



Peter Zorn, Dipl.-Ing.

Kühlung für Leistungshalbleiter

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der technischen Wissenschaften

Eingereicht an der

Technische Universität Graz

Betreuer

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Matthäus Siebenhofer

Institut für Chemische Verfahrenstechnik und Umwelttechnik

Firmenbetreuer

Dr. rer. nat. Carsten von Koblinski

Infineon

Graz, Dezember 2015



Institut für chemische
Verfahrenstechnik
und Umwelttechnik



Infineon Technologies
Austria AG



Technische
Universität
Graz

Dissertation

Kühlung für Leistungshalbleiter

zur Erlangung des akademischen Grades
Dr. techn.
der Studienrichtung Verfahrenstechnik

Erstellt von:
Peter Zorn

Unter der Leitung von:
Univ. - Prof. Dipl. - Ing. Dr. techn. Matthäus Siebenhofer
Dr. rer. nat. Carsten v. Koblinski

Dissertation Kühlung für Leistungshalbleiter Graz Dezember 2015

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Dissertation identisch.

Ort, Datum

Unterschrift

AFFIDAVIT

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources/resources, and that I have explicitly indicated all material which has been quoted either literally or by content from the sources used. The text document uploaded to TUGRAZonline is identical to the present doctoral dissertation.

Place, Date

Signature

Sperrvermerk

Die vorgelegte Dissertation mit dem Titel:

"Kühlung für Leistungshalbleiter"

beinhaltet vertrauliche und interne Daten des Unternehmens:

Infineon Technologies Austria AG

Die Einsicht in die Dissertation ist Unbefugten nicht gestattet. Ausgenommen hiervon sind die Gutachter sowie berechnigte Mitglieder des Prüfungssenates. Die Vervielfältigung und Veröffentlichung der Dissertation – auch auszugsweise – ist grundsätzlich nicht erlaubt.

Eine Ausnahme von dieser Regelung bedarf einer Erlaubnis des Unternehmens Infineon Technologies Austria AG:

Confidentiality clause

This Ph.D. thesis:

"Cooling system for power semiconductors"

contains confidential data of

Infineon Technologies Austria AG

This work may only be made available to the first and second reviewers and authorized members of the board of examiners. Any publication and duplication of this Ph.D. thesis - even in part - is prohibited.

An inspection of this work by third parties requires the expressed permission of the author and Infineon Technologies Austria AG.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei meinen Betreuern Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Matthäus Siebenhofer und Dr. Dipl.-Chem. Carsten von Kobinski, für die Ermöglichung meiner Dissertation bei der Infineon Technologies Austria AG sowie für die hervorragende Betreuung bedanken.

Ebenso möchte ich allen Kollegen bei Infineon bedanken, die mir bei meiner Dissertation geholfen haben, vor allem für die sehr interessanten Diskussionen und Denkanstöße.

Besonderer Dank gilt meiner Familie und meiner Freundin Gerlinde Stadler, die mich immer in jeder erdenklichen Weise unterstützt haben.

Überdies möchte ich mich bei allen meinen Freunden bedanken, durch die ich im Leben neben dem Studium Kraft und Motivation tanken konnte.

Kurzfassung

Im Rahmen dieser Dissertation wurde ein Aufbau einer aktiven Wasserkühlung für Leistungshalbleiter auf Waferenebene, mit Produktionsverfahren der Halbleitertechnik, entwickelt. Hierfür wurden Konzepte für eine einseitige und eine zweiseitige Kühlung entworfen. Das Konzept der einseitigen Kühlung wurde anhand eines Demonstrators umgesetzt, und die Produktionsfähigkeit dieser Kühlung auf Waferenebene bewiesen. Die beidseitige Kühlung wurde auf ihre Fertigbarkeit durch die Umsetzung der produktionskritischen Schritte auf Waferenebene überprüft.

