dieser Defektbefall spiegelt sich in kleinen „quadratischen Erscheinungen“ wider. Die Abmessung eines Defektes kann anhand der REM-Aufnahme (Abbildung 6.4) mit $15\ \mu\text{m} \times 15\ \mu\text{m}$ abgeschätzt werden.

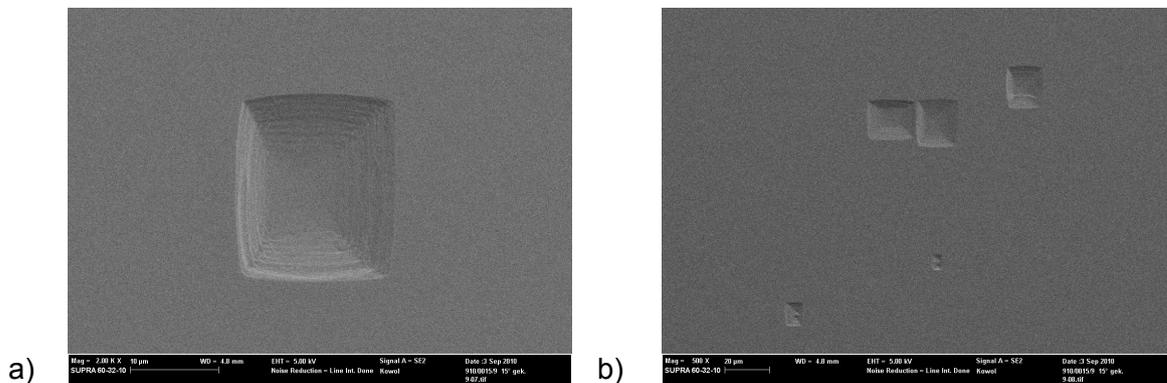


Abbildung 6.4: REM-Aufnahmen der "quadratischen Erscheinungen"

Das Auftreten der Ätzfehler ist im Randbereich der Wafer am höchsten und nimmt zur Mitte hin ab (siehe Abbildung 6.5). Um den prozentualen Befall der Wafer durch die „quadratischen Erscheinungen“ abschätzen zu können, wurden alle Defekte auf einem Chip gezählt und im Vergleich zur Gesamtfläche abgewogen. Die Zählung der Defekte erfolgte dabei am Chip D5 des Wafers #9 und #8 mittig zwischen dem Randbereich und der Mitte des Wafers. Im Mittel traten 550 Defekte auf. Die Abmessung der Grube beträgt gemäß der Ätzmaske $6620\ \mu\text{m} \times 6620\ \mu\text{m}$ und ergibt demnach eine Grubenfläche von $43,82\ \text{mm}^2$. Die Fläche aller Defekte in einer Grube kann folglich durch $550 \times 15\ \mu\text{m} \times 15\ \mu\text{m}$ zu $0,12\ \text{mm}^2$ berechnet werden. Im Vergleich zur Gesamtfläche entspricht dies lediglich $0,35\ \%$. Allerdings konnte mit Messungen¹³ gezeigt werden, dass diese Defekte teilweise bis zu $0,4\ \mu\text{m}$ tief sind. Inwieweit sich dies auf die optischen Eigenschaften auswirkt, muss in folgenden Tests überprüft werden. Da diese Defekte nicht mehr rückgängig zu machen waren, wurde die Herstellung der Unterteile fortgesetzt. Bei der Strukturierung des Isolatorstapels der SFB-Variante wurde das Trockenätzen mit anschließenden nasschemischen Ätzen eingesetzt. Während der nasschemischen Ätzung war die Haftung der Lackmaske auf den PE-Schichten nicht mehr ausreichend, so dass diese teilweise abgeätzt und auch unterätzt wurden. Infolgedessen wurden die PE-Schichten unterschiedlich stark angeätzt und die Isolatorwirkung zwischen Aluminiumschirm und -elektrode zerstört. Aus diesem Grund wird bei der Strukturierung der Isolatorstapel der SU8-Variante eine andere Herangehensweise gewählt. Zuerst wird das Oxid, welches sich unter dem Aluminiumschirm befindet, nasschemisch strukturiert.

¹³ Alphastep 500 Surface Profilometer von KLA Tencor

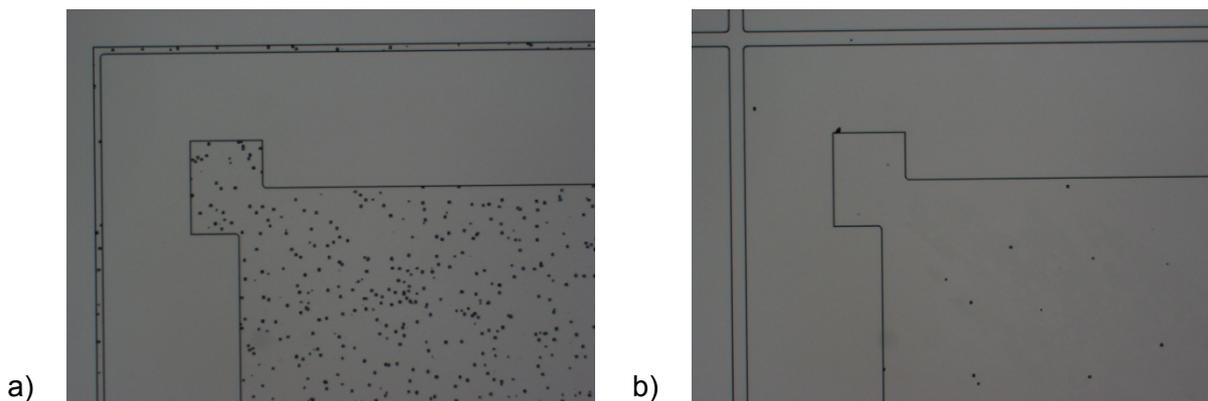


Abbildung 6.5: Vergleich des Defektbefalls zwischen a) Randchip D1 zu b) Mittenchip D5

Daraufhin folgt die ganzflächige Abscheidung und Strukturierung des Aluminiumschirmes, welcher mit der gleichen Zieldicke von $0,2\ \mu\text{m}$ wie bei den Unterteilen der Direktbond-Variante angestrebt worden ist. Die erreichte Dicke des Aluminiumschirmes beträgt im Mittel $0,18\ \mu\text{m}$ und weist eine Rauigkeit von $3\ \text{nm}$ auf (vgl. Tabelle 6.14).

Tabelle 6.14: Dicke und Rauigkeit des Aluminiumschirmes im Unterteil der SU8-Variante

Wafer #	Ø Dicke des Al-Schirmes in μm	Zielwert in μm	Ø Rauigkeit des Al-Schirmes in nm
1-SU8-V2f	0,18	0,20	3,2
2-SU8-V2f	0,17	0,20	3,6
3-SU8-V2f	0,18	0,20	3,2
4-SU8-V2f	0,17	0,20	3,2
5-SU8-V5g	0,18	0,20	2,4
6-SU8-V5g	0,18	0,20	2,4
7-SU8-V5g	0,18	0,20	2,8
8-SU8-V5g	0,18	0,20	2,6
9-SU8-V5g	0,18	0,20	3,1

Auf dem Aluminiumschirm folgt wie bei der SU8-Variante die Abscheidung der PE-Schichten bestehend aus $1\ \mu\text{m}$ PE-Oxid und $0,2\ \mu\text{m}$ PE-Nitrid. Diese werden anschließend nur mittels Trockenätzen strukturiert, was mit guten Ergebnissen bezüglich der Strukturierung einhergeht. Nach der erfolgreichen Strukturierung der PE-Stapel wird die Aluminiumelektrode mit einer Zieldicke von $1\ \mu\text{m}$ aufgesputtert. Die erzielte Elektrodendicke beträgt durchschnittlich $0,86\ \mu\text{m}$ und liegt damit unterhalb des Zielwertes (vgl. Tabelle 6.15). Da der Isolatorstapel bei der Strukturierung nicht angegriffen worden ist, ergibt sich bei dieser Variante ein elektrostatischer Stapel von durchschnittlich $3,86\ \mu\text{m}$. Bei einer angestrebten Zieldicke von $3,9\ \mu\text{m}$ kann diese Stapeldicke als sehr gut bezeichnet werden. Grundlegend muss-

te jedoch von einer geringeren Dicke des elektrostatischen Stapels ausgegangen werden, da sich die geringeren Dicken von Aluminiumschirm und -elektrode negativ auf die Gesamthöhe des Stapels auswirken. In Messungen konnte aber gezeigt werden, dass die PE-Schichten, welche mit 1,5 μm veranschlagt worden, mit 1,65 μm abgeschieden worden sind. Dies führt dazu, dass trotz des dünneren Aluminiumschirms und der dünneren Aluminiumelektrode der gesamte elektrostatische Stapel nah am Zielwert liegt. Demzufolge kann der bewegliche Reflektorträger mit der geringeren berechneten Steuerspannung ausgelenkt werden. Die Isolatorwirkung des PE-Stapels konnte in der Kurzschlussüberprüfung mit sehr guten Ergebnissen bestätigt werden, es trat nahezu kein Kurzschluss zwischen Aluminiumschirm und -elektrode auf.

Tabelle 6.15: Dicke der Aluminiumelektrode und des elektrostatischen Stapels der Unterteile der SU8-Variante

Wafer #	Ø Dicke der Al-Elektrode in μm	Zielwert in μm	Ø Dicke elektrostatischer Stapel in μm	Zielwert in μm
1-SU8-V2f	0,89	1,00	3,88	3,90
2-SU8-V2f	0,84	1,00	3,85	3,90
3-SU8-V2f	0,86	1,00	3,85	3,90
4-SU8-V2f	0,86	1,00	3,87	3,90
5-SU8-V5g	0,86	1,00	3,86	3,90
6-SU8-V5g	0,87	1,00	3,86	3,90
7-SU8-V5g	0,86	1,00	3,86	3,90
8-SU8-V5g	0,87	1,00	3,85	3,90
9-SU8-V5g	0,87	1,00	3,88	3,90

6.2.3 Beschichtung der optischen Schichten in Jena

Die Vermessung des BRAGG-Reflektors der V2f-Variante ergab Schichtdicken von durchschnittlich 3,49 μm und liegt damit 20 nm unter dem theoretischen Wert des V2f-Schichtdesigns. Das optische Design V5g weist mit einer durchschnittlichen Stapeldicke von 3,66 μm nur eine Abweichung von 20 nm von der Zieldicke auf. Im Vergleich zur Direktbond-Variante zeigt die optische Kontrolle der beschichteten Wafer der SU8-Variante einen geringeren Partikelbefall und geringere Defekte im optischen Schichtstapel. Die fehlerhafte Justage tritt erneut vermehrt in den Unterteil- vereinzelt aber auch in den Oberteilwafern auf. Kritisch ist wieder die Justage der BRAGG-Reflektoren auf den Unterteilwafern zu bewerten, da diese, wie in Abbildung 6.6 a) zu erkennen, teilweise auf der Elektrode und vermehrt auf dem Isolatorstapel abgeschieden worden sind. Bei den Oberteilwafern ist die ARC-Beschichtung als heikel anzusehen, da diese partiell außerhalb der Grube auf dem Silizium stattgefunden hat (vgl. Abbildung 6.6 b)). Dies kann im schlimmsten Fall dazu führen, dass der Effekt zur

Vermeidung von Sticking durch das Vergraben der ARC-Stapel gemindert wird. In der Annahme, dass der ARC-Stapel nicht komplett vergraben wird, sondern auf dem Silizium der Oberseite abgedeckt ist, kann dies während der Bondung oder Vereinzlung zu einem vollständigen Auslenken des oberen Reflektorträgers und damit zum Sticking führen. Demzufolge muss auf eine bessere Justage der optischen Schichten geachtet werden. Die Oberseite wafer #8 und #9 sowie die Unterteilwafer #4, #8 und #9 konnten im Verlauf dieser Arbeit noch nicht mit den optischen Schichtstapeln beschichtet werden und werden daher nicht in Tabelle 6.16 aufgeführt. Der Unterteilwafer #3 ist während der Beschichtung, Unterteilwafer #2 bereits während der Präparation gebrochen, so dass diese nicht mehr für die Bondung zur Verfügung stehen.

Tabelle 6.16: Auswertung der optischen Beschichtung der SU8-Variante (OS: Defekte in optischer Schicht, P: Partikel auf optischer Schicht, Justagebewertung: sehr gut = 1, gut = 2, ok = 3, schlecht = 4, sehr schlecht = 5)

Wafer #	Ø Dicke des BRAGG in μm	Zielwert in μm	Justage BRAGG / ARC	Defekte – Partikel BRAGG / ARC
OT-1-SU8-V2f	3,51	3,51	gut / ok	3xOS 9xP / 2xOS 3xP
OT-3-SU8-V2f	3,50	3,51	sehr gut / schlecht	1xOS 8xP / 1xOS 3xP
OT-4-SU8-V2f	3,47	3,51	gut / ok	2xOS 3xP / 1xOS 1xP
OT-5-SU8-V5g	3,66	3,64	sehr gut / ok	2xOS 8xP / 1xOS 1xP
OT-6-SU8-V5g	3,65	3,64	gut / ok	0xOS 7xP / 1xOS 6xP
OT-7-SU8-V5g	3,68	3,64	gut / ok	4xOS 7xP / 2xOS 3xP
UT-1-SU8-V2f	3,49	3,51	ok / ok	0xOS 0xP / 0xOS 4xP
UT-2-SU8-V2f	3,47	3,51	ok / ok	1xOS 4xP / 2xOS 4xP
UT-3-SU8-V2f	--	--	--	--
UT-5-SU8-V5g	3,64	3,64	schlecht / sehr gut	2xOS 3xP / 1xOS 3xP
UT-6-SU8-V5g	3,67	3,64	sehr schlecht / ok	2xOS 3xP / 2xOS 5xP
UT-7-SU8-V5g	3,66	3,64	schlecht / ok	1xOS 9xP / 1OS 14xP

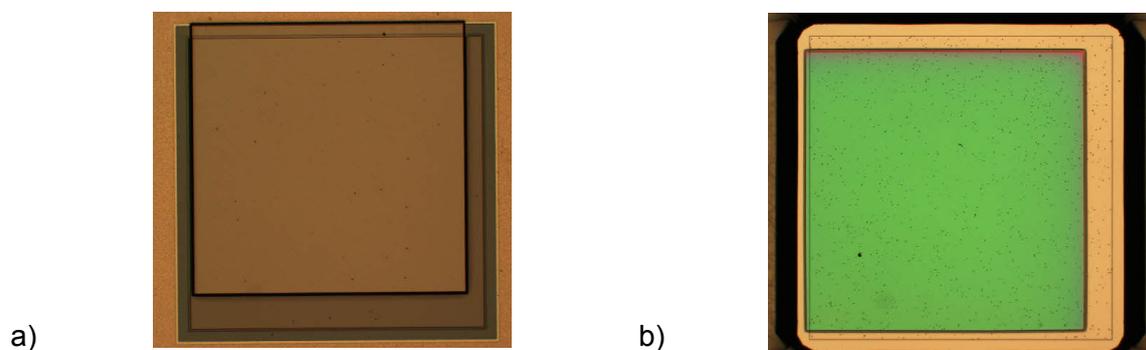


Abbildung 6.6: Schlechte Justage in der a) BRAGG-Beschichtung auf dem Unterteil, b) ARC-Beschichtung auf dem Oberteil

6.2.4 Zusammenfassung

Wie bei den Ober- und Unterteilen der Direktbond-Variante ist auch bei den Ober- und Unterteilen der SU8-Variante die Einhaltung der Ätztiefen für die unterschiedlichen Ätzungen und der Schichtdicken der Schichtabscheidungen von oberster Wichtigkeit, um die optimale Funktionsweise der FPI zu gewährleisten. Ebenso sollten hier der optische und der elektrostatische Abstand mit den berechneten Werten übereinstimmen. Ein großer Vorteil der SU8-Variante gegenüber der Direktbond-Variante ist, dass der optische Abstand auch noch am Ende der Präparation durch das SU8 korrigiert werden kann.

Der optische Abstand

Zur Berechnung des optischen Abstandes (vgl. Formel 6.3) fließen bei der SU8-Variante die Ätzung im Ober- und im Unterteil, die SU8-Rahmenhöhe, die Dicke des Oxid-Nitrid-Stapels auf dem Bondrahmen sowie die Schichtabscheidung des BRAGG-Reflektors ein. Die Dicke des SU8-Rahmens ist im Bondprozess noch beliebig veränderbar, so dass der optische Spalt auch noch am Ende der Prozesskette definiert eingestellt werden kann. Daher erfolgt hier nicht die Berechnung des optischen Spaltes, sondern die Berechnung der SU8-Dicke. Der optische Spalt wird hierbei als fester Parameter mit einbezogen. (vgl. Formel 6.4)

$$d_{\text{optisch}} = d_{\text{Ätzung OT}} + d_{\text{Ätzung UT}} + d_{\text{SU8}} + d_{\text{Oxid-Nitrid Stapel}} - (2 \cdot d_{\text{BRAGG}}) \quad (6.3)$$

$$d_{\text{SU8}} = d_{\text{optisch}} + (2 \cdot d_{\text{BRAGG}}) - d_{\text{Ätzung OT}} - d_{\text{Ätzung UT}} - d_{\text{Oxid-Nitrid Stapel}} \quad (6.4)$$

Somit kann beispielsweise die zu große Ätzung im Unterteil bei Wafer #1 durch einen dünneren SU8-Rahmen kompensiert werden. Demzufolge muss bei Wafer #1 nur ein Bondrahmen mit einer Dicke von 4,72 μm realisiert werden, um den optischen Abstand von 5,44 μm zu gewährleisten (vgl. Tabelle 6.17). Die Wafer #2 und #3, welche keine große Abweichung der Ätzungen vom Zielwert aufweisen, benötigen einen 4,8 μm hohen Bondrahmen. Bei den Wafern #5 bis #9 der V5g-Variante können die SU8-Bondrahmen aufgrund der homogenen Verteilung der Ätzungen und Schichtabscheidungen einheitlich mit 4,87 μm angestrebt werden. Die großen Abweichungen vom Zielwert 5 μm sind in der Schichtabscheidung des Isolatorstapels begründet.

Tabelle 6.17: Ermittlung der SU8-Dicke für den festen optischen Abstände der möglichen SU8-Verbunde (Abweichungen vom Zielwert in nm)

Wafer #	Ø opt. Abstand in µm	Ø BRAGG in µm	Ø Ätzung OT in µm	Ø Ätzung UT in µm	Ø Isolatorstapel in µm	Ø Dicke SU8 in µm
Ziel V2f	5,44	3,51	1,12	3,64	2,70	5,00
1-SU8-V2f	5,44	3,49 (-20)	1,12 (±0)	3,74 (+100)	2,84 (+140)	4,72 (-280)
2-SU8-V2f	5,44	3,49 (-20)	1,13 (+10)	3,64 (±0)	2,85 (+150)	4,80 (-200)
3-SU8-V2f	5,44	3,49 (-20)	1,12 (±0)	3,65 (+10)	2,84 (+140)	4,81 (-190)
4-SU8-V2f	5,44	3,49(-20)	1,13 (+10)	3,69 (+50)	2,85 (+150)	4,75 (-250)
Ziel V5g	5,37	3,64	1,30	3,64	2,70	5,00
5-SU8-V5g	5,37	3,66(+20)	1,31 (+10)	3,66 (+20)	2,85 (+150)	4,87 (-130)
6-SU8-V5g	5,37	3,66(+20)	1,30 (±0)	3,66 (+20)	2,86 (+160)	4,87 (-130)
7-SU8-V5g	5,37	3,66 (+20)	1,30 (±0)	3,66 (+20)	2,85 (+150)	4,88 (-120)
8-SU8-V5g	5,37	3,66 (+20)	1,32 (+20)	3,66 (+20)	2,84 (+140)	4,87 (-130)
9-SU8-V5g	5,37	3,66 (+20)	1,31 (+10)	3,65 (+10)	2,85 (+150)	4,88 (-120)

Der elektrostatische Abstand

Bei der Berechnung des elektrostatischen Abstandes (vgl. Formel 6.5) werden dagegen nur die Ätzung im Unterteil, der Oxid-Nitrid-Stapel auf dem Bondrahmen, die SU8-Rahmenhöhe und der elektrostatische Stapel einbezogen.

$$d_{\text{elektrostatisch}} = d_{\text{Ätzung UT}} + d_{\text{Oxid-Nitrid Stapel}} + d_{\text{SU8}} - d_{\text{elektrostatischer Stapel}} \quad (6.5)$$

Die Höhe des SU8-Rahmens ist durch die Definition des optischen Abstandes vorgegeben. Aufgrund der Tatsache, dass die Isolatorschichten nicht wie bei der Direktbond-Variante angeätzt worden sind, konnte der gesamte elektrostatische Stapel sehr gut realisiert werden. Gemäß Tabelle 6.18 zeigen die Wafer #3, #4 und #8 mit 50 nm die größte Abweichung von der Zieldicke 3,9 µm. Der elektrostatische Abstand kann unter Einhaltung der an den optischen Abstand angepassten SU8-Dicke bei der V2f-Variante mit 7,42 bis 7,45 µm und bei der V5g-Variante mit 7,50 bis 7,53 µm bemessen werden. Demzufolge kann das Durchstimmen der SU8-FPI bei geringerer Steuerspannung hinsichtlich des elektrostatischen Abstandes als unproblematisch eingestuft werden.