Die Schwerpunkte der Arbeit sind die Prozessfolge für den Aufbau der Kühlungen, die Prozessschritte zur Glasstrukturierung und die Waferverbindungsverfahren. Bei der Glasstrukturierung wurde im Rahmen der Untersuchungen der nasschemischen Ätzung von Glas eine Anleitung für die Bestimmung der Ätzrate entwickelt. Bei der Untersuchung der Waferverbindungen wurden mehrere Methoden auf ihre Eignung für den Aufbau der Kühlungen untersucht.

Es wurden Berechnungen zur Charakterisierung der Kühlung hinsichtlich des Wärmeüberganges zum Fluid und der Wärmeleitung im stationären Fall durchgeführt. Bei der Wärmeleitung wurden die in dieser Arbeit erstellten Konzepte mit der heute üblichen Kühlung eines Leistungshalbleiters in einem Standardmodul gegenübergestellt. Es konnte gezeigt werden, dass durch die Minimierung der Wärmeübergangswiderstände eine deutlich effektivere Kühlung durch die hier vorgestellten Konzepte möglich ist.

Die Konzepte der einseitigen und beidseitigen Kühlung beinhalten Wärmesenken, zur Minimierung von Temperaturspitzen. Die Charakterisierung dieser Temperaturspitzen wurde durch die Simulation von Wärmeimpulsen über ein FD-Verfahren in verschiedene Materialien durchgeführt.

Abstract

This thesis discusses the development of an active water cooling system for power semiconductors at wafer-level, with semiconductor production technologies. Therefore concepts for a one-sided and a two-sided cooling were designed. The concept of one-sided cooling was finally constructed on demonstrator level, whereby the production capability at wafer level was proven. The production capability of the double-sided cooling system was proven at the level of production-critical steps in wafer production.

The thesis focuses on the process sequence for the construction of cooling systems and the process steps of glass structuring and wafer bonding methods. In the framework of glass structuring, at the investigations of wet chemical etching of glass, a guideline for the glass etch rate was developed. At the wafer bonding processes multiple connection methods were tested for their suitability for the construction of the cooling systems.

Calculations for the characterization of the cooling systems, regarding the heat transfer to the fluid and the heat conduction were carried out in the stationary case. Regarding heat conduction, the concepts generated in this thesis were compared with a conventional cooling system of a power semiconductor in a standard module. As a result of this comparison it has been shown that the cooling systems developed in this thesis are significantly more effective than the cooling in a standard modules, by minimizing the heat transfer resistances.

The concepts of the one-sided and two-sided cooling systems include heat sinks, to minimize temperature peaks. The characterization of these temperature peaks was realized by simulating heat pulses with the finite difference method in various materials.

Außercurriculare Aktivitäten\Kurse \Trainings

Titel	Datum
Halbleiter - Trägertechnik	22.05.2012
Fertigungstechnik & Grundlagen der HL-Technik	15.06.2012
Business Conduct Guideline	17.12.2012
Praktische Rhetorik 1	19.03.2013
Deviation Management/ Case Studies	17.06.2013
Information Security – Modul 1	16.07.2013
Information Security – Modul 2	16.07.2013
Information Security – Modul 3	16.07.2013
Invention Disclosure	16.10.2013
Bases of semiconductor. technology TS	30.06.2014