Tabelle 6.18: Ermittlung des elektrostatischen Abstandes der möglichen SU8-Verbunde (Abweichungen vom Zielwert in nm)

Wafer #	Ø Ätzung UT in µm	Ø Isolator- stapel in µm	Ø Dicke SU8 in µm	Ø elektrost. Stapel in µm	Ø elektrost. Abstand in µm
Ziel V2f	3,64	2,70	5,00	3,90	7,44
1-SU8-V2f	3,74 (+100)	2,84 (+140)	4,72 (-280)	3,87 (-20)	7,42 (-20)
2-SU8-V2f	3,64 (±0)	2,85 (+150)	4,80 (-200)	3,85 (-50)	7,44 (±0)
3-SU8-V2f	3,65 (+10)	2,84 (+140)	4,81 (-190)	3,85 (-50)	7,45 (+10)
4-SU8-V2f	3,69 (+50)	2,85 (+150)	4,75 (-250)	3,87 (-30)	7,42 (-20)
5-SU8-V5g	3,66 (+20)	2,85 (+150)	4,87 (-130)	3,86 (-40)	7,52 (+80)
6-SU8-V5g	3,66 (+20)	2,86 (+160)	4,87 (-130)	3,86 (-40)	7,53 (+90)
7-SU8-V5g	3,66 (+20)	2,85 (+150)	4,88 (-120)	3,86 (-40)	7,53 (+90)
8-SU8-V5g	3,66 (+20)	2,84 (+140)	4,87 (-130)	3,85 (-50)	7,52 (+80)
9-SU8-V5g	3,65 (+10)	2,85 (+150)	4,88 (-120)	3,88 (-20)	7,50 (+60)

7 Bonden der FPI

Das Bonden der FPI erfolgt in zwei Varianten, mit dem Negativfotoresist SU8 und per Direktbond im unteren Temperaturregime. Beide Varianten erfordern unterschiedliches Vorgehen und Verfahren zur Vorbehandlung. Das adhäsive Bonden hat sich bereits in früheren Prozessdurchläufen etabliert, das Direktbonden konnte schon an der FPI-Variante mit zwei beweglichen Reflektorträgern erfolgreich eingesetzt werden.

7.1 Vorversuche zur SU8-Bondfestigkeit

Das für die aktuell gefertigten FPI verwendete Bondmaterial ist das Negativfotoresist SU8 der Firma MICRO-CHEM. Das Fotoresist SU8 besteht aus einem Lösungsmittel, dem darin gelöstem Epoxidharz sowie einem Fotoiniatorsalz. Die Konzentration des Lösungsmittels ist kennzeichnend für die Viskosität des Resists. Demzufolge kann die Viskosität definiert eingestellt und es können beispielsweise in einem Schritt Schichtdicken von mehr als 200 µm Resist realisiert werden. Die Vernetzung der Resistmoleküle wird bei einem Negativresist durch die Belichtung gestartet. Der im SU8 enthaltene Fotoiniator ist ein lichtempfindliches Salz, das im UV-Licht Säure freisetzt. Diese freigesetzte Säure ermöglicht die Vernetzung der Moleküle im SU8. Als Resultat entsteht eine matrixartige, chemisch und thermisch sehr stabile Struktur. Die unbelichteten und damit unvernetzten Bereiche sind in einem geeigneten Lösungsmittel löslich. Hohes Auflösungsvermögen, hohe Lichtempfindlichkeit, gute Haftung und Entfernbare sind Anforderungen, die an Fotoresiste gestellt werden. Des Weiteren muss das Resist frei von Verunreinigungen sein, sodass Fehler bei der Beschichtung oder Belichtung vermieden werden können. [Kan05]

Trotz des Einsatzes des SU8-Bondens bei dem alten FPI-Design traten beim Bonden teilweise Bondfehler auf. So lösten sich beispielsweise gebondete Chips nach dem Sägen und Vereinzeln, die nach dem Bonden eine nahezu perfekte Bondung aufwiesen. Ein weiterer Einflussfaktor stellt das Relief des Unterteils dar, auf dem das Bondmedium aufgeschleudert wird. Aufgrund des Reliefs sind die Kanten des SU8-Bondrahmens nicht scharfkantig, was eine abgerundete Form der Ecken zur Folge hat und dementsprechend die Bondfläche verringert.

Zur Verminderung der Bonddefekte und damit zur Erhöhung der Ausbeute werden Vorversuche bezüglich der SU8-Bondfestigkeit durchgeführt. Dazu wurde im Vorfeld eine Literaturrecherche ausgeführt, um Parameter für das Bonden und Testverfahren für die Bestimmung der Bondfestigkeit zu ermitteln.

Derartige Untersuchungen wurden bereits an SU8-Rahmenstrukturen in [Wie06] durchgeführt, mit dem Ziel, adhäsiv mit geringsten Dicken der Zwischenschicht zu bonden. Diese geringen Abstände sind beispielsweise bei kapazitiven Sensoren vonnöten, da elektrostatische Abstände von 10 μm und mehr nicht akzeptabel bezüglich der Steuerspannung sind. Dazu sind Testverbunde mit SU8-Dicken von 2 bis 8 μm und Rahmenbreiten von 750 μm gefertigt worden, um den Einfluss der Resistdicke auf die Festigkeit der Bondung zu untersuchen. Weiterhin erfolgte eine Überprüfung der Prozessparameter hinsichtlich der Bondtemperatur zwischen 100 und 120 $^{\circ}\text{C}$. Der Bonddruck betrug bei den Versuchen 3 bar, um stets ausreichenden Kontakt zwischen der SU8-Rahmenstruktur und dem Bondpartner zu gewährleisten. Als Resultat der Bondversuche zeigt sich beispielsweise, dass der Verbund mit 6 μm dicken SU8 und einer Bondtemperatur von 120 $^{\circ}\text{C}$ eine sehr gute Bondung aufweist, keine Fehlstellen im SU8 vorliegen und ebenfalls eine gute Kontaktbildung zwischen den beiden Wafern und dem SU8 existiert. Bei dem Testverbund mit nur 2 μm dicken SU8 konnten viele Fehlstellen im SU8 festgestellt werden. Um die Ergebnisse der einzelnen Versuchsverbunde zu evaluieren, wurden die Bondverbindungen einer mechanischen Festigkeitsüberprüfung unterzogen. Mittels einer Zugprüfmaschine konnten Zugkräfte bis maximal 20 N geprüft werden. Viele Chips brachen im Bereich zwischen Chip und Chiphalterung, was auf eine viel höhere Festigkeit der Bondverbindung gegenüber der Festigkeit des Klebers zwischen Halterung und Chip zurückzuführen ist. Berechnungen der Struktur ergaben akzeptable Bondfestigkeiten von über 2 MPa.

In [Pan02] wurde eine komplette Versuchsreihe von unterschiedlich strukturierbaren Materialien für das adhäsive Bonden durchgeführt. Dabei kamen die Materialien SU8, das Positivfotoresist AZ-4620 der Firma Shipley, das Negativfotoresist JSR-137N der Firma Japan Synthesis Rubber Co und das Positivfotoresist SP-341 der Firma Toray Co zum Einsatz. Als Ausgangsmaterial dienten zwei einseitig polierte 4"-Wafer, auf denen das jeweilige Material in Form von Bondpads mit einer Größe von 0,25 cm^2 realisiert worden ist. Die Chipgröße betrug 1 cm^2 und die Bondfestigkeit wurde ebenfalls mit einer Zugprüfmaschine experimentell ermittelt. Die Versuchsreihe der Verbunde gliedert sich in die Optimierung der Temperatur und der Bondkraft. Für die Bestimmung der optimalen Bondtemperatur wurden alle Verbunde mit der gleichen Bondkraft von 50 N bei Temperaturen von 50 bis 150 $^{\circ}\text{C}$ gebondet. Das beste Ergebnis mit einer maximalen Bondfestigkeit von 20,6 MPa bei 90 $^{\circ}\text{C}$ konnte die Bondung SU8 mit einer Dicke von 10 μm aufweisen. Die anderen Materialien erreichten maximal 12 MPa bei Bondtemperaturen zwischen 80 und 100 $^{\circ}\text{C}$. Die aus der ersten Versuchsreihe erhaltenen optimalen Werte für die Bondtemperatur wurden als Grundlage für die Testreihe der Bondkraft herangezogen. So wurden die Materialien bei den optimalen Bondtemperaturen mit unterschiedlichen Bondkräften zwischen 30 und 100 N gebondet. Das SU8 zeigte

erneut exzellente Ergebnisse gegenüber den anderen drei Materialien und resultierte in Festigkeiten der Bondverbindung von 20 MPa. Die Versuchsreihe zeigt, dass SU8 das Beste der vier Materialien für adhäsives Bonden ist und maximale Bondfestigkeiten von 20,6 MPa ermöglicht.

[Nor05] legt Ergebnisse bezüglich der Bondfestigkeit von SU8 und Gold dar. Zum Vergleich der Resultate werden Ergebnisse der Bondverbindung von SU8 und Silizium herangezogen. Versuche zwischen SU8 und Gold resultieren in Festigkeiten von 4,8 MPa. Der Vergleichswert von SU8 und Silizium liegt bei 20,7 MPa bei einer 7,5 µm dicken SU8-Fläche von 5 x 7 mm². In dieser Veröffentlichung ist das Prinzip des Zugtests ausführlich beschrieben.

In anderen Veröffentlichungen [Bil03, Tia05] wird das Bonden von SU8 mit Glas und PMMA untersucht. Bei PMMA und SU8 kann die maximal erreichbare Bondfestigkeit von 16 MPa bei 110 °C und 2 kN erreicht werden. Die Dicke des SU8 beträgt dabei 10 µm. Bei Bondungen von Glas und SU8 können maximal 20,93 MPa bei 105 °C und 60 µm SU8-Dicke realisiert werden.

7.1.1 Realisierung der Bondmuster

Auf der Grundlage der in [Wie06] und [Pan02] verdeutlichten Versuchsreihen wird für die FPI ebenfalls eine Versuchsreihe angestrebt. In dieser Versuchsreihe werden neben den drei Bondtemperaturen 90, 105 und 120 °C auch zwei unterschiedliche Bonddrücke 1 und 3 bar untersucht. Dabei erfolgt zunächst die Überprüfung der realen, an den Ecken stark abgerundeten SU8-Rahmenstruktur. Dies resultiert in den in Tabelle 7.1 dargestellten sechs Testverbunden.

Tabelle 7.1: Varianten der SU8-Testverbunde mit abgerundeten Rahmenprofil

Variante	1	2	3	4	5	6
Bonddruck p in bar	1	3	1	3	1	3
Bondtemperatur T in °C	90	90	105	105	120	120

Die prozesstechnische Realisierung der sechs Testverbunde mit identischer SU8-Rahmenstruktur wie bei den realen FPIs, stimmt in den Schritten zur Herstellung der Grube und in den Schritten der Schichtabscheidungen des Oxid-Nitrid-Stapels mit den realen FPI weitestgehend überein. Die Ätzung der Grube ist von großer Bedeutung, da durch diese Grube das Relief entsteht. Aufgrund dieses Reliefs können sich beim Aufschleudern und der Entwicklung vom SU8 keine scharfen Kanten bilden. Es entstehen abgerundete Ecken des SU8-Rahmenprofils. Als Verdeutlichung dient Abbildung 7.1, in der eine reale FPI-Unterteilstruktur mit aufgeschleudertem SU8 zu erkennen ist. Es sind schematisch die Verrundungen

der Ecken im SU8 dargestellt. Wird das SU8 belichtet und entwickelt, bleiben ebendiese abgerundeten Bondrahmen stehen.

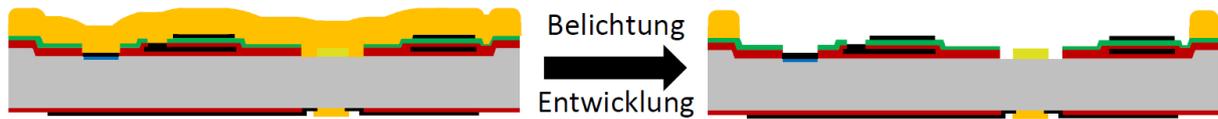


Abbildung 7.1: FPI-Unterteil mit aufgeschleuderten SU8 und SU8-Bondrahmen nach Belichtung/Entwicklung

Diese abgerundeten Ecken vermindern die mögliche Auflagefläche vom Oberteil auf dem Bondrahmen, was in einer geringeren Bondungsfläche und somit in einer geringeren Bondfestigkeit resultiert. Messungen zu diesem Phänomen ergaben, dass die Abrundung der Ecken ca. 230 μm des 920 μm breiten Bondrahmens pro Seite betragen. Demzufolge beträgt die tatsächliche Bondungsfläche nur ca. 50 % des eigentlichen Bondrahmens. Die Herstellung der Unterteile für die Bondtests ist in Tabelle 7.2 verdeutlicht. Als Oberteile dienen einseitig polierte 4"-Siliziumwafer.

Tabelle 7.2: Prozesstechnische Realisierung der Unterteile der SU8-Testverbunde

	4"- Wafer einseitig poliert und oxidiert
	Vorderseitenstrukturierung der Maskierungsschicht SiO_2 ; Si-KOH -Ätzen der Grube; Definierung des Bondrahmens
	Abscheidung der PE-Schichten
	Aufschleudern und Strukturieren des SU8-Bondrahmens

7.1.2 Charakterisierung der Bondmuster

Entsprechend den Geometrievorgaben der SU8-FPI und um möglichst realistische Bedingungen für die Überprüfung der Bondfestigkeit zu schaffen, wird auch bei den Testverbunden eine Grube von 3,64 μm in die Unterteile geätzt. Tabelle 7.3 verdeutlicht die erzielte Grubentiefe der sechs Verbunde, welche mit 3,67 μm im Mittel gut getroffen worden ist.

Nach der Ätzung der Grube werden die Wafer mit den PE-Schichten beschichtet, um die gleichen Haftungsbedingungen wie bei den realen FPI für das SU8 herzustellen. Daraufhin folgt das Aufschleudern und Strukturieren des SU8. Dabei ist das SU8 mit einer Zieldicke von 5 μm angestrebt worden, konnte jedoch aufgrund von Anlagenproblemen nur mit einer Zieldicke von 4,42 μm realisiert werden. Dennoch genügt dieses Höhenprofil, um die typische Struktur des SU8-Bondrahmens herzustellen. Die Zieldicken des SU8 sind ebenfalls in Tabelle 7.3 hinterlegt.

Tabelle 7.3: Grubenätzung und SU8-Dicke der Bondtests

Wafer #	\varnothing Grubenätzung in μm	Zielwert in μm	\varnothing SU8-Bondrahmen- dicke in μm	Zielwert in μm
1	3,67	3,64	4,41	5,00
2	3,66	3,64	4,47	5,00
3	3,67	3,64	4,44	5,00
4	3,67	3,64	4,40	5,00
5	3,66	3,64	4,42	5,00
6	3,66	3,64	4,37	5,00

Anschließend erfolgt die Bondung der sechs strukturierten Unterteile mit den sechs einseitig polierten Oberteilen nach den jeweiligen Parametern laut Prozessplan. Eine erste Aussage bezüglich der Bondqualität kann direkt nach dem Bonden mittels IR-Durchlicht getroffen werden. Infolgedessen wird jeder Verbund auf Bondfehler hin untersucht und eine Wafermap mit etwaigen Bondfehlern bezogen auf den entsprechenden Chip im Verbund erstellt. Die kompletten Wafermaps der einzelnen Verbunde sind im Anhang B hinterlegt.

Das Vereinzeln der Verbunde mittels Trennschleifen bildet den nächsten Bearbeitungsschritt. Abschließend wird erneut mittels IR-Durchlicht eine Überprüfung der Verbunde vorgenommen. Das Resultat der IR-Überprüfung kann aus Tabelle 7.4 entnommen werden und ermöglicht einen ersten Überblick der Bondqualität der sechs Verbunde. Bereits nach dem Sägeprozess kann eine qualitative Aussage bezüglich der Haftfestigkeit der Verbindung getroffen werden. Im Bereich des Sägeschnittes treten hohe Zug- und Scherbelastungen auf, denen das Bauteil im späteren Einsatz selten ausgesetzt ist. Daher kann bereits nach dem Sägen bei unbeschädigten Chips die Haftfestigkeit qualitativ als ausreichend definiert werden. Tabelle 7.4 entsprechend weisen die Verbunde #3 bis #6 eine sehr gute Haftfestigkeit auf und zeigen zwischen 56 und 65 Gutchips. Verbund #2 kann aufgrund von neun defekten Chips nur als gute Bondung bezeichnet werden, wohingegen Verbund #1 angesichts des sehr hohen Defektbefalls als schlechte Bondung deklariert werden muss.

Tabelle 7.4: Anzahl von Gutchips und Chips mit Fehlern/Defekten der Bondtests nach dem Bonden

Verbund #	Gutchips	Chips mit leichten Bondfehlern	Chips mit massiven Bondfehlern	defekte Chips
1	10	0	0	60
2	51	7	3	9
3	61	5	3	1
4	56	4	10	0
5	60	7	3	0
6	65	5	0	0

Um einen vergleichbaren Parameter der Bondqualität zu erhalten, kann die Bondausbeute berechnet werden. Die Berechnung der Bondausbeute erfolgt nach Gleichung 7.1. Die Anzahl der möglichen Chips entspricht dabei 70.

$$\text{Bondausbeute} = \frac{\text{Anzahl Gutchips}}{\text{Anzahl möglicher Chips}} \quad (7.1)$$

Aufgrund des Einflusses von Bondfehlern auf die Überprüfung der Bondfestigkeit werden für ebendiese Überprüfung nur Gutchips ausgewählt. Demzufolge ergeben sich die in Tabelle 7.5 dargestellten Bondausbeuten nur aus den Gutchips der Verbunde. Dabei ist eindeutig zu erkennen, dass der Verbund #1, mit der geringsten Bondtemperatur von 90 °C und dem geringsten Bonddruck von 1 bar mit 14 % die geringste Bondausbeute von allen Verbunden aufweist. Die Defekte dieses Verbundes sind auf die unzureichende Festigkeit der Bondverbindung zurückzuführen. Das vielversprechendste Ergebnis von rund 93 % Bondausbeute erzielte der Verbund #6 mit der höchsten Bondtemperatur von 120 °C und dem größten Bonddruck von 3 bar. Verbund #2 weist insgesamt neun defekte Chips auf, die sich im Abreißen des Oberteils vom Unterteil zeigen. Die Verbunde #3 bis #5 zeigen ein annähernd ähnliches Verhältnis von Gutchips zu Chips mit Fehlern und resultieren in Bondausbeuten zwischen 80 und 87 %. Demzufolge kann mit Hilfe der Bondausbeute eine weitere Aussage bezüglich der Bondfestigkeit getroffen werden. Es kann demnach davon ausgegangen werden, dass das SU8-Bonden bei einer Bondtemperatur von 90 °C keine ausreichende Bondfestigkeit zwischen beiden Verbindungspartnern ermöglicht, was sich vor allem im sehr schlechten Ergebnis von Verbund #1 widerspiegelt. Der Einfluss des erhöhten Bonddruckes von 1 auf 3 bar liefert immerhin eine höhere Anzahl von Gutchips, weist allerdings immer noch neun defekte Chips auf. Inwieweit sich die Bondfestigkeiten der Verbunde #3 bis #6 unterscheiden, wird in der folgenden Überprüfung der Bondfestigkeit erörtert. Jedoch muss bei der Betrachtung der Bondausbeute auch die Tatsache mit einbezogen werden, dass die

Wafer nicht derart vielen Herstellungsprozesse ausgesetzt waren wie die realen Unterteile und demzufolge bessere Haftungsbedingungen zeigen.

Tabelle 7.5: Bondausbeute der Bondtestverbunde mit realer SU8-Rahmenstruktur

Verbund #	Gutchips	nicht verwendbare Chips	Bondausbeute in %
1	10	60	14,29
2	51	19	72,86
3	61	9	87,14
4	56	14	80,00
5	60	10	85,71
6	65	5	92,86

7.1.3 Vereinzlungstests der Bondmuster

Im Abschnitt 4.3 *Abdichtfolie für den Sägeprozess* wurde auf das Prinzip der strukturierten Zwischenschicht und Abdichtfolie eingegangen. Dieses Prinzip trägt zur Vermeidung des Festklebens des ARC-Schichtstapels bei und verhindert dadurch das Herausreißen des beweglichen Reflektorträgers bei der Vereinzlung. Als Abdichtfolie stehen eine erneute Lage der UV-Folie und Bluetape zur Auswahl. Um abschätzen zu können, welche der beiden Folien die besseren Abdichteigenschaften auf der UV-Folie aufweist, werden Vereinzlungen an den Bondmustern durchgeführt. Daher werden die Verbunde #1 bis #3 mit der strukturierten UV-Folie und einer abschließenden Lage Bluetape versehen, wohingegen die Verbunde #4 bis #6 mit der strukturierten UV-Folie und einer unstrukturierten UV-Folie abgedichtet werden. Nach dem Vereinzeln konnte bei nahezu allen Chips mit dem Folienpaar aus strukturierter UV-Folie und Bluetape das Eindringen von Sägewasser zwischen dem Folienpaar und somit im Chip beobachtet werden. In Abbildung 7.2 a) ist ein mit der strukturierten UV-Folie und Bluetape abgedichteter Chip dargestellt. Es ist deutlich das Aufwölben des Bluetapes an der Schnittkante zu erkennen, was zum Wassereintrich zwischen Bluetape/UV-Folie, und letztendlich zum Wassereintrich im Chip führte. Die Verbunde, die mit strukturierter und einer weiteren Lage der UV-Folie versehen sind, waren dagegen nur vereinzelt vom Wassereintrich betroffen. In Abbildung 7.2 b) ist ein Chip mit dem UV-Folienpaar abgebildet, bei dem der Wassereintrich auftrat. Im Vergleich zur Abbildung 7.a b) fällt die geringere Aufwölbung an der Schnittkante auf, was auf einer viel höheren Haftfestigkeit der UV-Folie im Vergleich zur Haftfestigkeit des Bluetapes auf der UV-Folie schließen lässt. Des Weiteren befand sich nach dem Sägevorgang bei zahlreichen Chips mit Bluetape nur noch die strukturierte UV-Folie auf dem Chip. Das Bluetape hat sich während des Sägevorgangs von der UV-Folie abgelöst.

Aufgrund des nahezu kompletten Wassereintruchs zwischen UV-Folie und Bluetape wird als Abdichtung bei dem Sägeprozess das UV-Folienpaar verwendet. Bei ersten Testverbunden konnte ebenfalls nachgewiesen werden, dass das Ankleben der Abdichtfolie am ARC-Schichtstapel verhindert wird.