Inhaltsverzeichnis

1	EINLEITUNG	1
2	GRUNDLAGEN	2
2.1	MIKROSYSTEMTECHNIK	2
2.2	HALBLEITER	3
2.2.1	<i>Einfluss der Temperatur auf die elektrische Leitung.....</i>	<i>4</i>
2.2.2	<i>Einfluss der Halbleiterdotierung auf die elektrische Leitfähigkeit</i>	<i>4</i>
2.2.3	<i>p-n Übergang ohne äußere Spannung</i>	<i>6</i>
2.2.4	<i>p-n Übergang in Sperrpolung.....</i>	<i>7</i>
2.2.5	<i>p-n Übergang in Flusspolung.....</i>	<i>8</i>
2.2.6	<i>p-n Übergang Durchbruchmechanismen</i>	<i>9</i>
2.3	HALBLEITER BAUELEMENTE	12
2.3.1	<i>Diode.....</i>	<i>13</i>
2.3.2	<i>IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor).....</i>	<i>14</i>
2.3.3	<i>Schaltung IGBT mit "Freilauf"diode.....</i>	<i>15</i>
2.4	GLAS	16
2.4.1	<i>Definition Glas.....</i>	<i>16</i>
2.4.2	<i>Struktur des Glases</i>	<i>18</i>
2.4.3	<i>Zusammensetzung von Glasnetzwerken</i>	<i>19</i>
2.4.4	<i>Glaskeramiken</i>	<i>20</i>
3	TESTSYSTEM	22
4	KÜHLUNG VON LEISTUNGSHALBLEITERBAUELEMENTEN IM STANDARDMODUL	23
5	WÄRME	24
5.1	WÄRMEGENERATION IM HALBLEITERBAUELEMENT	24
5.1.1	<i>Verlustleistung</i>	<i>25</i>
5.2	KÜHLUNG.....	26
5.3	WÄRMESENKE.....	28
6	GEKÜHLTE LEISTUNGSHALBLEITER.....	29
6.1	KONZEPTE, ZIELSETZUNGEN	29
6.1.1	<i>Einseitig flüssigkeitsgekühlter, in Glas gekapselter, Leistungs-halbleiter</i>	<i>29</i>
6.1.2	<i>Beidseitig flüssigkeitsgekühlter, in Glas gekapselter, Leistungs-halbleiter</i>	<i>29</i>
6.2	AUFBAU/ENTWICKLUNG DES EINSEITIG FLÜSSIGKEITSGEKÜHLTEN IN GLAS GEKAPSELTEN LEISTUNGSHALBLEITERS AM TESTSYSTEM.....	30
6.2.1	<i>Vorbereitung der Nasschemischen Ätzung des Basisglases.....</i>	<i>30</i>
6.2.2	<i>Nasschemische Ätzung des Basisglases</i>	<i>33</i>
6.2.3	<i>Entfernung der Hartmaske und des Fotolacks vom Basisglas</i>	<i>33</i>
6.2.4	<i>Fertigung Kühlkavitätenwafer.....</i>	<i>35</i>
6.2.5	<i>Auswahl der Waferverbindungsmethode.....</i>	<i>37</i>
6.2.6	<i>Waferverbindung von Basiswafer und Kühlkavitätenwafer</i>	<i>38</i>
6.2.7	<i>Aufbau der Wärmesenke am Basiswafer oder am Waferstack Basiswafer-Kühlkavitätenwafer</i>	<i>39</i>