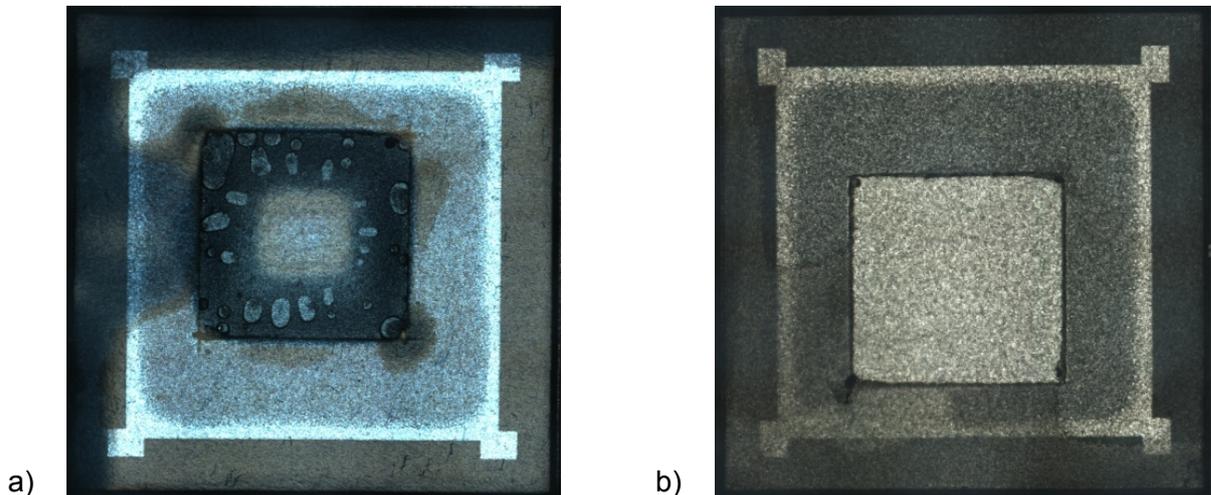


Abbildung 7.2: Wassereintruch zwischen dem Folienpaar **a)** strukturierte UV-Folie/Bluetape und **b)** strukturierte UV-Folie/UV-Folie

7.1.4 Bondfestigkeitsüberprüfung der Bondmuster mit abgerundetem Bondrahmen

Die Ermittlung einer quantitativen Aussage bezüglich der Haftfestigkeit der Verbindung kann nur durch Zerstörung des Verbundes geschehen. Die Überprüfung der Bondfestigkeit ist in den Quellen [Wie06, Nor05, Pan02] mittels Zugversuch durchgeführt worden. Allerdings stellt der Zugversuch an gebondeten Verbunden kein optimales Prüfverfahren dar. Das Einkleben der Prüfkörper an die Zugstempel kann nicht als unproblematisch angesehen werden. Dementsprechend können hier bereits Verdrehungen und Verkipfung der Zugstempel zueinander eintreten. Durch das Einspannen der Zugstempel in die Prüfmaschine können Vorkräfte auftreten, welche die Probe vorschädigen. Dies führt zu Ergebnissen die keine aussagekräftige Beurteilung der Bondfestigkeit erlauben. Eine gute Alternative stellt daher der Scherversuch dar. Bei dem Scherversuch können die Schwachpunkte wie Verkippen und Vorschädigung der Probe umgangen werden, auch erfolgt durch die bewegliche Lagerung des oberen Prüfstempels eine Selbstjustage, was die Verdrehung verhindert. Das Prinzip des Scherversuches ist in Abbildung 7.3 verdeutlicht. Dazu wird der gebondete Chip in die Schervorrichtung der Prüfmaschine¹⁴ eingelegt. Der Verbund ist dabei durch zwei 525 µm dicke Si-Wafer gekennzeichnet. Der untere Teil der Schervorrichtung ist beweglich gelagert und ermöglicht so das optimale Abscheren des Chipoberteils vom Chipunterteil. Wird die Schervorrichtung mit

¹⁴ TIRA Test 2805

einer Kraft beaufschlagt, führt dies zum Herunterdrücken des Druckstempels. Der Kräfteintrag erfolgt stetig, bis das Ober- vom Unterteil abgeschert und die Bondung zerstört ist.

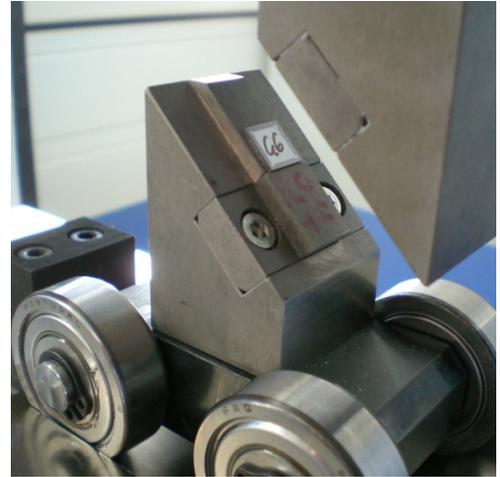


Abbildung 7.3: Schervorrichtung

In Abbildung 7.4 ist ein gescherter Chip dargestellt. Dabei entspricht der linke Teil dem Ober- und der rechte Teil dem Unterteil des gebondetem Chips. Es ist deutlich auf dem Unterteil der Bondrahmen zu erkennen, der aus dem abgeschiedenen PE-Stapel und dem aufgeschleuderten SU8 besteht. Die Scherung ist bei diesem Chip vertikal durchgeführt worden. Das Abscheren resultiert im partiellen Abreisen des SU8-Rahmens, weswegen sich auch SU8-Bondrahmenteile auf dem Oberteil befinden. Bei der Abscherung sind nur vereinzelt Chips gebrochen, was auf das Abscheren des SU8-Bondrahmens zurückzuführen ist.

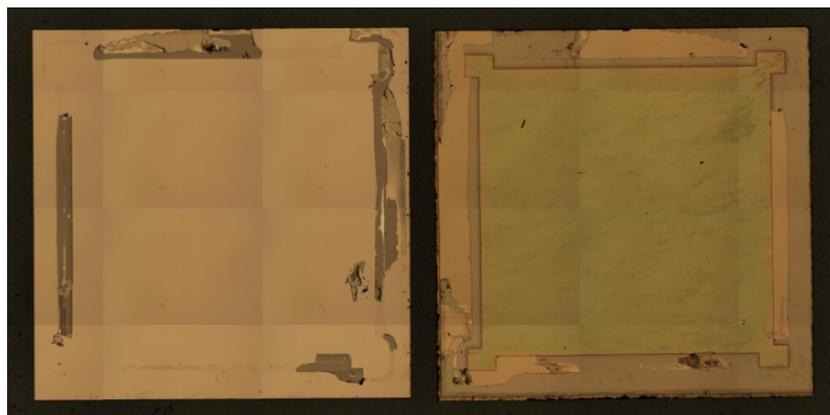


Abbildung 7.4: Scherversuch – abgeschnittenes Oberteil vom Unterteil mit realer Bondrahmenstruktur

Als Folge liegt eine resultierende Kraft F_{Res} vor, die zum Abscheren des Ober- vom Unterteil notwendig ist und während des Abschervorgangs mit einer Kraftmessdose gemessen wird. Aufgrund des rechtwinkligen Kräftedreiecks und der Winkelbeziehungen in Abbildung 7.5 gilt:

$$F_{Scher} = F_{Res} \cdot \cos(\alpha) \quad (7.2)$$

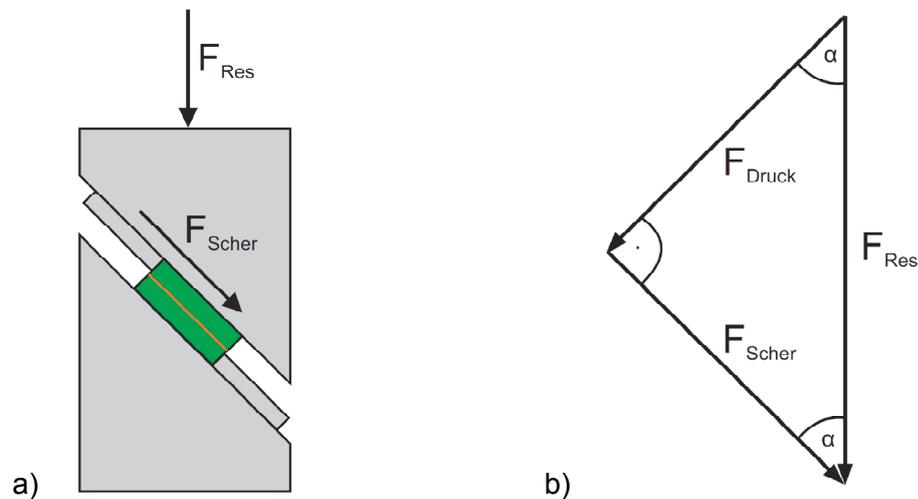


Abbildung 7.5: a) Prinzipdarstellung des Scherversuches b) Kräfte-dreieck beim Scherversuch

Mit Hilfe der Scherkraft F_{Scher} und der Bondfläche A_B kann die Scherfestigkeit τ ermittelt werden. Die Scherfestigkeit τ wird durch die Division von Scherkraft F_{Scher} zum Zeitpunkt der Zerstörung durch die Bondfläche A_B berechnet (vgl. Formel 7.3).

$$\tau = \frac{F_{Scher}}{A_B} \quad (7.3)$$

Die Bondfläche wird dabei mit den realistisch auftretenden 50 % der eigentlichen Bondrahmenfläche angenommen. Demzufolge ergeben sich nach dem Scherversuch folgende in Tabelle 7.6 verdeutlichte Scherfestigkeiten der einzelnen Verbunde. Je Bondverbund sind 20 Chips dem Scherversuch unterzogen worden, um einen aussagekräftigen Mittelwert der Messungen zu erhalten. Ausnahme bildet Verbund #1, bei welchem nach der Vereinzelung lediglich zehn Chips nicht zerstört worden sind.

Anhand der in Tabelle 7.6 veranschaulichten Ergebnisse kann der erste Eindruck der Bondfestigkeit nach dem Sägen bestätigt werden. So zeigt der Verbund #1, bei dem nur zehn Chips während des Sägevorganges nicht zerbrochen sind, die schlechtesten Scherfestigkeiten von durchschnittlich 6,66 MPa. Etwas besser, aber immer noch deutlich unter den Durchschnittswerten der restlichen Verbunde, kann der Verbund #2 eingestuft werden. Dieser Verbund war bereits nach dem Sägen als zweitschlechtesten charakterisiert worden und wies insgesamt neun defekte Chips und vereinzelt Chips mit Bondfehlern auf. Dies schlägt sich in einer Scherfestigkeit von 7,60 MPa nieder. Bei den Verbunden #3 bis #6 konnte nach dem Sägen keine eindeutige Aussage getroffen werden, welcher der Verbunde in der optimalen Bondfestigkeit resultiert. Die vier Verbunde wiesen die annähernd gleichen sehr

guten Ergebnisse auf. Aus dem Vergleich der Scherfestigkeiten in Tabelle 7.6 wird aber nun ersichtlich, dass Verbund #4 die höchsten Werte bezüglich der Scherfestigkeit liefert. So resultiert Verbund #4 in 15,06 MPa im Mittel und in 23,85 MPa als maximale Scherfestigkeit. Eine etwas geringere Scherfestigkeit von durchschnittlich 13,63 MPa erzielt der Verbund #5. Verbund #3 und Verbund #6 zeigen trotz der geringeren Werte immer noch gute Scherfestigkeiten von 10,80 MPa bei Verbund #3 und 12,74 MPa bei Verbund #6.

Tabelle 7.6: Scherkräfte und Scherfestigkeiten der realen SU8-Rahmenstruktur

Verbund #	1 90°C 1bar	2 90°C 3bar	3 105°C 1bar	4 105°C 3bar	5 120°C 1bar	6 120°C 3bar
F_{Scher_max} in N	126,90	169,14	248,44	377,35	350,59	278,69
F_{Scher_min} in N	76,45	86,18	114,01	148,76	136,74	150,56
$F_{Scher_Ø}$ in N	105,33	120,21	170,83	238,26	215,64	201,64
τ_{Scher_max} in MPa	8,02	10,69	15,70	23,85	22,16	17,61
τ_{Scher_min} in MPa	4,83	5,45	7,20	9,40	8,64	9,51
$\tau_{Scher_Ø}$ in MPa	6,66	7,60	10,80	15,06	13,63	12,74

Da es sich bei dem benutzten Verfahren zur Ermittlung der Bondfestigkeit nicht um einen Zugversuch handelt, können die erhaltenen Werte nicht mit denen in der Literatur verglichen werden. Dessen ungeachtet ermöglicht es die Bewertung der Verbunde untereinander. Als wichtigster Aspekt aus dieser Messreihe geht vor allem die Tatsache hervor, dass die bisher angewandten Bondparameter von 1 bar und 105 °C nicht das Optimum bezüglich der Bondfestigkeit darstellen. Demzufolge kann durch die Wahl geeigneterer Bondparameter die Bondfestigkeit um bis zu 50 % erhöht werden.

7.1.5 Bondfestigkeitsüberprüfung der Bondmuster ohne abgerundetem Bondrahmen

Um den Einfluss der Bondfläche zu untersuchen, sind Unterteile hergestellt worden, die keine Grubenätzung aufweisen. Diese Unterteile wurden ebenfalls mit dem PE-Stapel beschichtet, um die gleichen Haftungsbedingungen des SU8-Rahmens wie bei den realen Unterteilen zu gewährleisten. Die Auswahl der Bondparameter fiel auf die der Variante #4 und #5, da diese beiden Parametervarianten in den höchsten Bondfestigkeiten resultieren. Somit wurden zwei Unterteile ohne Grubenätzung vollflächig mit SU8 beschichtet. Aufgrund der nicht vorhandenen Grubenätzung erfolgt keine Abrundung des Rahmenprofils an den Ecken. Es kann demzufolge davon ausgegangen werden, dass die volle Bondbreite mit 920 µm vorliegt. In Abbildung 7.6 ist der Vergleich zwischen beiden SU8-Rahmenprofilen demonstriert. Auf der linken Seite ist deutlich das abgerundete Rahmenprofil der realen FPI zu erkennen.

Es wird ersichtlich, dass lediglich 50 % der eigentlichen Fläche zur Verbindungsbildung beitragen können. Im rechten Teil der Abbildung 7.6 ist das theoretische Rahmenprofil veranschaulicht, welches ohne Grubenätzung entsteht.

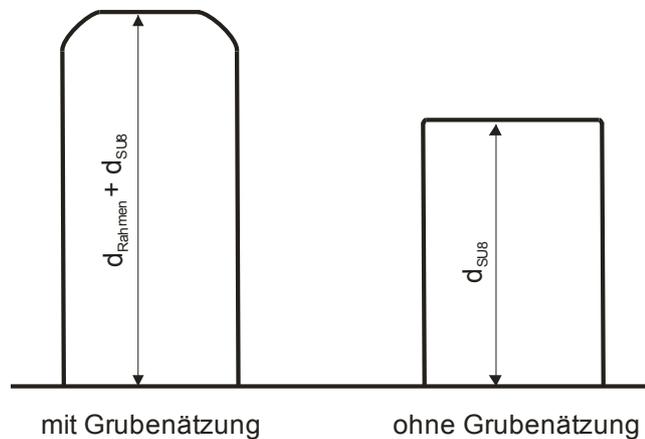


Abbildung 7.6: Vergleich der SU8-Bondrahmen: mit Grubenätzung kann von einer 15,82 mm² Bondfläche – ohne Grubenätzung von einer 31,645 mm² großen Bondfläche ausgegangen werden

Um die beiden neuen Bondtests ebenfalls zu evaluieren, ist der SU8-Bondrahmen auch mit der Zieldicke von 4,3 µm angestrebt worden. Die resultierenden Bondrahmenhöhen betragen 4,38 µm bei Variante #7 und 4,39 µm bei Variante #8. Beide Ergebnisse sind in Tabelle 7.7 hinterlegt.

Tabelle 7.7: Varianten der Bondverbunde mit theoretischen Bondflächen

Variante #	Bonddruck p in bar	Bondtemperatur T in °C	Ø SU8-Bondrahmendicke in µm	Zielwert in µm
7	3	105	4,38	4,30
8	1	120	4,39	4,30

Nach dem Aufschleudern des SU8 folgt abermals die Bondung der zwei Verbunde mit den jeweiligen Parametern. Bereits nach der Bondung kann die erste qualitative Aussage bezüglich der Bondfestigkeit getroffen werden. Beide Verbunde resultieren in sehr guten Ergebnissen (vgl. Tabelle 7.8) und weisen eine homogene Verteilung der Gutchips auf.

Tabelle 7.8: Anzahl von Gutchips und Chips mit Fehlern/Defekten der Bondtests nach dem Bonden

Verbund #	Gutchips	Chips mit leichten Bondfehlern	Chips mit massiven Bondfehlern	defekte Chips
7	60	4	6	0
8	62	3	5	0

Auch nach dem Sägen bestätigt die Bondausbeute die Erwartung an die Verbunde. Beide Verbunde resultieren in sehr guten Ergebnissen bezüglich der Bondausbeute mit ca. 87 % bei Verbund #7 und 88 % bei Verbund #8 (siehe Tabelle 7.9). Somit bestätigen die erhaltenen Bondausbeuten nochmals die Wahl der Bondparameter.

Tabelle 7.9: Bondausbeute der Testverbunde mit theoretischer SU8-Rahmenstruktur nach dem Sägen

Verbund #	Gutchips	Chips mit leichten Bondfehlern	Chips mit massiven Bondfehlern	defekte Chips	Bondausbeute in %
7	61	3	6	0	87,14
8	62	2	5	1	88,57

Zur Überprüfung der Bondfestigkeit werden je Verbundvariante 20 vereinzelte Chips dem gleichen Scherversuch unterzogen wie die Chips der Bondtestverbunde #1 bis #6. Die Resultate des Scherversuches sind in Tabelle 7.10 verdeutlicht. Aufgrund der größeren Bondfläche muss von einer höheren Bondkraft der Verbunde ausgegangen werden. Dies konnte in den Messungen bestätigt werden. Demzufolge konnte bei Verbund #7, welcher mit 3 bar bei 105 °C gebondet worden ist, eine maximale Bondfestigkeit von 55,85 MPa gemessen werden. Als Mittelwert der Messreihe ergibt sich eine Bondfestigkeit von 40,37 MPa. Verbund #8, welcher bei 1 bar und 120 °C gebondet wurde, erreicht maximale Bondfestigkeiten von 49,14 MPa und liefert im Mittel 37,31 MPa. Beide Verbunde bestätigen dadurch die Vermutung, dass durch eine erhöhte Bondfläche von einem erhöhten Widerstand gegen ein Aufbrechen der Bondverbindung ausgegangen werden kann.

Tabelle 7.10: Scherkräfte und Scherfestigkeiten der theoretischen SU8-Rahmenstruktur

Verbund #	F_{Scher_max} in N	F_{Scher_min} in N	$F_{Scher_Ø}$ in N	τ_{Scher_max} in MPa	τ_{Scher_min} in MPa	$\tau_{Scher_Ø}$ in MPa
7	1767,68	905,02	1277,68	55,85	30,02	40,37
8	1555,23	881,66	1180,70	49,14	27,86	37,31

Der Vergleich der durchschnittlich erzielten Bondfestigkeiten der Verbunde #4 und #5 (reale Bondrahmenstruktur – abgerundete Ecken) mit den Verbunden #7 und #8 (theoretische Bondrahmenstruktur – nicht abgerundete Ecken) ist in Abbildung 7.7 dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Bondfestigkeiten der Verbunde mit theoretischer Bondrahmenstruktur fast drei Mal so hoch sind, wie die Bondfestigkeiten der Verbunde mit realer Bondrahmenstruktur.

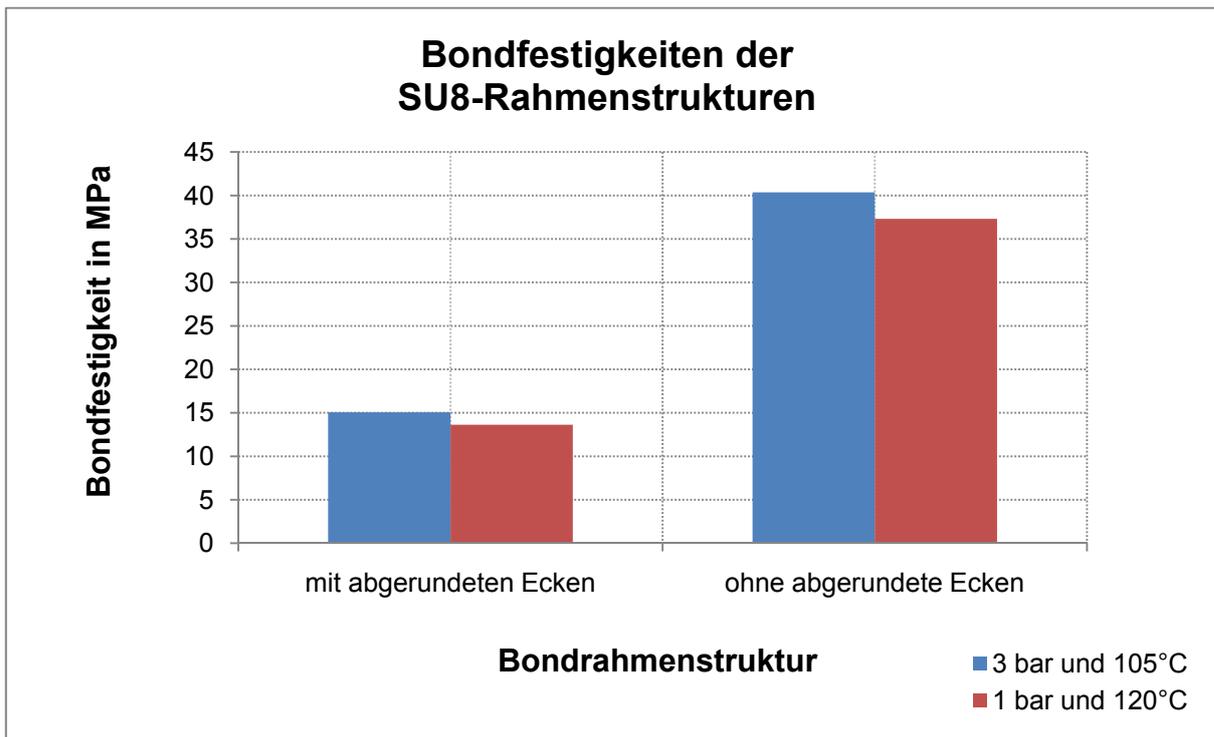


Abbildung 7.7: Vergleich der Bondfestigkeiten der beiden Bondrahmenstrukturen

Bei der Versuchsreihe der theoretischen Bondfläche sind nahezu alle Chips während des Abschervorgangs gebrochen (vgl. Abbildung 7.8). Bei den Tests der realen Bondfläche konnte nur vereinzelt ein Zerbrechen von Chips beobachtet werden. Dies lässt darauf schließen, dass bei den realen Bondrahmen die Festigkeit zwischen dem SU8 auf dem Unterteil und dem Silizium des Oberteils nicht derart hoch war und somit das Abscheren vereinfachte. Bei der theoretischen Bondrahmenfläche kann demzufolge durch die Untersuchung der zerbrochenen Chips von einer deutlich höheren Festigkeit zwischen dem SU8 und dem Silizium des Oberteils ausgegangen werden. Diese Erkenntnisse werden zusätzlich durch die Ermittlung der Bondfestigkeiten bestätigt.