6.2.8	Löten des Testsystem auf die Wärmesenke	41
6.2.9	Vereinzelung des einseitig flüssigkeitsgekühlten in Glas gekapselten Leistungshalbleiterkühlsystem mit Testsystem	42
6.2.10	Aufbau des Kühlkreislaufs und Anschluss des einseitig flüssigkeitsgekühlten in Glas gekapselten Leistungshalbleiters	43
6.2.11	Ausführung des einseitig flüssigkeitsgekühlten in Glas gekapselten Leistungshalbleiter-Kühlelementes.....	44
6.2.12	Ausblick zur Optimierung durch Vergrößerung der Wärmeübertragungsfläche des in Glas gefassten flüssigkeitsgekühlten Leistungshalbleiters am Testsystem	45
6.3	AUFBAU/ENTWICKLUNG DES BEIDSEITIG FLÜSSIGKEITSGEKÜHLTEN IN GLAS GEKAPSELTEN LEISTUNGSHALBLEITERS AM TESTSYSTEM	46
6.3.1	Fertigung des Basiswafers	47
6.3.2	Fertigung des Basisdeckwafer.....	47
6.3.3	Fertigung des Rückseiten Kühlkavitätenwafer	49
6.3.4	Fertigung des Vorderseiten Kühlkavitätenwafer.....	50
6.3.5	Einkapselung der Bauelemente und Kontaktierung	51
7	FERTIGUNGSPROZESSE IN DER MEMS – UND HALBLEITERFERTIGUNG	54
7.1	REINIGUNGSPROZESSE.....	54
7.1.1	Fotolack - Entfernung.....	55
7.2	GLASSTRUKTURIERUNG.....	56
7.2.1	Nasschemische Glasstrukturierung	56
7.2.2	Mechanisches Bohren von Glas.....	58
7.2.3	Laserablation von Glas.....	58
7.2.4	Glasschleifen.....	59
7.2.5	Fotostrukturierung von Glas	59
7.3	CVD - CHEMICAL VAPOUR DEPOSITION.....	61
7.4	LITHOGRAPHISCHE FERTIGUNGSPROZESSE	63
7.4.1	Belackung	65
7.4.2	Belichtung.....	67
7.4.3	Entwickeln.....	69
7.5	TROCKENÄTZPROZESSE	70
7.5.1	Plasmaätzen	72
7.6	METALLISIERUNGSVERFAHREN	73
7.6.1	Bedampfung	73
7.6.2	Sputtern	74
7.6.3	Galvanik – Elektrochemische Abscheidung	75
7.7	VERBINDUNGSTECHNIKEN	79
7.7.1	Silizium-Direktbonden	79
7.7.2	Anodisches Bonden	83
7.7.3	Adhäsives Bonden.....	85
7.7.4	Glaslotverbindungen.....	93
7.7.5	Applizierungsverfahren für adhäsives Bonden und Glaslotbonden	95
7.8	LÖTEN.....	98
7.8.1	Reflowlöten.....	99
7.8.2	Drahtbonden.....	100
7.9	VEREINZELUNG	100

8	VERSUCHE	102
8.1	VERSUCHE ZUR GLAS-STRUKTURIERUNG	102
8.1.1	Nasschemisches Ätzen von Glas	102
8.1.2	Versuche zum mechanischen Bohren und Laserablation von Glas	112
8.2	VERSUCHE ZU WAFERVERBINDUNGSTECHNIKEN	115
8.2.1	Probenherstellung für die Untersuchungen.....	115
8.2.2	REM/EDX Untersuchungen der Glaslote und der keramischen Adhäsive	117
8.2.3	Untersuchungen zur mechanischen Festigkeit (Scherversuche)	117
8.2.4	Ergebnisse und Ergebnisinterpretation	118
8.3	VERSUCHE ZUR HAFTUNG VON METALLISIERUNGEN AUF EINEM GLASSUBSTRAT	123
8.3.1	Versuchsaufbau	123
8.3.2	Versuchsdurchführung	123
8.3.3	Ergebnisse und Ergebnisinterpretation	124
8.4	VERSUCH ZUR VOID-MINIMIERUNG BEIM REFLOWLÖTEN	125
8.4.1	Versuchsaufbau	125
8.4.2	Versuchsdurchführung	125
8.4.3	Ergebnisse und Ergebnisinterpretation	125
8.5	VERSUCHE ZUR KÜHLUNG IM LABORMAßSTAB, BEI DER EINSEITIGEN IN GLAS GEFASSTEN FLÜSSIGKEITSKÜHLUNG.....	126
8.5.1	Versuchsaufbau	127
8.5.2	Versuchsdurchführung	127
8.5.3	Ergebnisse und Ergebnisinterpretation	128
9	BERECHNUNGEN	131
9.1	THERMISCHE BERECHNUNGEN ZUR KÜHLUNG VON LEISTUNGSHALBLEITERN	131
9.1.1	Berechnungen erzwungene Konvektion bei der einseitige Kühlung	131
9.1.2	Berechnung der Chiprückseitentemperatur bei der einseitigen Kühlung.....	139
9.1.3	Berechnung der Chiprückseitentemperatur bei Aufbau in einem Standardmodul.....	143
9.1.4	Berechnung der Chiptemperatur und der Grenzflächentemperaturen bei der beidseitigen Kühlung	144
9.1.5	Berechnung der maximal übertragbaren Wärmeleistung aufgrund der Wärmeleitung des Testsystems	147
9.2	THERMISCHE SIMULATIONEN ZUR WÄRMESENKE	150
9.2.1	Ergebnisse der thermischen Simulation der Wärmesenke	152
10	ZUSAMMENFASSUNG.....	155
11	LITERATURVERZEICHNIS	158
12	ANHANG.....	163
12.1	ERFINDUNGSMELDUNGEN.....	163
12.2	ABBILDUNGSVERZEICHNIS	164
12.3	TABELLEN	169

Abkürzungsverzeichnis

A

A_w Wärmeleitfläche [m^2] S.: 23
aSi amorphes Silizium S.:30
 A_{quer} Durchströmte Querschnittsfläche [m^2] S.: 131
 a Temperaturleitfähigkeit [m^2/s] S.:135
 α Wärmeübergangskoeffizient [$W/(m^2 \cdot K)$] S.: 138
 A_W Wärmeübertragungsfläche [m^2] S.:138
 A_{leit} Fläche durch die die Wärme strömt [m^2] S.: 139

B

b Kanalbreite [m] S.: 138

C

CB Leitungsband (conducting band) S.: 3
CVD Low Pressure Chemical Vapour Deposition S.:61
C Konzentration [%HF_{aq}] S.:110
 c_p Wärmekapazität [$J/(kg \cdot K)$] S.:133

D

d Betriebszyklus (Durchflussdauerdauer/gesamte Pulszeit) S.: 25
 d_{hyd} Hydraulischer Durchmesser [m] S.: 131
DLC Diamond like Carbon S.: 63

E

E Element S.:19
 e^- Elektron S.:75

F

f Schaltfrequenz [Hz] S.: 25
FD Finite Differenzen S.: 150

G

GHz Gigahertz Frequenz 10^9 Hertz S.:70

H

h Kanalhöhe [m] S.: 138
HDMS Hexamethyldisilazan S.:65

I

I_F Strom [A] S.: 25
IGBT Insulated Gate Bipolar Transistor S.:14

J

J Joule Einheit für Energie S.:150

K

KOH Kalilauge S.:55
kHz Kilohertz Frequenz 10^3 Hertz S.:70

L

λ Material Wärmeleitfähigkeit [$W/m \cdot K$] S.: 23

LED Light Emitting Diode S.:13
LP Low Pressure Chemical Vapour Deposition S.: 30
LDI Laser Direct Imaging S.:32, 69
 L_h Hydraulische Einlaufänge [m] S.: 135
 L_{th} thermische Einlaufänge [m] S.: 135
 l Kanallänge [m] S.: 138
LMA Levenberg - Marquardt Algorithmus S.: 110

M

MEMS Mikrosystem (microelectromechanical system) S.: 2
MOS-FET Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor S.:14
 \dot{m} Massenstrom [kg/s] S.:133
M Modul S.: 151
 Me^{z+} Metallion mit Ladungszahl z S.:75
Me Metall S.:75
MHz Megahertz Frequenz 10^6 Hertz S.:70

N

ν kinematische Viskosität [m^2/s] S.: 131
 Nu_{x^*} Lokale Nusselt-Zahl bei dimensionsloser x-Koordinate x^* S.: 136
 Nu_m mittlere Nusselt-Zahl S.: 137
n betrachtete Dimensionen des Problems (n=1 eindimensional) S.: 151

O

$\sigma(\Delta t)$ Fehler über Zeitschritt 1 Ordnung S.:151
 $\sigma(\Delta x^2)$ Fehler über Ortsschritt 2 Ordnung S.:151