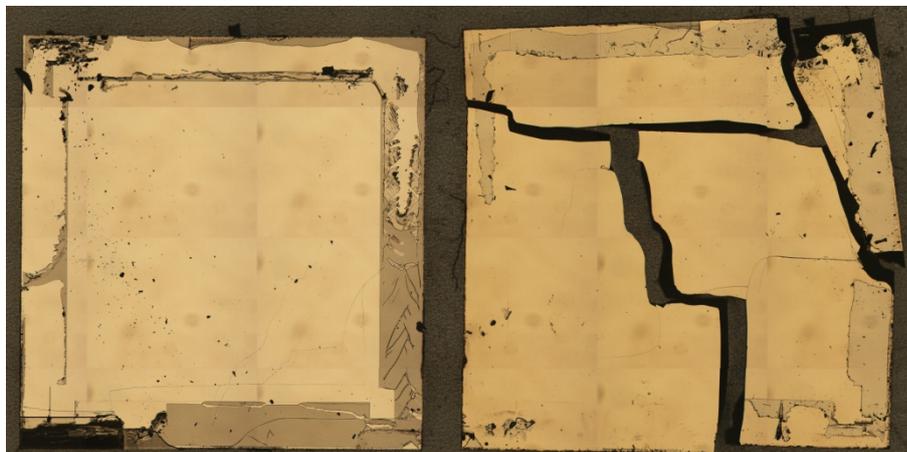


Abbildung 7.8: Abgescherter Chip des Verbundes #8

Zusammenfassung

Die Überprüfung der Bondfestigkeit des SU8-Bondens konnte erfolgreich mit dem Scherver-such durchgeführt werden. Es wurde nachgewiesen, dass die aktuell verwendeten Bondpa-rameter nicht das Optimum bezüglich der zu erwartenden Bondfestigkeit darstellen. Die Ver-bunde mit der realen Struktur und den bis dato benutzten Parametern (105 °C und 1 bar) resultieren in einer durchschnittlichen Bondfestigkeit von 10,8 MPa. Die Steigerung der Bondtemperatur von 105 °C auf 120 °C bei einem Bonddruck von 1 bar ermöglicht Bondfes-tigkeiten von 13,63 MPa. Die Erhöhung des Bonddruckes von 1 bar auf 3 bar bei 105 °C liefert 50 % höhere Bondfestigkeiten von 15,06 MPa gegenüber der Ausgangsvariante. Demzufolge wird bei zukünftigen SU8-Bondungen eine Bondung mit den Parametern 105 °C // 3 bar oder 120 °C // 1 bar angestrebt. Die Parametervariante 120 °C // 1 bar ist hierbei zu favorisieren, da die real vorliegenden Wafer mit den geätzten Strukturen dem Bonddruck von 3 bar nicht standhalten und daher einen Defekt erleiden könnten.

Durch die Erkenntnis der abgerundeten Ecken des realen SU8-Rahmenprofils wurde ebenso eine Überprüfung der Bondfestigkeit der theoretischen, nicht abgerundeten SU8-Rahmenprofile angestrebt. Diese bestätigen die Vermutung nach viel höheren Bondfestigkei-ten und ermöglichen Bondfestigkeiten von durchschnittlich 40,37 MPa bei 105 °C und 3 bar, sowie 37,31 MPa bei 120 °C und 1 bar.

Demnach könnte in einem zukünftigen Redesign über Möglichkeiten beratschlagt werden, welche dieses starke Abrunden der SU8-Rahmenstruktur verhindern. Ein Ansatz ist das An-passen der Ätzung im Unterteil an den Schichtstapel auf dem Unterteil. Wenn die Ätzung vom Unterteil komplett in das Oberteil verlagert wird (vgl. Abbildung 7.9 a)), ist eine sehr un-günstige SU8-Rahmenstruktur denkbar. Bedingt durch das Aufschleudern über einen Schichtstapel, kann nicht von einer ebenen SU8-Rahmenstruktur ausgegangen werden. Das sich einstellende Rahmenprofil würde entweder eine schräge oder eine konkave Fläche an-nehmen, wobei die Variante mit der konkaven Fläche den schlimmsten Fall darstellt. Bei der momentanen Variante (vgl. Abbildung 7.9 b)) beträgt die Grubenätzung 3,64 μm und die re-lative Höhe des Schichtstapels 1,2 μm ¹⁵. Dieser Höhenunterschied trägt zur abgerundeten SU8-Rahmenbildung bei. Aus diesem Grund muss ein geeignetes Verhältnis zwischen Gru-benätzung und Schichtstapelhöhe gefunden werden. Im Falle einer Grubenätzung im Unter-teil von ebenfalls 1,2 μm kann von einem homogenen Höhenprofil von Bondrahmen zu Schichtstapel (vgl. Abbildung 7.9 c)) ausgegangen werden. Demzufolge kann sich ein annä-

¹⁵ = elektrostatischer Stapel (3,9 μm) – Oxid-Nitrid-Stapel (2,7 μm) der sich auch auf dem Bondrah-men befindet

hernd ebenes, nicht so stark abgerundetes SU8-Rahmenprofil einstellen, was zur Steigerung der Bondfestigkeit führt und letzten Endes die Ausbeute erhöht.

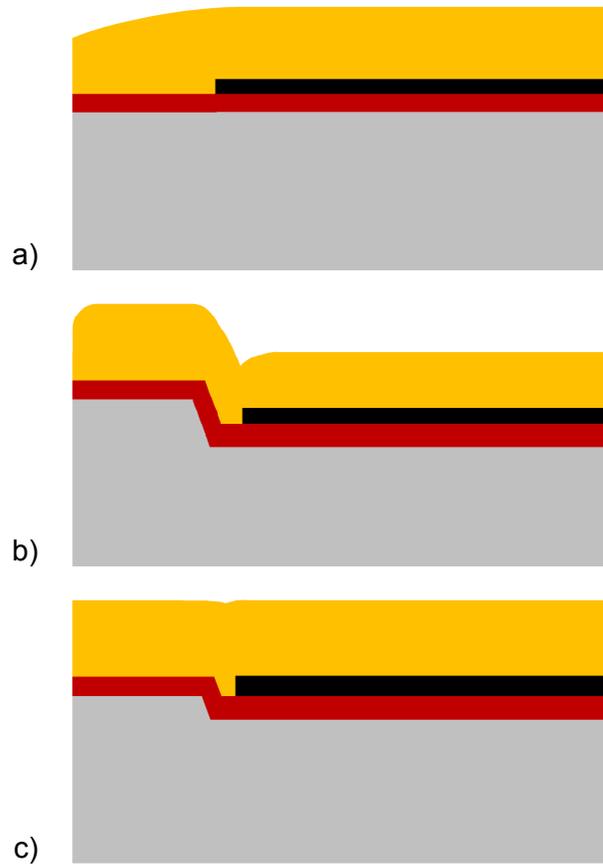


Abbildung 7.9: Schematische Darstellung des sich einstellenden SU8-Rahmenprofils bei kompletter Verlagerung der Grubenätzung in das Oberteil, **b)** momentanen Ätzverhältnissen, **c)** einer Anpassung der Grubenätzung an den Schichtstapel

7.2 Direktbonden der FPI

Beim direkten Bonden dürfen sich keinerlei Verunreinigungen auf den Oberflächen der zu bondenden Bondpartner befinden, da diese die Bondung erheblich beeinträchtigen können. Aus diesem Grund werden die Wafer vor dem Bonden nochmals gereinigt und aktiviert. Grundsätzlich ist die Reinigung jedoch eingeschränkt, da stets auf die Kompatibilität der optischen Schichten geachtet werden muss.

7.2.1 Ablauf des Direktbondens

Bei der Reinigung der Wafer für das direkte Bonden handelt es sich um eine besondere Art der Reinigung – einer Art Poliervorgang von Hand¹⁶. Dabei wird der Wafer unter ständiger DI-Wasser Zufuhr per Hand über ein stehendes Polyurethantuch bewegt. Es wird keinerlei Abrasivmittel eingesetzt. Die Rauigkeit des Polyurethantuches kann eingestellt werden und beträgt bei dem Reinigungsschritt 0,3 bis 0,4 nm. Anschließend werden die Wafer im Ofen getrocknet und mittels Sauerstoff-Plasma und einem folgenden Spülprozess endgereinigt. Die so gereinigten Wafer können nun hydrophil gebondet werden. Zu beachten ist jedoch, dass der Bondprozess möglichst schnell im Anschluss an die Reinigung durchgeführt werden muss, da sofort eine erneute Kontamination der Wafer einsetzt.

Der Bondvorgang beginnt mit der Justage der beteiligten Wafer zueinander. Dazu werden die Wafer zunächst im Aligner entsprechend Abbildung 7.10 eingebaut. Der untere Wafer, geschützt durch einen darunter liegenden Glaswafer, zeigt mit der zu bondenden Oberfläche nach oben. Der obere Wafer liegt, mit der zu bondenden Seite nach unten zeigend, auf Teflon-Abstandshaltern (Spacer), die beide Wafer etwa 100 µm voneinander trennen. Den Abschluss bildet erneut ein Glaswafer. Die Auflagenwafer sind im Bereich der optischen Gebiete mit Gruben versehen, um das Sticking und eine Beschädigung der optischen Schichten durch die von oben drückende Membran zu verhindern. Die Justage erfolgt manuell anhand der Bondmarken. Abschließend wird der Verbund im Bonder einem speziellen Programmlauf unterzogen.

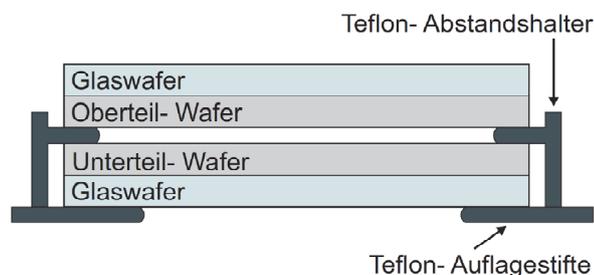


Abbildung 7.10: Für das Bonden vorbereiteter Verbund

¹⁶ Die Überprüfung der Machbarkeit und die Beeinflussung der Bondausbeute beim Direktbonden durch diesen neuartigen Reinigungsschritt konnte in [Geb10] erfolgreich gezeigt werden.

Im Bonden werden die Wafer zunächst durch einen initialen Druck in der Mitte des Waferpaares arretiert und so am Verschieben gegeneinander gehindert. Danach werden die Abstandshalter zwischen den Wafern herausgezogen, so dass die oberen Wafer auf die unteren Wafer niedersinken. Dem folgend senkt sich eine Membran auf den gesamten Verbund und wird mit 1 bar Druck beaufschlagt, was zum Aufeinanderdrücken des Waferpaares führt. In Abbildung 7.11 ist der Bondverlauf des Direktbondens grafisch dargestellt. Es ist zu sehen, dass die Bondung bei Raumtemperatur stattfindet. Auch ist deutlich zu erkennen, dass der gesamte Bondprozess nur neun Minuten in Anspruch nimmt. Allerdings muss nach dem Bonden noch ein mehrstündiger Temperprozess angeschossen werden, um die Festigkeit der Bondverbindung zu erhöhen. Für die FPI ist die Bondenergie¹⁷ der bei Raumtemperatur gebondeten Waferpaare mittels Direktbonden nicht ausreichend.

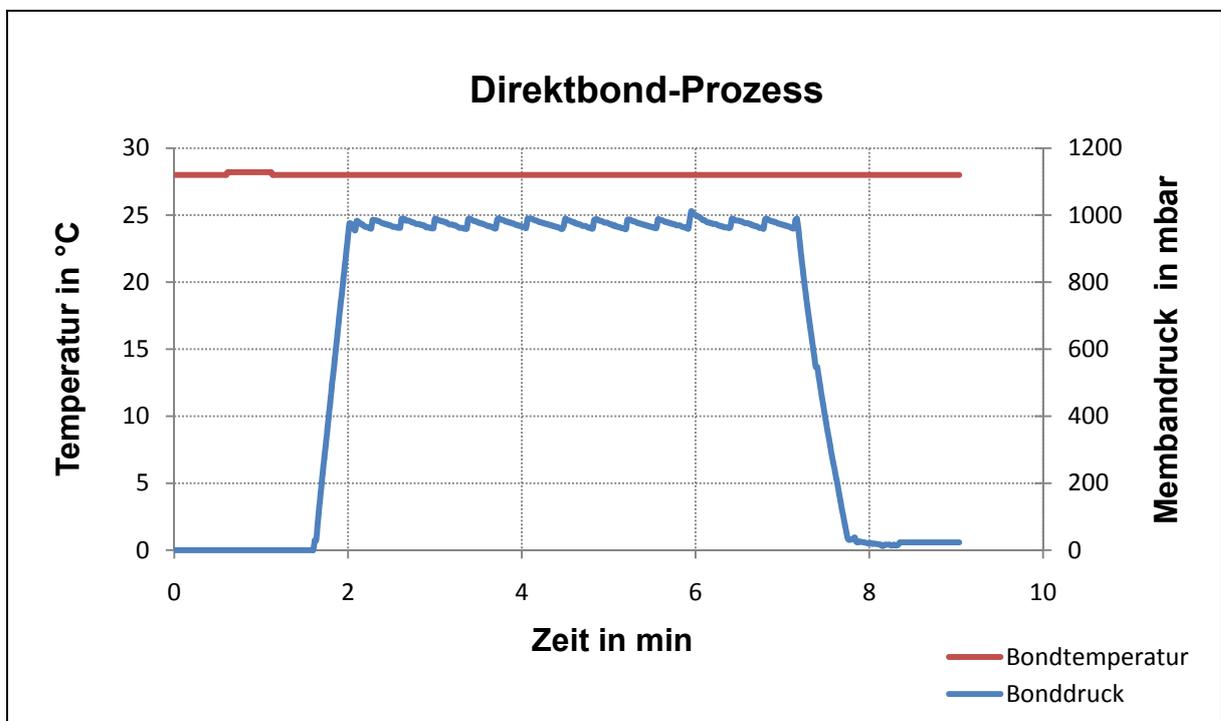


Abbildung 7.11: Ablauf des Direktbondens

In einer nach dem Bonden folgenden Temperung ändert sich die chemische Struktur der Bondgrenzfläche bis hin zur Bildung stabiler kovalenter Bindungen, was eine Steigerung der Raumtemperatur-Bondenergie um ein Vielfaches nach sich zieht. Die Temperung erfolgt hier bei 200 °C in einem Ofen für ca. vier Stunden. Betrachtet man nun die Modellvorstellung des Bondvorganges, welche in Abbildung 7.12 veranschaulicht ist, so spielen beim Bonden bei Raumtemperatur die Wasserstoffbrückenbindungen der einzelnen Wassermoleküle der auf

¹⁷ Ist bei Raumtemperatur durch die Wasserstoffbrückenbindung zu erklären

den Siliziumoberflächen angelagerten wenigen Monolagen Wasser eine wesentliche Rolle. Somit hängt die Bondenergie, unter der Voraussetzung eines ideal gebondeten Waferpaares, im Wesentlichen nur von den Brückenbindungen zwischen den Silanol-Gruppen ab, welche die natürliche Oxidschicht auf der Waferoberfläche abschließen und den daran angelagerten Wassermolekülen. Dadurch wird beim Raumtemperaturbonden eine Bondenergie γ von ca. $0,1 \text{ J/m}^2$ erreicht. Bei der anschließenden Wärmebehandlung, bei Temperaturen ab 100 bis $150 \text{ }^\circ\text{C}$, kommt es zur Steigerung der Diffusion der Wassermoleküle entlang der Grenzfläche und in das Oxid hinein. Diffundiert das Wasser schließlich bis in das Silizium, kann von folgender Reaktionsgleichung (Gl. 7.4) ausgegangen werden, bei der die Reaktion des Wassers mit dem Silizium sowohl Wasserstoff, als auch neues Oxid entstehen lässt. Die daraus resultierende Bondenergie γ steigt nun auf ca. $0,6 \text{ J/m}^2$.



Durch weiteres Erhöhen der Temperatur in Bereiche ab $800 \text{ }^\circ\text{C}$ kommt es im Zuge der Abdiffusion der Wassermoleküle in der Grenzfläche zur Reduzierung des Abstandes der sich gegenüber liegenden Silanol-Gruppen auf den Oxidoberflächen. Dies führt letztendlich zur Reaktion der Silanol-Gruppen und lässt unter Abspaltung eines Wassermoleküls eine kovalente Siloxanverbindung entstehen (vgl. Gl. 7.5). Dadurch entsteht eine Bondenergie γ von mindestens $2,5 \text{ J/m}^2$. [Wie01]

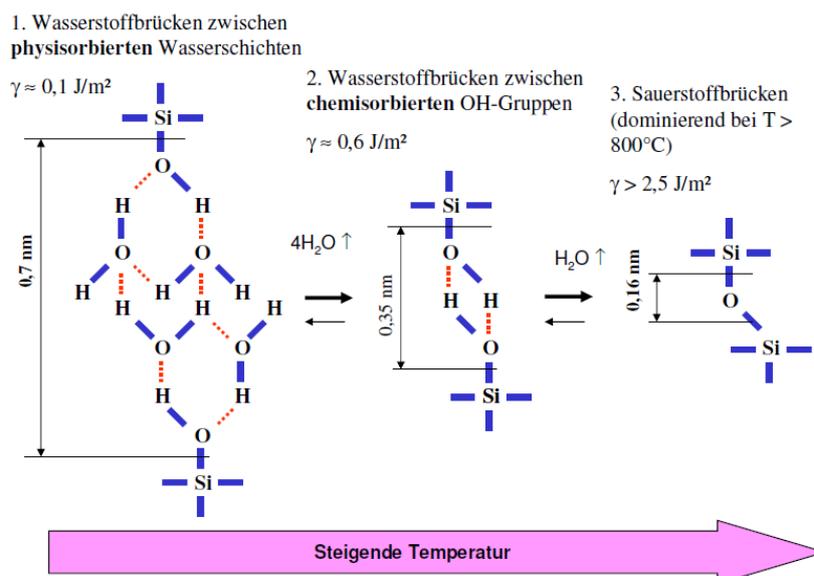
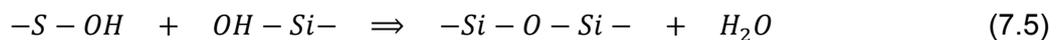


Abbildung 7.12: Modellvorstellung des Direktbondvorganges [TUC07]

Trotz der hohen Bondenergien, die im Bereich über 800 °C erreicht werden, können diese Hochtemperaturprozesse gerade in Hinblick auf die Nichtkompatibilität der optischen Schichten nicht verwendet werden. Dies führt dazu, dass zur Steigerung der Bondenergie im unteren Temperaturregime andere Ansätze gefunden werden müssen.

Einer dieser Ansätze ist die bei den FPI verwendete Plasmaaktivierung der Oberfläche, da trotz der geringeren Bondtemperaturen aufgrund der Temperaturempfindlichkeit der bis dato erzeugten Schichtsysteme, eine gute Bondung erreicht werden soll. Ziel dabei ist es, die Umwandlung der Silanol-Gruppen in Siloxan-Gruppen bereits bei Temperaturen unter 400 °C stattfinden zu lassen und somit in ebendiesem Temperaturregime die Bondenergie deutlich zu erhöhen. Dementsprechend werden die zu bondenden Wafer direkt vor dem eigentlichen Bondprozess für fünf Minuten einem Plasma¹⁸ ausgesetzt. Dieses Plasma führt neben der Oxidation organischer Verunreinigungen und somit zur Bildung eines dünnen Oxides auch zur Zerstörung des Gitters in Oberflächennähe, was die Anlagerung von *OH*-Gruppen und Wasser begünstigt [TUC09]. Nach der Plasmabehandlung werden die Wafer zehn Minuten in DI-Wasser gespült und im Ofen bei 70 °C getrocknet. Der Prozessplan des bei den FPI verwendeten Bondablaufes ist im Anhang A hinterlegt.

7.2.2 Charakterisierung der Bondmuster

Nach der Beschichtung des optischen Designs-V2f sind aufgrund des Bruchs von Unter- teil #2 nur zwei Verbunde möglich. Der Verbund 910/16/1 + 910/17/3 ist zuerst ausgewählt worden, da diese beiden Wafer die beste Justage der optischen Stapel aufweisen. Entsprechend wurden beide Wafer mit Buffing und Plasmaaktivierung vorbehandelt. Nach dem Bonden konnte jedoch keine Verbindungsbildung der zwei Wafer beobachtet werden. Der obere Wafer ließ sich mühelos vom unteren Wafer abnehmen. Eine Überprüfung der Bondflächen mittels Mikroskop bestätigte die Vermutung nach Schichtresten und Partikeln (vgl. Abbildung 7.13) auf den zu bondenden Flächen. Demzufolge wurde das mechanische Polieren erneut durchgeführt, um etwaige Partikel und Schichtreste zu entfernen. Ein erneuter Bondversuch lieferte das gleiche schlechte Ergebnis wie der erste Versuch. Es erfolgte keine Verbindungsbildung zwischen beiden Wafern.

In einem weiteren Versuch sollte die Ursache für das Nichtbonden des Verbundes herausgefunden werden. Dafür wurde eine Verbindungsbildung der beiden Wafer mit einem unbehandelten, einseitig polierten Wafer angestrebt, um eine Aussage über den Defekt verursachenden Teil des Verbundes zu erhalten. Alle vier Wafer wurden ebenfalls der Vorbehandlung für das direkte Bonden im unteren Temperaturregime unterzogen.

¹⁸ Anlage Leibold, RIE Plasma, Plasmaleistung 100 W, Druck 1 mbar, BIAS Spannung ca. 360 V

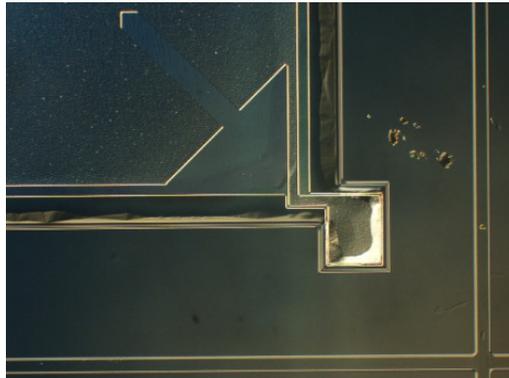


Abbildung 7.13: Bondrahmen mit Schichtresten/Partikeln des Unterteils 910/17/3 nach fehlgeschlagener Bondung

Der Bondversuch des Unterteilwafer mit dem unbehandelten Wafer wurde zuerst durchgeführt. Bei diesem Versuch konnte trotz großer Krafteinwirkung keine vollflächige Verbindungsbildung hergestellt werden. Lediglich drei Bereiche unterschiedlichster Größe zeigten eine Bondung, wie in Abbildung 7.14 dargestellt ist. Der Bondversuch von Oberteilwafer und einem einseitig polierten Wafer ist danach durchgeführt worden. Nachdem beide Wafer aufeinandergelegt und durch eine Berührung in der Mitte des Waferpaares in Kontakt gebracht wurden, breitete sich die Bondfront in kürzester Zeit über den gesamten Verbund aus. Dieser Verbund konnte nur vorsichtig und unter großer Krafteinwirkung wieder gelöst werden.

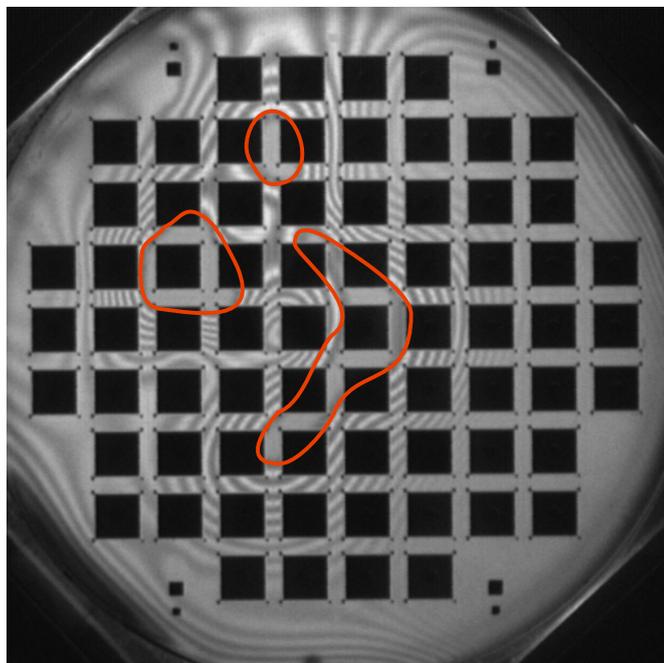


Abbildung 7.14: IR-Aufnahme des Bondversuchs Unterteilwafer 910/17/3 + einseitig polierter Wafer

Diese beiden Bondversuche lassen die Schlussfolgerung zu, dass das Nichtbonden nur im Unterteilwafer begründet ist. Das Relief der Unterteile kann allerdings keineswegs als Ursache für die nicht erfolgte Bondung herangezogen werden, da andernfalls keine vereinzelte Verbindungsbildung im Bondversuch mit dem einseitig polierten Wafer erfolgt wäre. Demnach ist das Nichtbonden in den Bondflächen der Unterteile zu erklären. Bei der Herstellung der Unterteile war während der Strukturierung des Isolatorstapels die Lackhaftung der Ätzmaske nicht mehr ausreichend, so dass diese stellenweise an- und unterätzt worden ist. Dies führte dazu, dass der Isolatorstapel ebenfalls angeätzt wurde und dementsprechend die Isolierung zwischen Schirm und Elektrode nicht mehr gewährleistet ist. Dieser Ätzschritt kann ebenfalls für das Nichtbonden verantwortlich sein, indem die Bondfläche stellenweise angegriffen wurde und partiell auch Schichtreste von dem nicht einwandfrei geätzten Isolatorstapel zurückgeblieben sind. Des Weiteren konnten während der Herstellung der Unterteile und den damit verbundenen Lithografieschritten mehrfach Schichtreste und Partikel auf den Bondrahmen beobachtet werden. Nach der Beschichtung der optischen Schichten in Jena musste ebenso ein erheblicher Partikelbefall festgestellt werden. Auch konnte am Wafer ein ringförmiger Abdruck im Randbereich erfasst werden, welcher auf das Einspannen der Wafer in der Beschichtungsvorrichtung zurückzuführen ist. Diese Partikel und Schichtreste sind für die nicht erfolgte Verbindungsbildung verantwortlich. Demnach müssen in einer zukünftigen Herstellung derartige bondmindernde Faktoren vermieden werden.

7.3 SU8-Bonden der FPI

Vor dem eigentlichen Bonden mit SU8 muss die adhäsive Zwischenschicht realisiert werden. Dazu sind Schritte wie Belackung, Soft-Bake, Belichtung, Post-Exposure-Bake und Entwicklung vonnöten. Die Prozessierung der Zwischenschicht ist ausführlich in [Geb10] beschrieben.

7.3.1 Präparation der SU8-Rahmenstruktur

Die Prozessierung vom SU8 ist in Abbildung 7.15 a) dargestellt und zeigt alle integrierten Schritte von der Vorbehandlung der Wafer bis zur Entwicklung des SU8. Die Herstellung der Zwischenschicht beginnt mit der Präparation der Wafer, gefolgt vom Aufschleudern des Fotoresistes. Nach dem Aufschleudern wird das Fotoresist mit der dafür vorgesehenen Maske strukturiert. Bei Negativresisten verbleibt nach der Belichtung und der Entwicklung eine Struktur stehen, die genau invers zur Struktur der Fotomaske ist (vgl. Abbildung 7.15 b). An den Stellen, wo die Fotomasken transparent sind, kommt es zur Belichtung des Fotoresistes

und damit zur Verkettung. Der belichtete Teil des Fotoresists ist jetzt für den Entwickler unlöslich, da dieser nur die nichtverketteten Teile lösen kann.

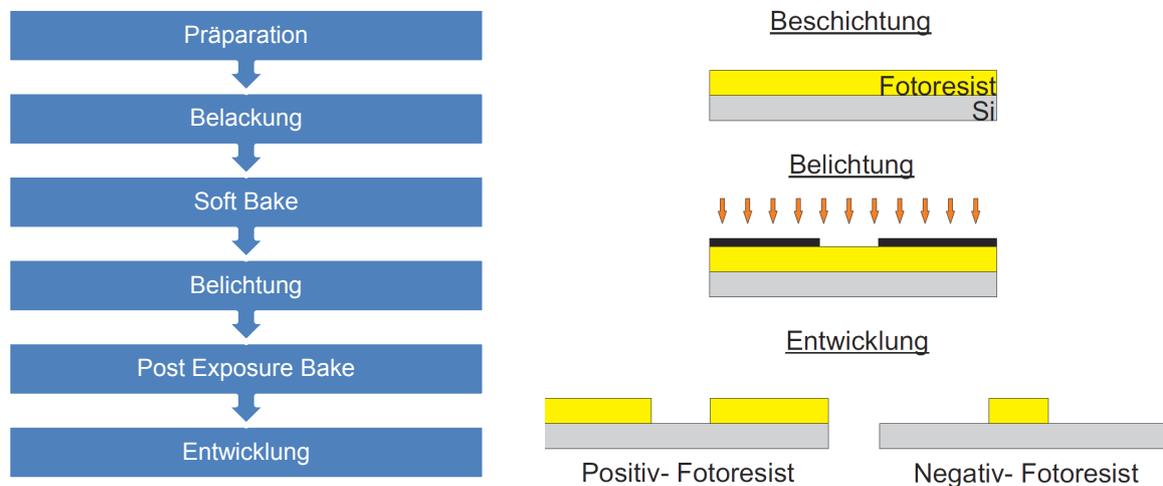


Abbildung 7.15 a) Prozessplan für das SU8, b) Unterschied zwischen Negativ- und Positivresist nach [Kan05]

Die Schwierigkeit bei der Herstellung der SU8-Rahmenstruktur ist das Aufschleudern des flüssigen Resists. Dabei wird der zu beschichtende Wafer in Rotation versetzt und eine definierte Menge des SU8 in das Rotationszentrum getropft, das durch die wirkenden Fliehkräfte gleichmäßig nach außen verteilt wird. Anhand der Drehzahl lässt sich nun eine Nenndicke des auf dem zu beschichtenden Wafer verbleibenden SU8 definiert einstellen. Die Nenndicke des SU8, die der Höhe des Bondrahmens entspricht, ist von entscheidender Wichtigkeit für die Einstellung des optischen Spaltes. Aufgrund der Tatsache, dass sich die Eigenschaften des Resists mit langer Lagerzeit teilweise verändern, muss vor dem eigentlichen Aufschleuderprozess eine Eichkurve (vgl. Abbildung 7.16) des aktuell verwendeten SU8 aufgenommen werden.

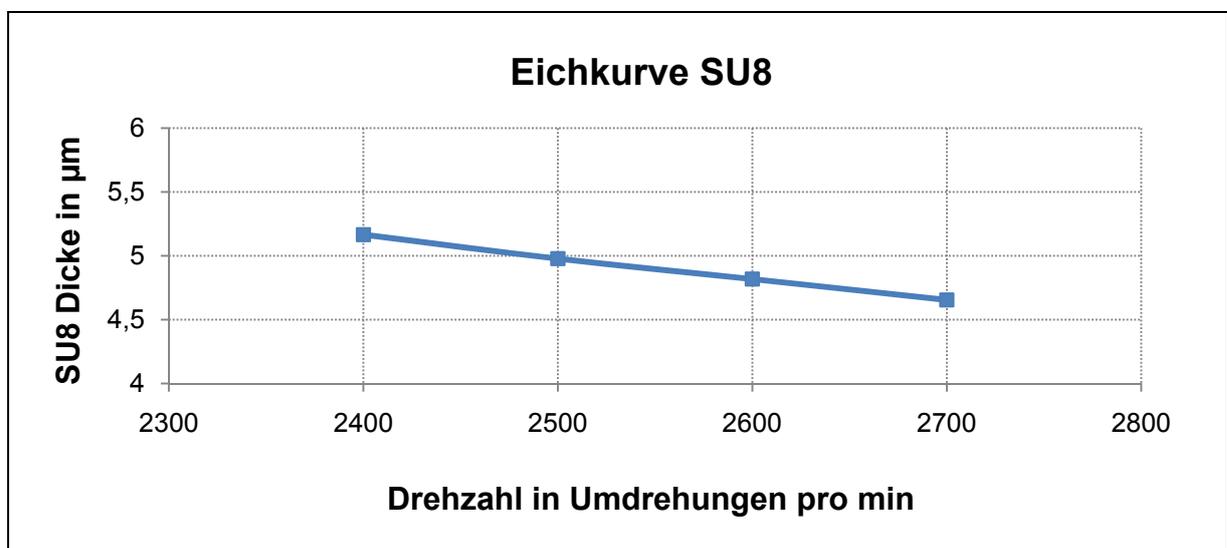


Abbildung 7.16: Eichkurve für das SU8-Nenndicke $5\mu\text{m}$ bei verschiedenen Aufschleudererzahlen

7.3.2 Ablauf des SU8-Bondens

Vor dem Bondprozess werden die aufgetragenen SU8-Profile mit dem Oberflächenmessgerät Alphastep vermessen. Dieser Vermessungsschritt dient der Überprüfung des Resists: inwieweit es homogen über den gesamten Wafer verteilt ist und die notwendige Dicke zur Einstellung des optischen Spaltes aufweist. Bei diesem letzten Vermessungsschritt muss zusätzlich darauf geachtet werden, dass es zu keiner Verunreinigung der Wafer kommt. Außerdem sollte der Bondprozess möglichst schnell im Anschluss an die Vermessung durchgeführt werden, um eine erneute Kontamination der Wafer zu vermeiden. Der Bondablauf des SU8-Bondens entspricht dem des Direktbondens, ist aber durch andere Parameter gekennzeichnet. Die Aufheizung der Bondkammer auf 105 °C, das Halten der Temperatur für 30 Minuten und das Abkühlen der Bondkammer auf 22 °C bilden die Schritte des SU8-Bondens. Beim SU8-Bonden müssen lange Aufheiz- und Abkühlzeiten einkalkuliert werden, da so Spannungen im Material vermieden werden können. In Abbildung 7.17 ist der Bondverlauf des SU8-Bondens zur Verdeutlichung grafisch dargestellt. Der Prozessplan des bei den FPI verwendeten Bondablaufes ist im Anhang A hinterlegt.

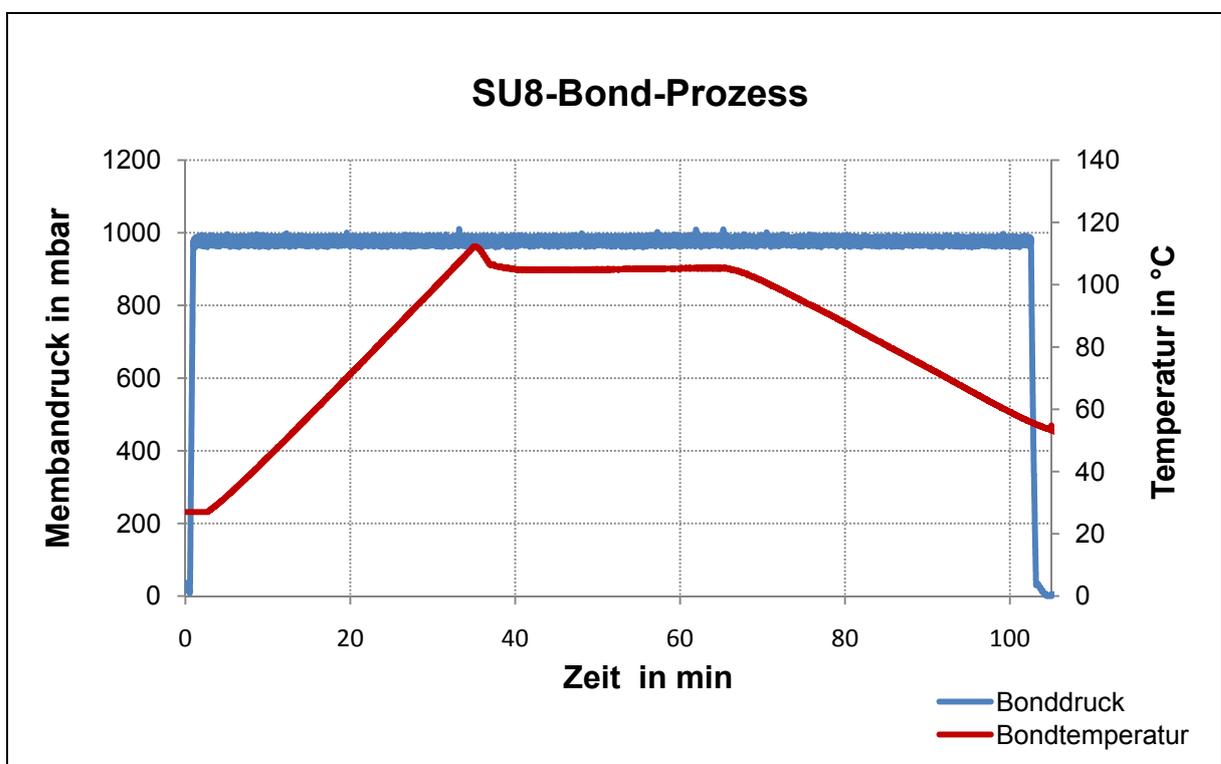


Abbildung 7.17: Ablauf des Standard-SU8-Bondens mit der Parametervariante 105 °C // 1 bar

7.3.2 Charakterisierung der Bondmuster

Die Beschichtung des optischen Designs-V2f konnte in der SU8-Variante besser realisiert werden. Dessen ungeachtet wurde erneut ein Wafer (Unterteil Wafer #3) bei der Beschichtung zerstört. Aus diesem Grund stehen wie bei der V2f-Direktbondvariante nur zwei mögliche Verbunde zur Verfügung. Die Einteilung der zwei Verbunde wurde dabei folgendermaßen vorgenommen: 910/15/1 + 910/14/3 und 910/15/2 + 910/14/4. Das auf die Unterteile aufzuschleudernde SU8 wurde anhand der Auslegung an den optischen Spalt mit 4,75 µm realisiert. Die Bondung der beiden Verbunde konnte erfolgreich mit den aus der Bondfestigkeitsüberprüfung evaluierten Bondparametern durchgeführt werden. Bei der Vereinzelung der Wafer zu Chips wurde das Verfahren des UV-Folienpaares eingesetzt, welches mit guten Resultaten bezüglich der Abdichtung und Verhinderung des Herausreißen der beweglich gelagerten Reflektorträger im Oberteil belegt werden kann. Das Resultat der ersten beiden Verbunde kann anhand der in Tabelle 7.11 veranschaulichten Bondausbeuten bewertet werden. Demzufolge kann bei Verbund 910/15/1 die Bondausbeute der Chips ohne Bondfehler mit 34 % belegt werden. Unter Einbeziehung der Chips mit leichten Bondfehlern ergibt sich aufgrund der erhöhten Anzahl an Chips mit leichten Bondfehlern eine etwas bessere Bondausbeute von 61 %. Bei Verbund 910/15/2 liegen nach dem Vereinzeln mehr Chips ohne Bondfehler vor, weswegen sich hier die Bondausbeute der Gutchips auf 56 % beziffern lässt. Unter Einbeziehung der Chips mit leichten Bondfehlern kann von einer Bondausbeute von 64 % ausgegangen werden. Da es sich hierbei um die ersten Bondverbunde dieser Musterreihe handelt, stellen die erreichten Bondausbeuten von 61 % und 64 % unter Einbeziehung der leichten Bondfehler eine angemessene Bondausbeute dar. Faktoren wie der Partikelbefall und die vorhandenen Schichtreste auf den Bondflächen rufen wie beim Direktbunden Bereiche mit mangelhafter Bondung hervor. Daher muss auch bei dieser Variante in zukünftigen Präparationen darauf geachtet werden, dass diese Faktoren vermieden werden.

Tabelle 7.11: Bondausbeute der mit SU8 gebondeten Verbunde (die Bondausbeute entspricht dabei: „nur Gutchips“ / „Gutchips + Chips mit leichten Bondfehlern“)

Verbund #	Gutchips	Chips mit leichten Bondfehlern	Chips mit massiven Bondfehlern	defekte Chips	Bondausbeute in %
910/15/1	24	19	25	2	34 / 61
910/15/2	39	6	7	18	56 / 64

Nach der Vereinzelung wurden an den FPI-Chips verschiedene Untersuchungen durchgeführt. Am Weißlichtinterferometer konnte bei allen FPI-Chips kein Sticking festgestellt werden. Dies bestätigt die getroffenen Änderungen am Design zur Vermeidung von Sticking. Außerdem wurden erste Untersuchungen hinsichtlich der Beziehung von Steuerspannung und

Auslenkung des oberen Reflektorträgers realisiert. Diese zeigten, dass das vorher berechnete Elektro-Mechanische-System gut verwirklicht werden konnte. In Abbildung 7.18 a) ist ein FPI-Chip im Weißlichtinterferometer bei 0 V Steuerspannung dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass sich Reflektorträger und Federn auf einer Höhe befinden. In Abbildung 7.18 b) ist ein FPI-Chip abgebildet, an welchem 59 V Steuerspannung zwischen Elektrode auf dem Unterteil und dem Substrat des Oberteils angelegt sind, was im Auslenken des oberen Reflektorträgers resultiert. Bei der Steuerspannung von 59 V kann der obere Reflektorträger ca. 2 μm ausgelenkt werden.

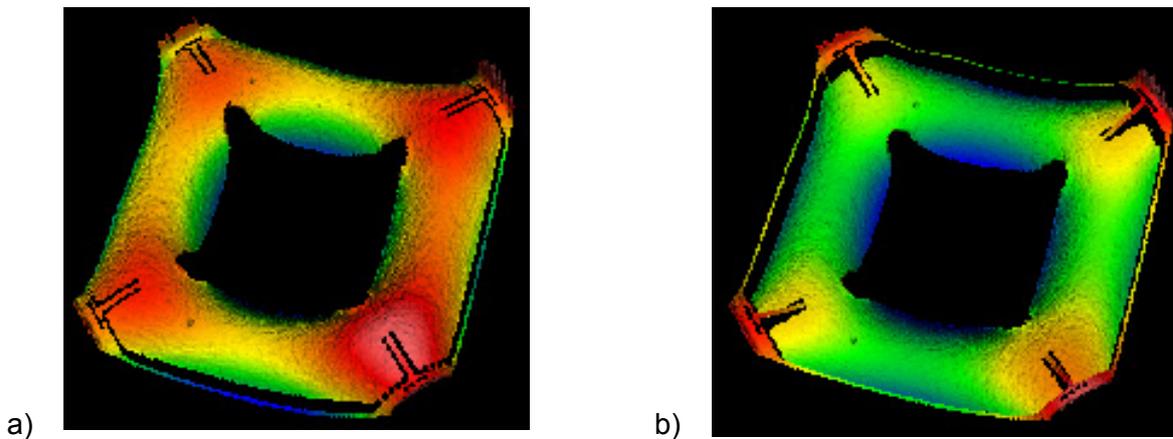


Abbildung 7.18: WLI-Aufnahme eines a) nicht angeregten Reflektorträgers, b) eines bei 59 V angeregten Reflektorträgers

Die Kurzschlussüberprüfung der vereinzelt Chips ging ebenso mit sehr guten Ergebnissen einher. Es konnte kein Kurzschluss, weder zwischen Substrat und Schirm, noch zwischen Schirm und Elektrode festgestellt werden. Demzufolge können die Bemühungen nach einer möglichst glatten Elektrode und einem 100 nm dickeren Isolatorstapel als vielversprechend eingestuft werden.