P

P_{leit} Durchflussverluste [W] S.: 25
 P_{on} Einschaltverluste [W] S.: 25
 P_{off} Ausschaltverluste [W] S.: 25
 P_{sperr} Sperrverluste [W] S.: 25
Pr Prandtl-Zahl S.: 135
Pe Peclet-Zahl S.: 135

Q

\dot{Q} übertragene Wärmeleistung [W] S.:138
 \dot{Q}_V zu übertragene Wärmeleistung an der Vorderseite [W] S.: 145
 \dot{Q}_R zu übertragene Wärmeleistung an der Rückseite [W] S.: 145
 $\dot{q}(x, t)$ Volumetrische Wärmestromdichte in Abhängigkeit von der Tiefenkoordinate und der Zeit S.:151

R

R_{th} Wärmewiderstand zwischen den Grenzflächen [K/W] S.: 23
r Ätzrate in [$\mu m/sec$] S.:110
Re Reynolds-Zahl S.: 131
 ρ Dichte [kg/m^3] S.:133
 Re_{krit} kritische Reynoldszahl (Übergang laminar turbulent) S.: 135
 R_{thges} Gesamt Wärmewiderstand [K/W] S.: 145
 R_{thi} Wärmewiderstand der Schicht i [K/W] S.: 145
 R_{thn} Wärmewiderstand der letzten Schicht n [K/W] S.: 145

R_{ths} Wärmewiderstand der Schicht [K/W] S.: 146

S

s Schichtdicke [m] S.: 23
SAT Spray Acid Tool S.: 57, 110

T

T_g Transformationstemperatur S.: 17
 T Temperatur [°K] S.:110
 T_m mittleren Temperatur zwischen Eintritt und Austritt [°C] S.: 132
 T_A Temperatur am Austritt der Kühlkavität [°C] S.: 132
 T_E Temperatur am Eintritt der Kühlkavität [°C] S.: 132
 t Temperatur [°C] S.: 134
 ϑ_{ln} logarithmische Temperaturdifferenz [°C] S.:138
 T_W Wandungstemperatur der Kühlkavität [°C] S.:139
 T_{W1} Temperatur an der wärmen Grenzfläche [°C] S.: 139
 T_{W2} Temperatur an der kälteren Grenzfläche [°C] S.: 139
 ΔT Temperaturdifferenz zwischen den Grenzflächen [°C] S.: 145
 T_{Chip} Temperatur des Chips [°C] S.: 145
 T_{WV} Wandungstemperatur zur Kühlkavität an der Vorderseite [°C] S.: 145
 T_{WR} Wandungstemperatur zur Kühlkavität an der Rückseite [°C] S.: 145
 t Zeit [s] S.:151
 T_i^{k+1} Temperatur am Ort i zum Zeitpunkt k+1 S.:151
 T_i^k Temperatur am Ort i zum Zeitpunkt k S.:151
 Δt Zeitschritt S.:151
 T_{i-1}^k Temperatur am Ort i-1 zum Zeitpunkt k S.:151
 T_{i+1}^k Temperatur am Ort i+1 zum Zeitpunkt k S.:151

U

U_C Durchlass Spannungsabfall S.: 23
U benetzter Umfang [m] S.: 132
UV Ultraviolett(Strahlung) S.:67

V

VB Valenzband (valence band) S.: 3
 v Strömungsgeschwindigkeit [m/s] S.: 131
 \dot{V} Volumenstrom [m³/s] S.: 131

W

W_{on} Einschaltverlustarbeit pro Puls [J] S.: 25
 W_{off} Ausschaltverlustarbeit pro Puls [J] S.: 25
 W_{S0} Sperrschichtweite ohne äußere Spannung S.:7
 W_{SR} Sperrschichtweite mit Sperrspannung S.:7
 W_{SF} Sperrschichtweite mit Flussspannung S.:8