8 Zusammenfassung und Ausblick

In einem ersten Prozessdurchlauf konnte die Machbarkeit der Technologie der FPI für das adhäsive Bonden mit SU8 nachgewiesen werden. Diese ersten Muster waren allerdings noch durch Mängel gekennzeichnet, welche die Performance und Ausbeute minderten. In einem neuen Prozessdurchlauf sollte neben der Optimierung und somit der Beseitigung der Performance und Ausbeute verringernden Mängel eine neue Auslegung der FPI mit einem beweglichen Reflektorträger für das direkte Bonden erfolgen. In diesem neuen Prozessdurchlauf konnten die Mängel teilweise beseitigt werden. So lag das Hauptaugenmerk bei der Beseitigung des Stickings, was im letzten Prozessdurchlauf vermehrt zu Defekten führte. Dabei erwiesen sich die vollzogenen Änderungen im Design als gute Wahl. Bei der SU8-Variante zeigte das Vergraben der optischen Schichten im Oberteil sehr gute Resultate bezüglich der Vermeidung des Stickings. Zusätzlich zu der geometrischen Anpassung des Designs konnte eine optimale Variante für die Vereinzelung der Wafer zu Chips aufgezeigt werden. Dazu wird ein Folienpaar aus einer UV-Folie verwendet, wobei die untere Folienlage in den Bereichen der optischen Schichten strukturiert ist und somit das Ankleben der Folie am ARC verhindert. Das verwendete UV-Folienpaar zeigte ebenso sehr gute Abdichteigenschaften im Sägeprozess.

Aufgrund des stark vorbelasteten *KOH*-Ätzbades traten bei der Silizium-Grubenätzung Defekte an den Wafern auf. Diese Defekte spiegelten sich in „quadratischen Erscheinungen“ und inhomogenen Ätzgründen wider. Die Präparation der Direktbondvariante ist zusätzlich durch Defekte der inhomogenen Federdickenätzung pro Chip von maximal 6 μm und in einer Anätzung des Isolatorstapels zwischen Schirm und Elektrode gekennzeichnet, was die Isolatorwirkung mindert und zum Kurzschluss zwischen Schirm und Elektrode führt.

Die Schichtabscheidung der optischen Schichtstapel wurde in Jena bei der Firma JENOPTIK Laser, Optik, Systeme GmbH durchgeführt. Dabei traten bei der Beschichtung der Unterteilwafer erhebliche Fehler in der Justage auf. Der BRAGG-Reflektor der Unterteile lag teilweise auf der Elektrode. Dies führt nicht nur zu einer asymmetrischen Beschichtung zwischen ARC und BRAGG, sondern auch zu Einbußen in der Funktionsfähigkeit der Abstandshalter und zum Kurzschluss zwischen Elektrode und Substrat des Filters. Die anderen Beschichtungen der V2f- und V5g-Variante waren durch eine bessere Justage der optischen Schichtstapel gekennzeichnet.

Aufgrund der Tatsache, dass bei dem früheren Prozessdurchlauf mit der Bondung aus SU8 die Bondfestigkeit unterschiedlich und teilweise nicht ausreichend war, ist eine Überprü-

fung der Bondfestigkeit angestrebt worden. Die Überprüfung der Bondfestigkeit des SU8-Bondens konnte erfolgreich mit dem Scherversuch durchgeführt werden. Es wurde nachgewiesen, dass die aktuell verwendeten Bondparameter (105 °C und 1 bar) nicht das Optimum bezüglich der zu erwartenden Bondfestigkeit darstellen, welche durchschnittlich bei 10 MPa lag. Die Veränderung der Bondparameter auf 105 °C // 3 bar und 120 °C // 1 bar waren durch bis zu 50 % höhere Bondfestigkeiten von 15 MPa im Vergleich zur Ausgangsvariante gekennzeichnet. Für zukünftige SU8-Verbunde ist die Bondung mit 120 °C und 1 bar zu favorisieren, da dieser Parametersatz die optimalen Bedingungen für die Filter aufweist. Durch die Erkenntnis der abgerundeten Ecken des realen SU8-Rahmenprofils wurde ebenso eine Überprüfung der Bondfestigkeit der theoretischen, nicht abgerundeten SU8-Rahmenprofile angestrebt. Diese bestätigten die Vermutung nach viel höheren Bondfestigkeiten von durchschnittlich 40 MPa. Demnach könnte in einem zukünftigen Redesign über Möglichkeiten beratschlagt werden, welche dieses starke Abrunden der SU8-Rahmenstruktur verhindern. Ein Ansatz ist das Anpassen der Ätzung im Unterteil an den Schichtstapel auf dem Unterteil. Es muss ein geeignetes Verhältnis zwischen Grubenätzung und Schichtstapelhöhe gefunden werden. Bei der momentanen Variante beträgt die Grubenätzung 3,64 µm und die Höhe des Schichtstapels 1,2 µm. Dieser Höhenunterschied trägt zur abgerundeten SU8-Rahmenbildung bei. Im Falle einer Grubenätzung im Unterteil von ebenfalls 1,2 µm kann von einem homogenen Höhenprofil von Bondrahmen zu Schichtstapel ausgegangen werden. Demzufolge wird sich ein annähernd ebenes SU8-Rahmenprofil einstellen, was zur Steigerung der Bondfestigkeit führt und letzten Endes die Ausbeute erhöht.

Das Bonden mit SU8 konnte erfolgreich an zwei Verbunden durchgeführt werden. Diese beiden Verbunde resultierten in Bondausbeuten von 61 % und 64 % unter Einbeziehung der Chips mit leichten Bondfehlern. Von diesen beiden Verbunden konnten erstmalig in dieser Musterreihe Untersuchungen hinsichtlich Sticking, Elektro-Mechanisches-System und Isolatorwirkung durchgeführt werden. Das Sticking und der Kurzschluss im Chip konnten durch das Redesign sehr gut vermieden werden. Ebenso wurde die Auslenkung von ca. 2 µm des oberen Reflektorträgers bei einer Steuerspannung von 59 V verwirklicht. Demzufolge bestätigen die Ergebnisse die durch das Redesign durchgeführte Optimierung.

Das direkte Bonden ging mit sehr schlechten Ergebnissen bezüglich der Bondqualität einher. Weiterführende Untersuchungen haben gezeigt, dass die Bondfläche auf den Unterteilwafern die Ursache für die Nichtbondung ist. Diese ist aufgrund von Ätzfehlern, Schichtresten und Partikeln für das direkte Bonden im unteren Temperaturebereich zu stark geschädigt. Daher muss bei zukünftigen Präparationen zwingend auf eine Partikel- und schichtrestfreie Bondfläche geachtet werden.

Literaturverzeichnis

- [Blo10] Blomberg M.: Electrically tunable surface micromachined Fabry–Perot interferometer for visible light, In: *Sensors and Actuators A: Physical*, 2010
- [Bil03] Bilenberg B., Nielsen T., Nilsson D., Clausen B., Kristensen A.: *PMMA to SU-8 Bonding for Polymer Based Lab-on-a-chip Systems with Integrated Optics*, 2003
- [Bük02] Bükler Katja: *Intraoperative Wachheit, postoperative Erinnerung und Erholung nach gynäkologischen, tageschirurgischen Kurzeingriffen unter Narkose mit Propofol, Etomidate, Ketamin, Methohexital und Midazolam*, München, Ludwig-Maximilians-Universität zu München, Dissertation 2002
- [Doe08] Doer Hans- Peter: *Untersuchung der instrumentellen Polarisierung von idealen Fabry-Perot Interferometer*. Freiburg, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Fakultät für Mathematik und Physik, Diplomarbeit 2008
- [Deu10] Deutscher Verkehrssicherheitsrat e.V.: *Verunglückte bei Alkoholunfällen 2000-2009*, http://www.dvr.de/site.aspx?url=html/betriebe_bg/ daten/unfallstatistiken143.htm
- [Fra10] Fraunhofer Einrichtung für Elektronische Nanosysteme: *Presseinformation – Ein abstimmbares Filter eröffnet neue Anwendungsbereiche der Gasmesstechnik*, Chemnitz, 2010
- [Geb10] Gebauer Christian: *Montage und Charakterisierung von mikromechanischen Fabry-Perot-Filtern mit neuartigen Schichtmaterialien und Design*, Chemnitz, Technische Universität Chemnitz, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik, Projektarbeit 2010
- [Gri07] Grillberger Christiane: *Entwicklung eines neuartigen mikromechanischen Fabry-Perot-Filtern für den MIR-Bereich*. Chemnitz, Technische Universität Chemnitz, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik, Fakultät für Maschinenbau, Diplomarbeit 2007
- [Hil06] Hilleringmann: *Mikrosystemtechnik – Prozessschritte, Technologien, Anwendungen*, B. G. Teubner Verlag / GWV Fachverlag GmbH Wiesbaden, 2006
- [Inf10] InfraTec GmbH, Dresden, Webpräsenz www.infratec.de

- [Kan05] Kang Won-Jong: *Mikrolithographische Verfahren auf der Basis von SU-8-Dicklack zur Realisierung mikrooptischer Komponenten*. Dortmund, Universität Dortmund, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik, Dissertation 2005
- [Neu08] Neumann Norbert, Ebermann Martin, Kurth Steffen, Hiller Karla: Tunable infrared detector with integrated micromachined Fabry- Perot filter. In: *J. Micro/ Nanolith. MEMS MOEMS (2008)*, 7 (2), 2100-1 bis 21004-9
- [Nor05] Nordström Maria, Johansson Alicia, Noguerón Encarnacion Sánchez, Clausen Bjarne, Calleja Montserrat, Boisen Anja: Investigation of the bond strength between the photo-sensitive polymer SU-8 and gold. In: *Microelectronic Engineering (2005)*, 152 bis 157
- [Pan02] Pan C-T, Yang H, shen S-C, Chou M-C, Chou H-P: A low-temperature wafer bonding technique using patternable materials. In: *J. Micromech. Microeng 12 (2002)*, 611 bis 615
- [Ros09] Roscher Frank: *Technologieentwicklung, Fertigung und Charakterisierung eines mikromechanischen Fabry-Perot-Filters mit neuartigen Schichtmaterialien*, Chemnitz, Technische Universität Chemnitz, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik, Projektarbeit 2009
- [Sta10] Statistisches Bundesamt Wiesbaden: *Unfälle unter Einfluss von Alkohol, Drogen, Rauschgift Deutschland 2002 – 2009*, Wiesbaden, 2010
- [Tia05] Tian J., Bartek M.: *Low Temperature Wafer Level Packaging of RF-MEMS Using SU-8 Contact Printing*, 2005
- [TUC07] TU-Chemnitz: Vorlesungsskript „Mikrotechnologien“ Prof. Thomas Geßner, 2007
- [TUC09] TU-Chemnitz: Praktikumsanleitung Montage/Bonden, Unter: https://www.tu-chemnitz.de/etit/microtec/lehre/praktika/V8_Montage-Bonden.pdf, Zugriff am 2010-01-11 18:21.
- [Wie01] Wiegand Marco: *Auswirkung einer Plasmabehandlung auf die Eigenschaften des Niedertemperatur-Waferbondens monokristalliner Siliziumoberflächen*. Halle, Martin- Luther-Universität-Halle-Wittenberg, Mathematisch-Naturwissenschaftlich-Technische Fakultät, Dissertation 2001
- [Wie06] Wiemer Maik, Jia Chenping, Toepper Michael, Hauck Karin: Wafer Bonding with BCB and SU-8 for MEMS Packaging. In: *Systemintegration Technology Conference Dresden 2006*, 1401 bis 1404

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1: Verkehrsunfälle unter Alkoholeinfluss 2000-2009 [Sta10]	9
Abbildung 1.2: Detektor mit Fabry-Pérot-Filter zur Infrarot-Gasanalyse [Inf10].....	10
Abbildung 2.1: Schematischer Aufbau des Gasanalyseesystems [Inf10].....	13
Abbildung 2.2: Erzeugung der Vielstrahlinterferenz [Gri07].....	13
Abbildung 2.3: Detektoraufbau des Infrarot Gasanalyseesystems [Inf10].....	14
Abbildung 3.1: 3D-CAD-Modell des FPI4	15
Abbildung 3.2: Schematischer Aufbau FPI4	16
Abbildung 3.3: a) Vereinzelter FPI4-Chip, b) Detailansicht einer Feder eines FPI4-Chips ...	16
Abbildung 3.4: Aufgebrochener stickender Chip	17
Abbildung 3.5: Durch thermische Abdichtfolie verschmutztes Kontaktpad und Kontaktloch .	18
Abbildung 4.1: a) WLI-Aufnahme und b) IR-Aufnahme eines stickenden Chips	21
Abbildung 4.2: a) Festkleben der Abdichtfolie am ARC und b) Verhindern des Festklebens	22
Abbildung 4.3: Chipbezeichnung auf dem Oberteil	23
Abbildung 4.4: a) normale Elektrode und b) neue geteilte Elektrode	24
Abbildung 5.1: Schematische Darstellung FPI-SFB	28
Abbildung 5.2: Schematische Darstellung FPI-SU8	32
Abbildung 5.3: Schematische Darstellung der selektiven Beschichtung	36
Abbildung 6.1: schematische Darstellung der fünf Messpunkte je Wafer.....	38
Abbildung 6.2: Justage der optischen Schichten im Unterteil-Wafer #1	44
Abbildung 6.3: a) Oberteil mit Abstandshalter, b) Unterteil mit strukturiertem Isolatorstapel	46
Abbildung 6.4: REM-Aufnahmen der "quadratischen Erscheinungen"	50
Abbildung 6.5: Vergleich des Defektbefalls zwischen a) Randchip D1 zu b) Mittenchip D5 .	51
Abbildung 6.6: Schlechte Justage in der a) BRAGG-Beschichtung, b) ARC-Beschichtung ..	53

Abbildung 7.1: FPI-Unterteil mit SU8-Bondrahmen nach Belichtung/Entwicklung	60
Abbildung 7.2: Wassereinbruch zwischen a) UV-Folie/Bluetape, b) UV-Folie/UV-Folie	64
Abbildung 7.3: Schervorrichtung.....	65
Abbildung 7.4: Scherversuch – abgesichertes Oberteil vom Unterteil	65
Abbildung 7.5: a) Prinzipdarstellung und b) Kräftedreieck des Scherversuchs	66
Abbildung 7.6: Vergleich der SU8-Bondrahmen real zu theoretisch	68
Abbildung 7.7: Vergleich der Bondfestigkeiten der beiden Bondrahmenstrukturen	70
Abbildung 7.8: Abgescherter Chip des Verbundes #8.....	70
Abbildung 7.9: Schematische Darstellung der möglichen SU8-Rahmenprofile.....	72
Abbildung 7.10: Für das Bonden vorbereiteter Verbund	73
Abbildung 7.11: Ablauf des Direktbondens.....	74
Abbildung 7.12: Modellvorstellung des Direktbondvorganges [TUC07]	75
Abbildung 7.13: Bondrahmen mit Schichtresten/Partikeln des Unterteils 910/17/3.....	77
Abbildung 7.14: IR-Aufnahme des Bondversuchs 910/17/3 + einseitig polierter Wafer	77
Abbildung 7.15 a) Prozessplan für das SU8, b) Unterschied Negativ-Positivresist [Kan05] .	79
Abbildung 7.16: Eichkurve für das SU8-Nennstärke 5µm.....	79
Abbildung 7.17: Ablauf des Standard-SU8-Bondens mit 105 °C // 1 bar.....	80
Abbildung 7.18: WLI-Aufnahme eines Reflektorträgers bei a) 0 V, b) bei 59 V.....	82

Tabellenverzeichnis

Tabelle 4.1: Vergleich der optischen Designs V2f und V5g.....	19
Tabelle 4.2: Lösungsansätze zur Vermeidung von Sticking	21
Tabelle 4.3: Vergleich a) der normalen Feder gegenüber b) der supersoftern Feder	24
Tabelle 4.4: Vergleich der Variante-SFB mit der Variante-SU8.....	26
Tabelle 5.1: Prozesstechnische Realisierung der SFB-Oberteile.....	29
Tabelle 5.2: Prozesstechnische Realisierung der SFB-Unterteile	30
Tabelle 5.3: Prozesstechnische Realisierung der SU8-Oberteile.....	33
Tabelle 5.4: Prozesstechnische Realisierung der SU8-Unterteile	35

Tabelle 6.1: Zielwertvorgaben der Geometrie für die SFB-Variante	37
Tabelle 6.2: Grubenätzung im Oberteil der SFB-Variante	38
Tabelle 6.3: Federnätzung im Oberteil der SFB-Variante.....	40
Tabelle 6.4: Grubenätzungen im Unterteil der SFB-Variante	40
Tabelle 6.5: Dicke und Rauigkeit des Aluminiumschirmes im Unterteil der SFB-Variante	41
Tabelle 6.6: Dicke der Aluminiumelektrode und des elektrostatischen Stapels im Unterteil der SFB-Variante	42
Tabelle 6.7: Auswertung der optischen Beschichtung der SFB-Variante	43
Tabelle 6.8: optischer Abstände der möglichen SFB-Verbunde	45
Tabelle 6.9: Ermittlung des elektrostatischen Abstandes der möglichen SFB-Verbunde.....	46
Tabelle 6.10: Zielwertvorgaben der Geometrie für die SU8-Variante	47
Tabelle 6.11: Grubenätzung des optischen Spaltes im Oberteil der SU8-Variante	48
Tabelle 6.12: Federätzung im Oberteil der SU8-Variante.....	49
Tabelle 6.13: Grubenätzung im Unterteil der SU8-Variante	49
Tabelle 6.14: Dicke und Rauigkeit des Aluminiumschirmes im Unterteil der SU8-Variante ..	51
Tabelle 6.15: Dicke der Aluminiumelektrode und des elektrostatischen Stapels der Unterteile der SU8-Variante	52
Tabelle 6.16: Auswertung der optischen Beschichtung der SU8-Variante	53
Tabelle 6.17: SU8-Dicke für den festen optischen Abstände der möglichen SU8-Verbunde	55
Tabelle 6.18: Ermittlung des elektrostatischen Abstandes der möglichen SU8-Verbunde....	56
Tabelle 7.1: Varianten der SU8-Testverbunde mit abgerundeten Rahmenprofil.....	59
Tabelle 7.2: Prozesstechnische Realisierung der Unterteile der SU8-Testverbunde.....	60
Tabelle 7.3: Grubenätzung und SU8-Dicke der Bondtests.....	61
Tabelle 7.4: Anzahl von Gutchips und Chips mit Fehlern/Defekten der Bondtests	62
Tabelle 7.5: Bondausbeute der Bondtestverbunde mit realer SU8-Rahmenstruktur.....	63
Tabelle 7.6: Scherkräfte und Scherfestigkeiten der realen SU8-Rahmenstruktur.....	67
Tabelle 7.7: Varianten der Bondverbunde mit theoretischen Bondflächen.....	68
Tabelle 7.8: Anzahl von Gutchips und Chips mit Fehlern/Defekten der Bondtests	68
Tabelle 7.9: Bondausbeute der Testverbunde mit theoretischer SU8-Rahmenstruktur	69
Tabelle 7.10: Scherkräfte und Scherfestigkeiten der theoretischen SU8-Rahmenstruktur ...	69
Tabelle 7.11: Bondausbeute der mit SU8 gebordeten Verbunde	81

Anlagenverzeichnis

A Prozesspläne	91
Bondablauf Direktbonden.....	91
Bondablauf SU8-Bonden	91
B Wafermaps	92
Bondtests SU8 #1 – mit abgerundeten Bondrahmen 90 °C // 1 bar.....	92
Bondtests SU8 #2 – mit abgerundeten Bondrahmen 90 °C // 3 bar.....	93
Bondtests SU8 #3 – mit abgerundeten Bondrahmen 105 °C // 1 bar.....	94
Bondtests SU8 #4 – mit abgerundeten Bondrahmen 105 °C // 3 bar.....	95
Bondtests SU8 #5 – mit abgerundeten Bondrahmen 120 °C // 1 bar.....	96
Bondtests SU8 #6 – mit abgerundeten Bondrahmen 120 °C // 3 bar.....	97
Bondtests SU8 #7 – ohne abgerundeten Bondrahmen 105 °C // 3 bar.....	98
Bondtests SU8 #8 – ohne abgerundeten Bondrahmen 120 °C // 1 bar.....	99

A Prozesspläne

Bondablauf Direktbonden

1		Buffing	Seite, die als VS steht	Per Hand, nur DI-Wasser	alle	
2		Spülen DI Wasser	10 min	Trocknen im Ofen	alle	
3		Sichtkontrolle (Partikel)		selbst	alle	
4		O2-Plasmaaktivierung Leibold	Seite, die als VS steht	Siehe 10.12.09 5 min	alle	
5		Spülen DI Wasser	10 min	Trocknen im Ofen	alle	
6		SDB Unterlagewafer + Auflagewafer mit Gruben	Alter SB6, Normaldruck, 1 bar Tooldruck	Justage im alten Bonder	Oberteil + Unterteil	
7		Sichtkontrolle IR		1 Tag stehen lassen		
8		Temperung	200°C 4h			
9		Sichtkontrolle IR				
10		Sägen				

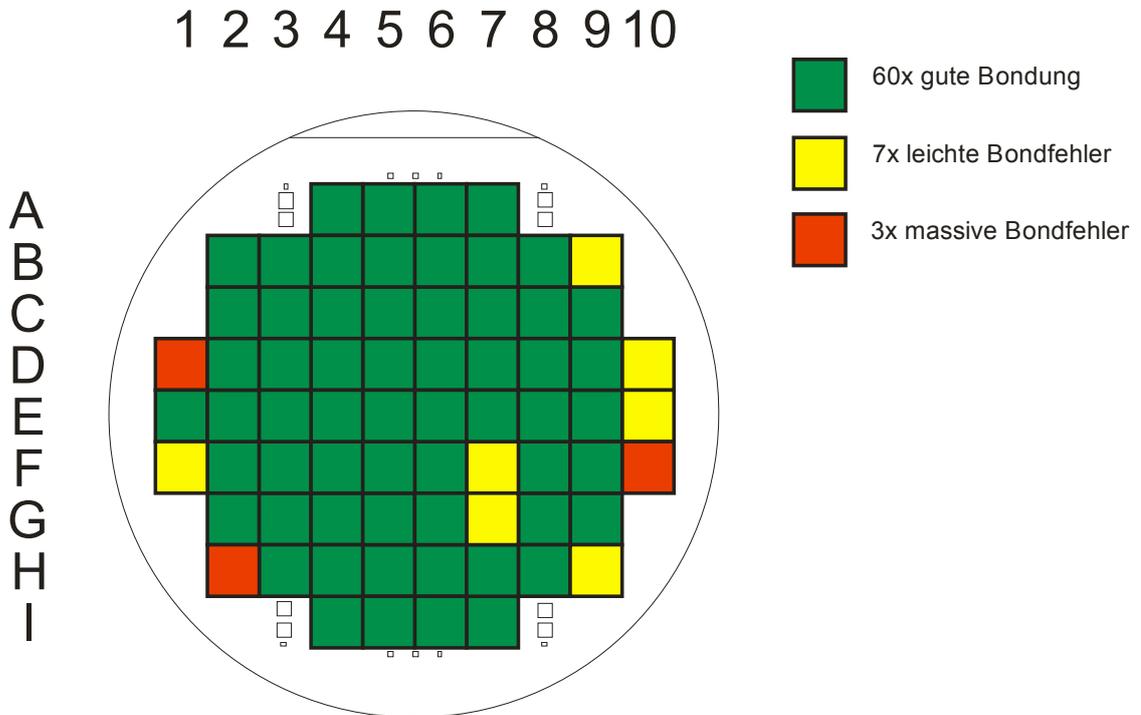
Bondablauf SU8-Bonden

1		Bonden mit SU-8: in Varianten				
2		Temperung	150°C, 30 min		Unterteile	
3		O2-Plasma Stripper RR2	3 min, liegend!!		Unterteile	
4		Aufschleudern SU-8/5	2900 U/min, VS	Zieldicke 5µm	Unterteile	
5		Fotolithographie	FPI4 1BR1 VS		Unterteile	
6		SU8-Dicke messen		selbst	Unterteile	
7		DI-Spülen	10 min		Oberteile	
8		Bonden in Varianten				
9		A: Bonden mit Oberteil	Alter SB6, 1 bar Tooldruck, 90°C Bondtemperatur	Justage im alten Bonder	Oberteil + Unterteil	
10		Sichtkontrolle		selbst		
11		Sägen				

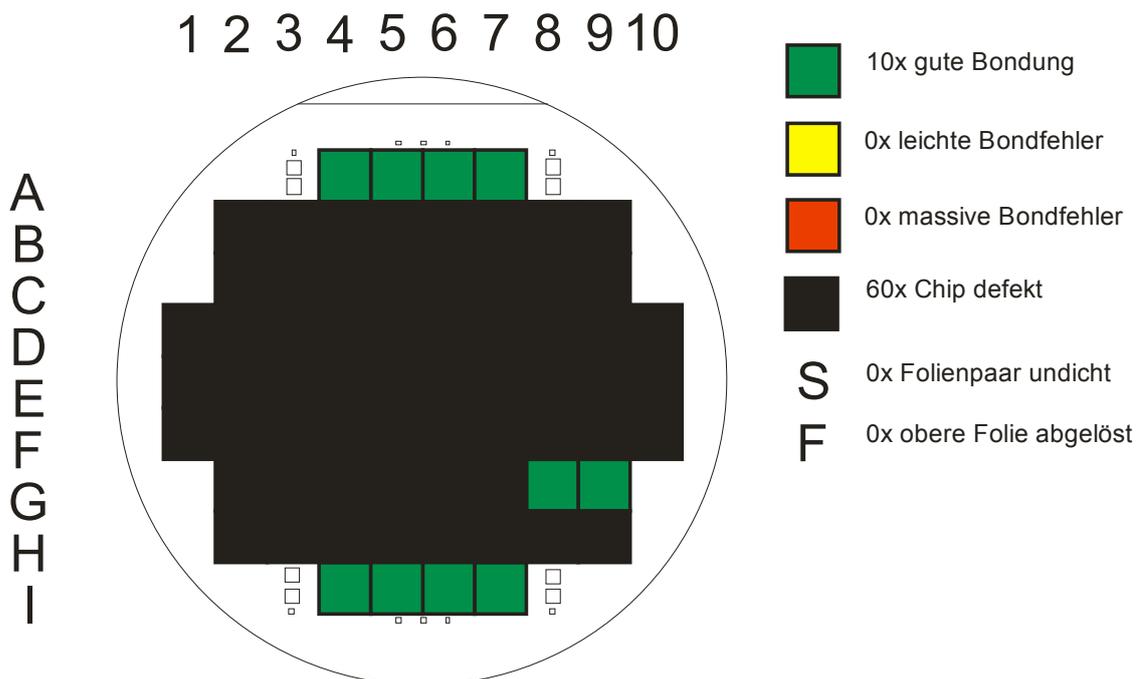
B Wafermaps

Bondtests SU8 #1 – mit abgerundeten Bondrahmen 90 °C // 1 bar

gebondet: 16.09.2010

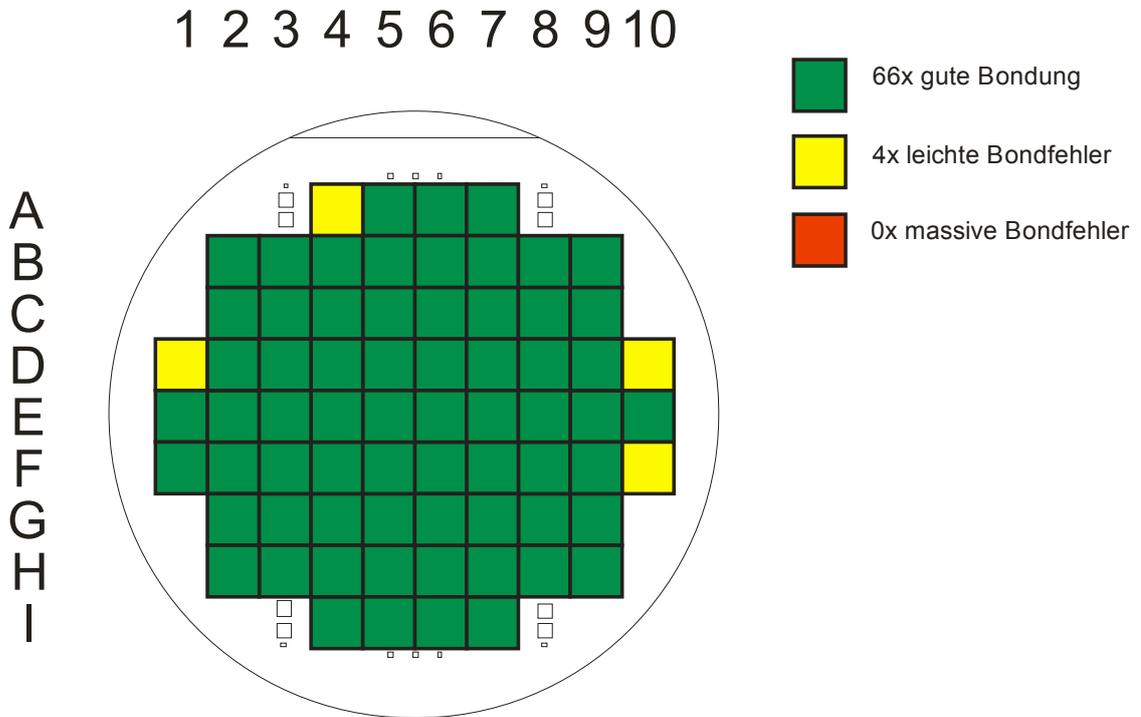


vereinzelt: 22.09.2010, strukturierte UV + UV-Folie

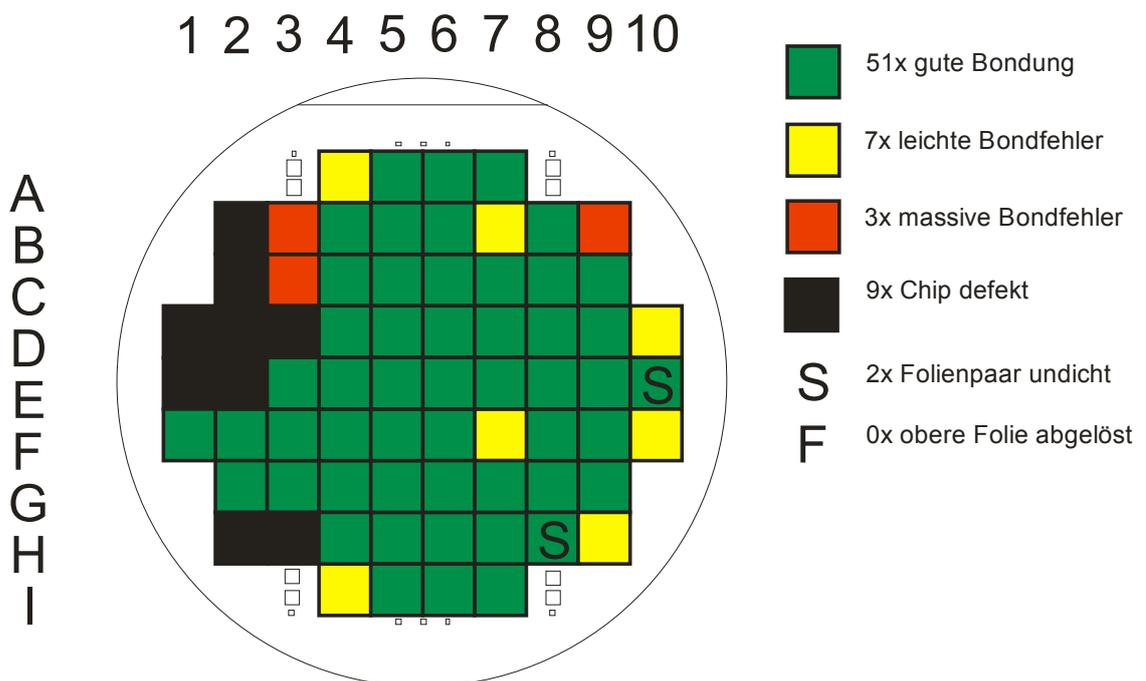


Bondtests SU8 #2 – mit abgerundeten Bondrahmen 90 °C // 3 bar

gebondet: 15.09.2010

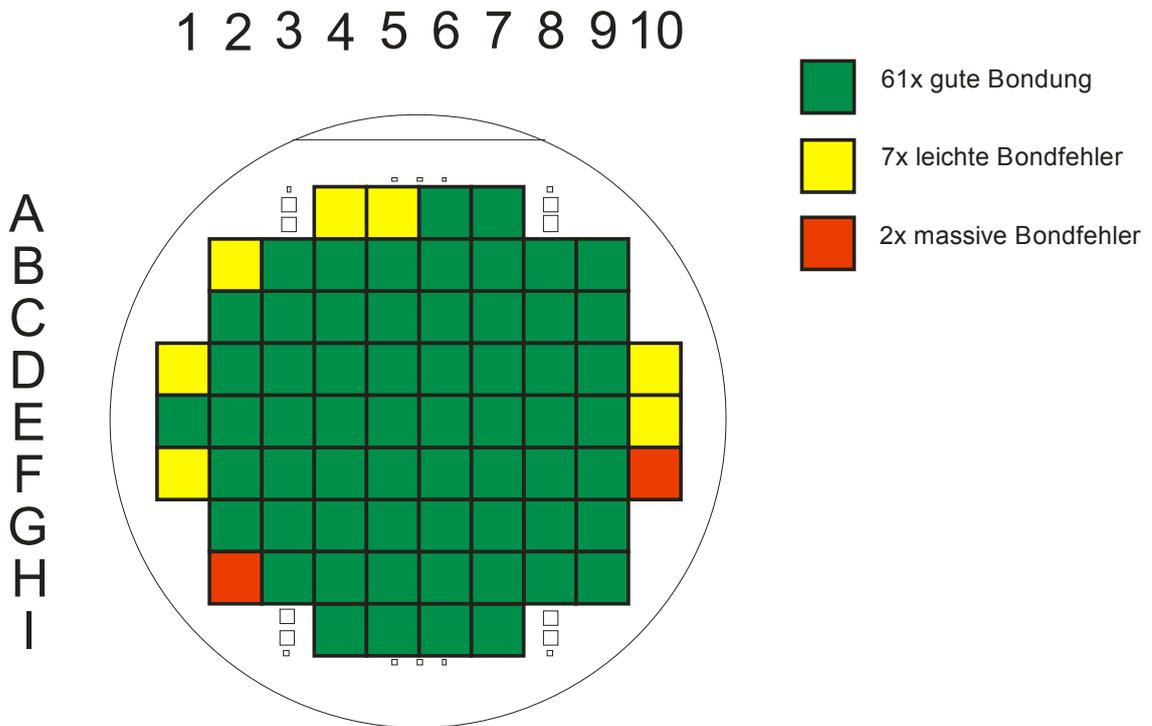


vereinzelt: 22.09.2010, strukturierte UV + UV-Folie

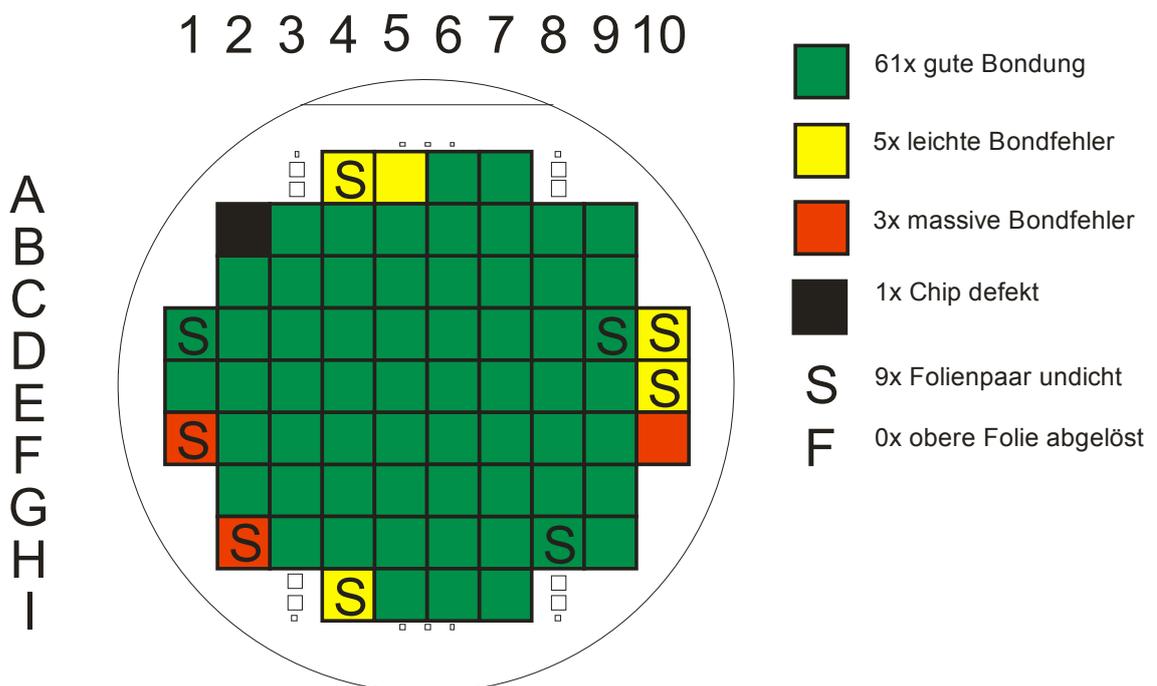


Bondtests SU8 #3 – mit abgerundeten Bondrahmen 105 °C // 1 bar

gebondet: 15.09.2010

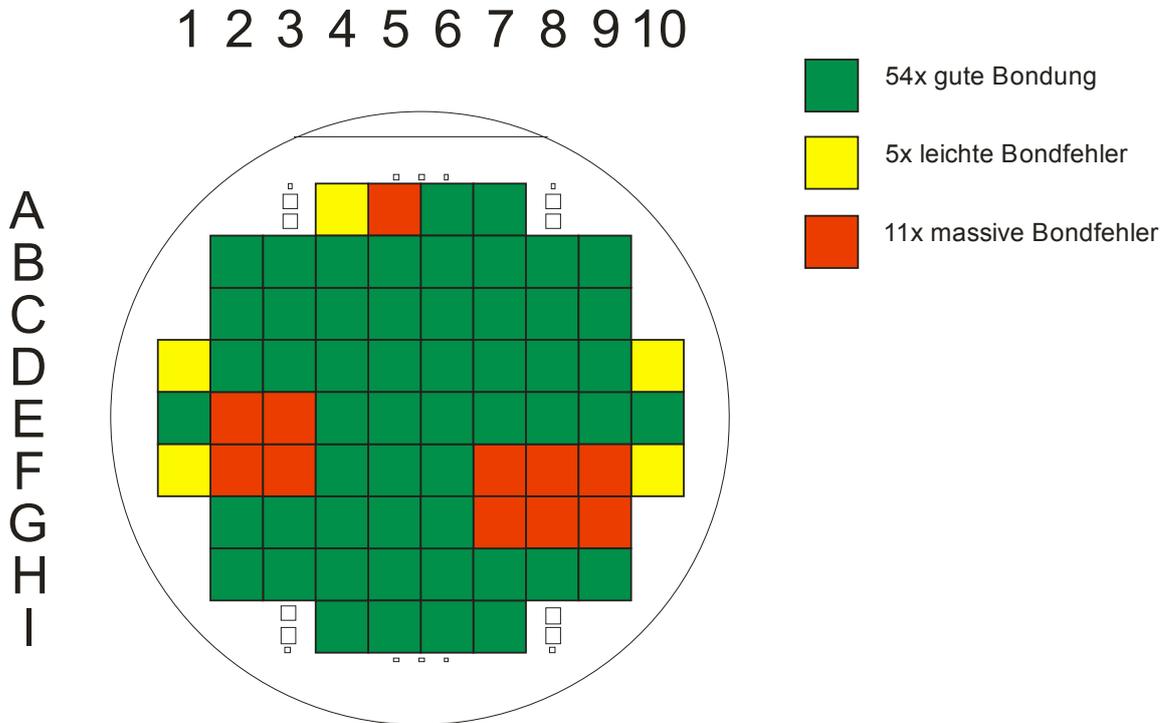


vereinzelt: 22.09.2010, strukturierte UV + UV-Folie

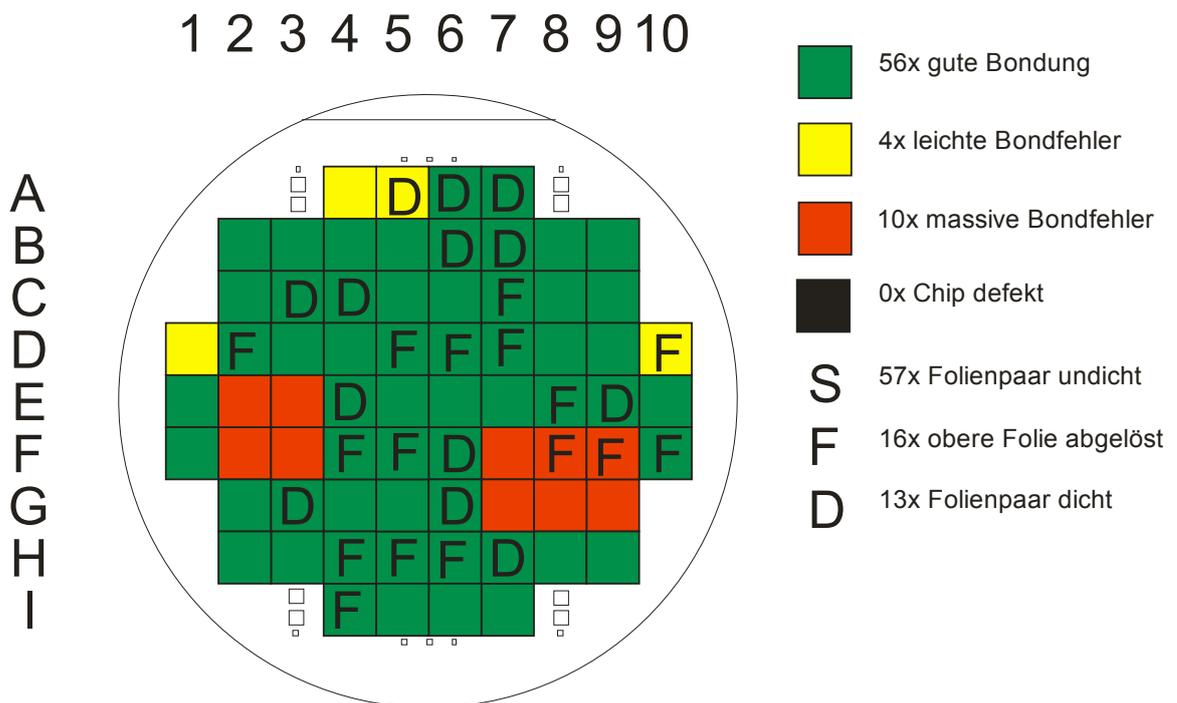


Bondtests SU8 #4 – mit abgerundeten Bondrahmen 105 °C // 3 bar

gebondet: 15.09.2010

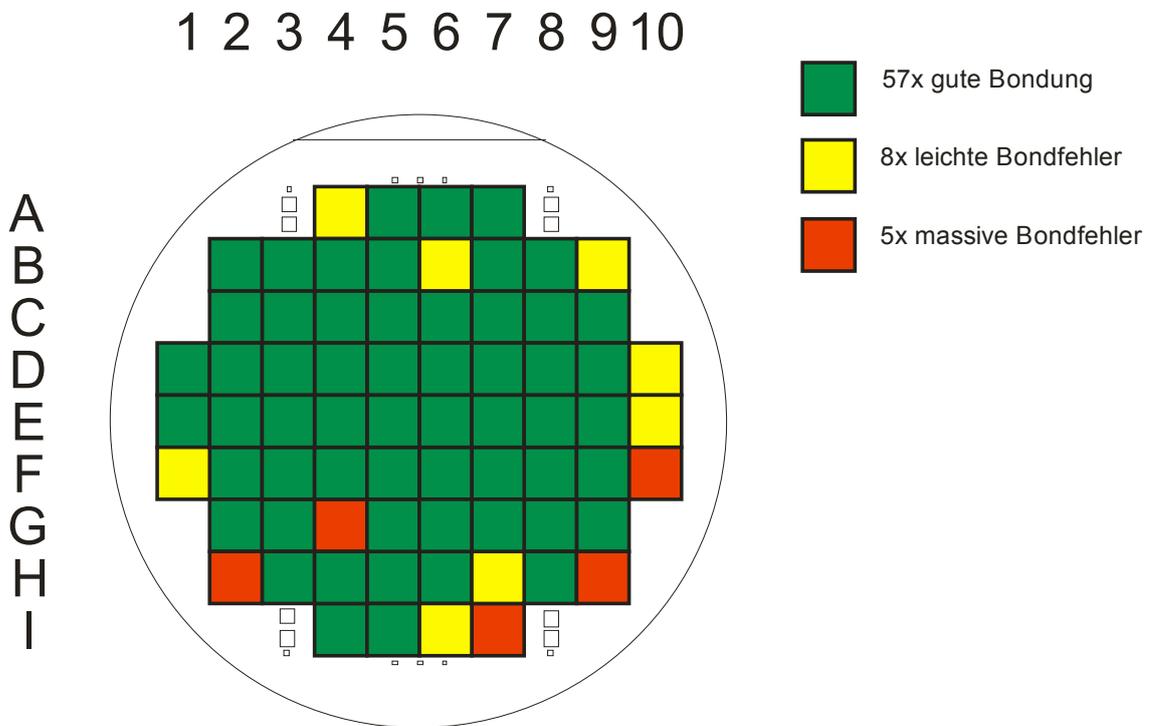


vereinzelt: 22.09.2010, strukturierte UV + Bluetape

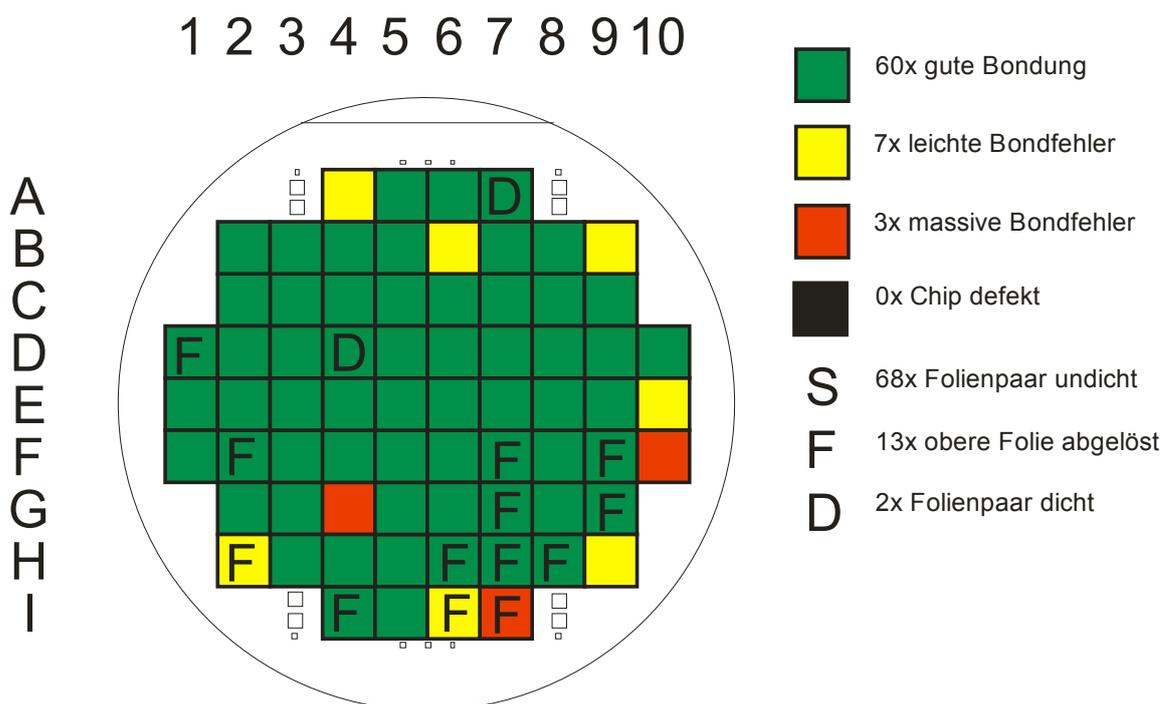


Bondtests SU8 #5 – mit abgerundeten Bondrahmen 120 °C // 1 bar

gebondet: 14.09.2010

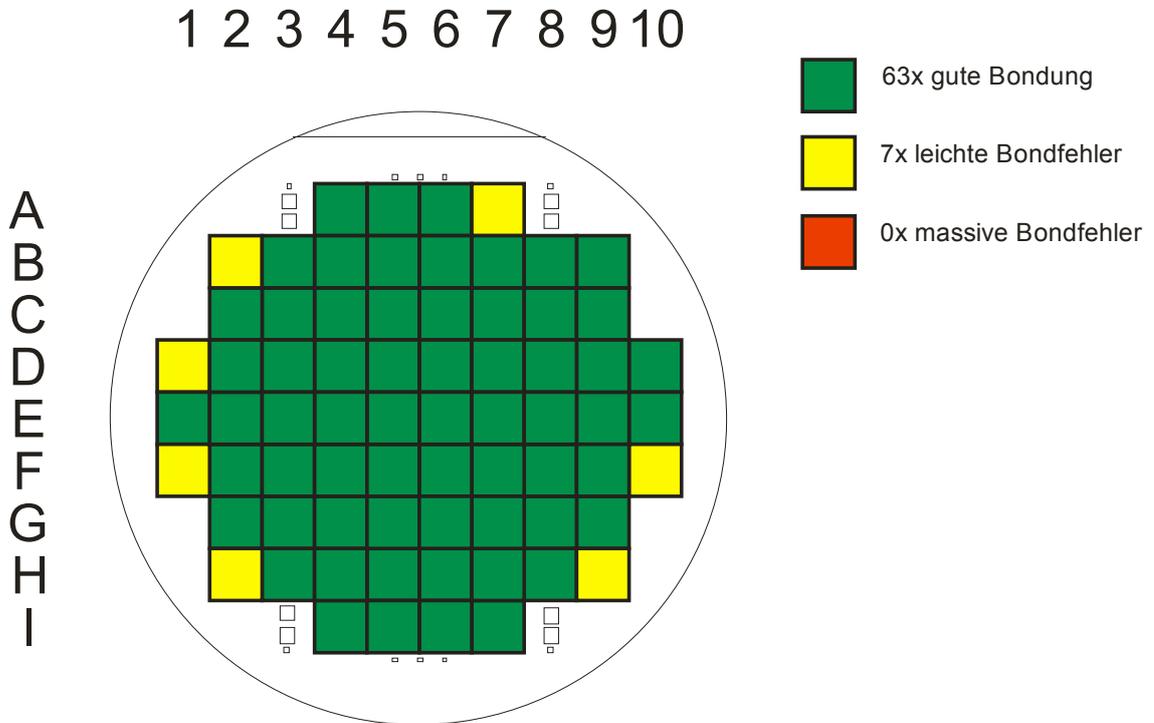


vereinzelt: 22.09.2010, strukturierte UV + Bluetape

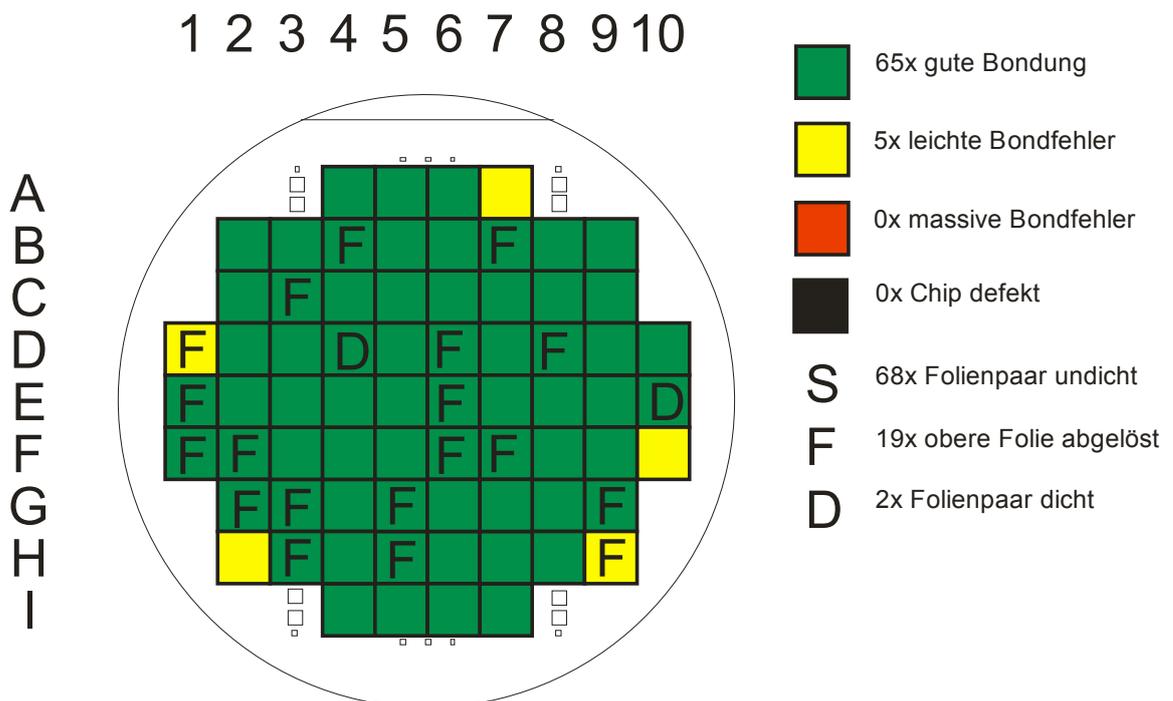


Bondtests SU8 #6 – mit abgerundeten Bondrahmen 120 °C // 3 bar

gebondet: 14.09.2010

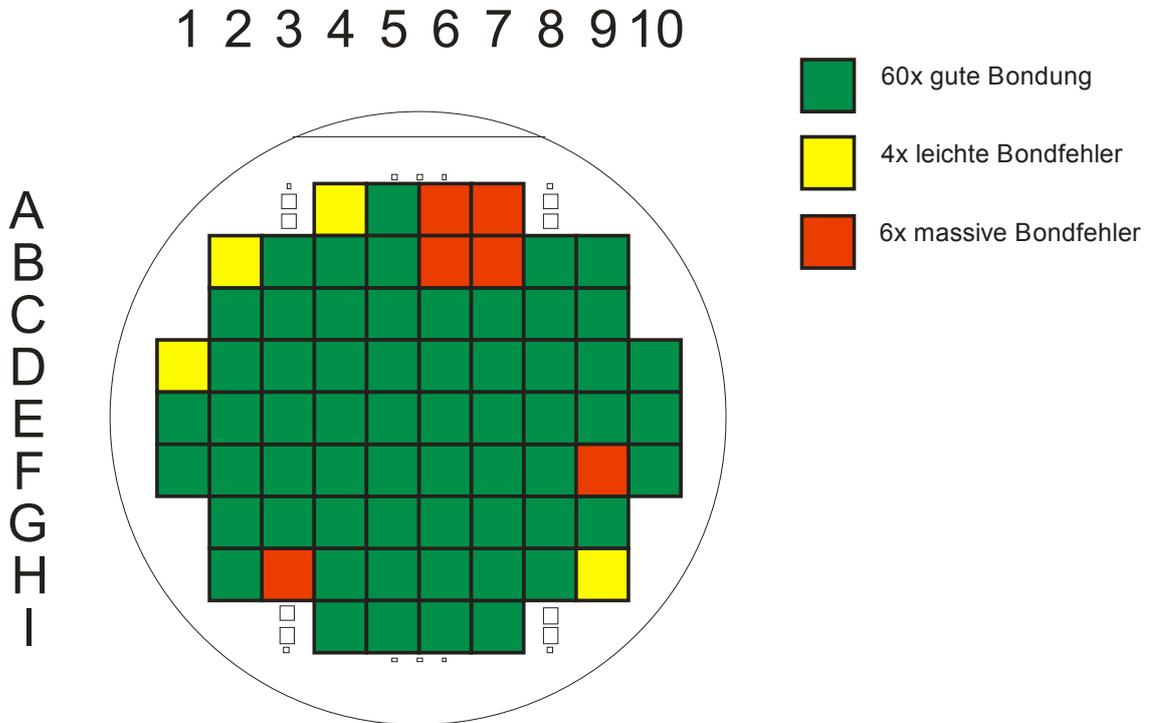


vereinzelt: 22.09.2010, strukturierte UV + Bluetape

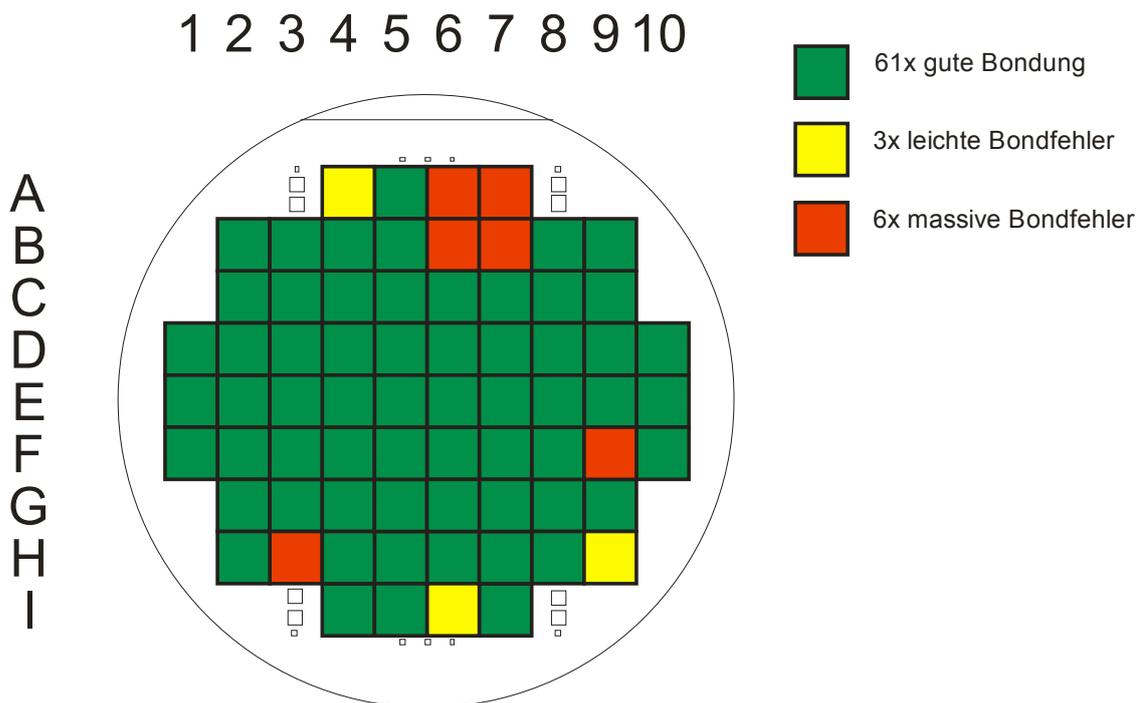


Bondtests SU8 #7 – ohne abgerundeten Bondrahmen 105 °C // 3 bar

gebondet: 21.10.2010

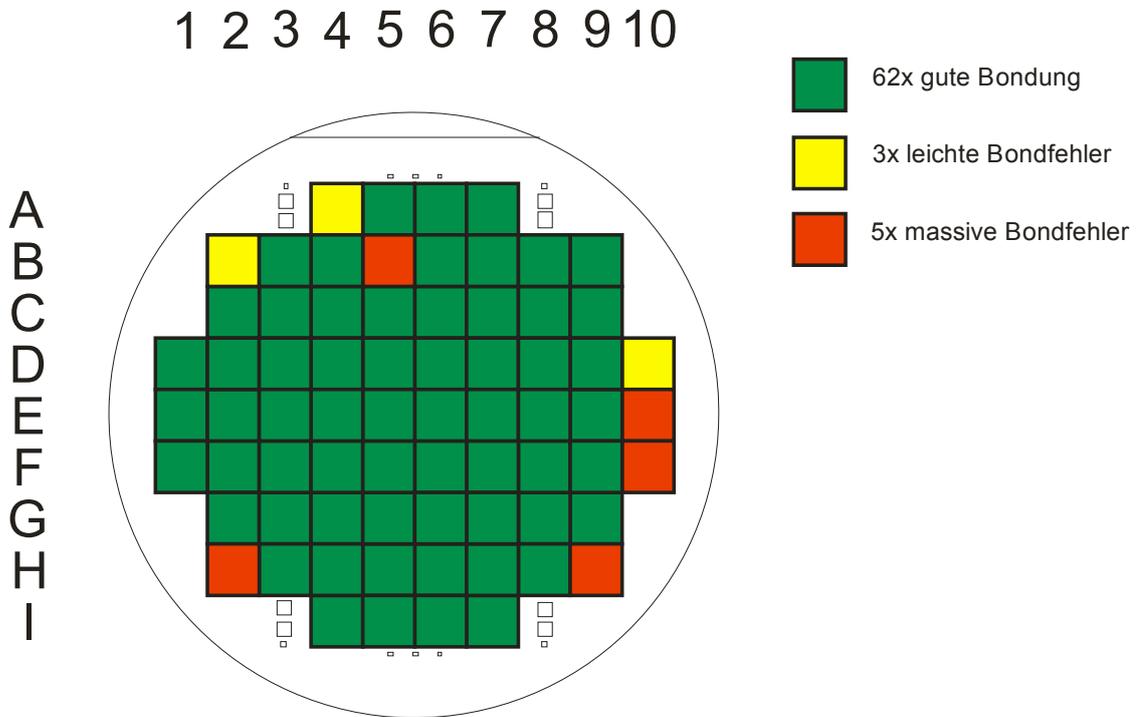


vereinzelt: 25.10.2010

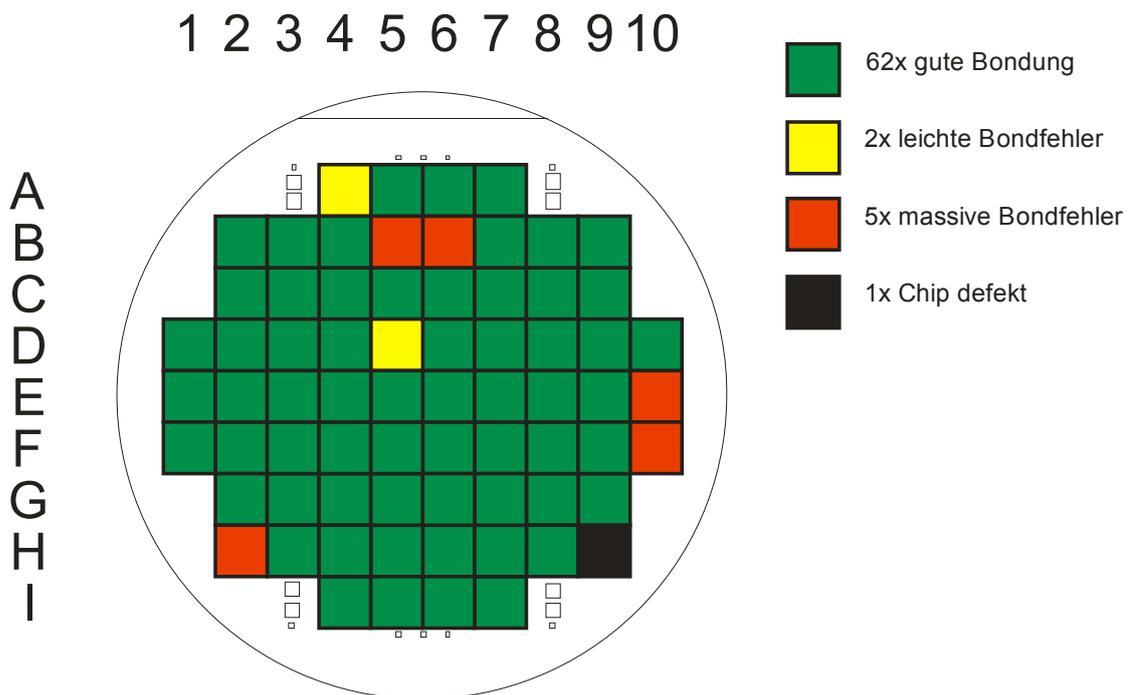


Bondtests SU8 #8 – ohne abgerundeten Bondrahmen 120 °C // 1 bar

gebondet: 21.10.2010



vereinzelt: 25.10.2010



Selbstständigkeitserklärung

Ich erkläre hiermit, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig und nur unter Verwendung der angegebenen Quellen und Hilfsmittel angefertigt habe. Die vorliegende Arbeit ist frei von Plagiaten. Alle Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus Quellen entnommen wurden, sind als solche gekennzeichnet. Diese Arbeit wurde in gleicher oder ähnlicher Form noch bei keinem anderen Prüfer als Prüfungsleistung eingereicht und ist auch noch nicht veröffentlicht.

Ort, Abgabedatum

Unterschrift des Verfassers