X

x^* dimensionslose x-Koordinate x^* S.: 136
 x Längen-Koordinate der Kühlkavität [m] S.: 137
 x_{max}^* obere Grenze der dimensionslose x-Koordinate am Ende der Kühlkavität S.: 137
 x_{min}^* untere Grenze der dimensionslose x-Koordinate am Anfang des Gültigkeitsbereiches S.: 137
 x Tiefenkoordinate [m] S.:151
 Δx Ortsschritt S.:151

Y

y gesuchter Stoffwert bei Temperatur t S.: 134
 y_x bekannter Stoffwert bei Temperatur t_x S.: 134

Z

z Anzahl der Elektronen S.:75

1 Einleitung

Leistungshalbleiter erzeugen durch hohe Spannungen und hohe Ströme eine Verlustleistung die in Form von Wärme am Bauelement frei wird. Diese Wärme stellt ein Problem für das Bauelement dar. Die geringe Masse führt zu hohen Energiedichten die zur thermischen Zerstörung des Bauelementes führen, wenn die Wärme nicht abgeführt wird.

Die Kühlung solcher Bauelemente erfolgt meist über eine Kühlung der Module, dies stellt allerdings eine indirekte Kühlung dar. Der Chip, an dem die Wärme generiert wird, ist in einem solchen Modul von einer Reihe von Wärmeübergangswiderständen umgeben und die Anbindung der eigentlichen Kühlung an das Modul stellt ebenfalls einen großen Wärmeübergangswiderstand dar.

Um eine effiziente Kühlung zu erreichen, liegt es nahe die Kühlung direkt an das Halbleiterbauelement anzubinden und somit die Wärmewiderstände zwischen dem Ort der Wärme-Generierung und der Kühlung zu minimieren. Dieser Ansatz wird in dieser Arbeit verfolgt.

Für die eigentliche Kühlung wird das Konzept einer aktiven Flüssigkeitskühlung angewendet, da durch eine solche Kühlung deutlich bessere Kühlleistungen (bei gleicher Fläche und Temperaturdifferenz) erzielt werden können, als bei passiven Kühlelementen die über das Prinzip der natürlichen Konvektion kühlen. Als Medium wurde Wasser, aufgrund seiner hohen spezifischen Wärmekapazität, ausgewählt. Da Wasser jedoch leitend ist, muss eine Isolation zwischen dem Stromkreislauf (Bauelement) und dem Kühlkreislauf (Wasser) erfolgen. Um diese Isolation zu erreichen, wurde als Grundmaterial für die Kühlkanalummantelung Glas gewählt. Die Fertigung dieser "Einhausung" aus Glas soll so gestaltet sein, dass sie durch Halbleiter bzw. MEMS Prozesse auf Waferlevel erfolgen kann.

Das erzeugte Kühlelement soll neben der Kühlung im Bauelementbetrieb auch Wärmeimpulse die z.B. durch Kurzschlüsse erfolgen können durch eine integrierte Wärmesenke abfangen können, bis die Kurzschlussabschaltung erfolgt. Dadurch soll die thermische Zerstörung des Bauelementes durch Temperaturspitzen verhindert werden.

2 Grundlagen

2.1 Mikrosystemtechnik

Das Mikrosystem (MEMS) zeichnet sich einerseits durch die Verschaltung mikrotechnischer Bauteile zu einem System und andererseits durch die Größe der mikrotechnischen Bauteile aus. Die Mikrosystemtechnik stellt die Entwicklung, Fertigung und die Anwendung von Mikrosystemen dar. Die Größenordnung der Mikro -bauelemente bzw. -strukturen, aus denen die Mikrosysteme aufgebaut sind, befinden sich im Mikro- μm und Nanometer nm Bereich. Diese mikrotechnischen Bauteile können z.B. elektronischer, mechanischer, optischer, fluidischer chemischer oder biochemischer Natur sein. Einige Vor- und Nachteile, die bei Mikrosystemen auftreten können, sind Tabelle 2-1 zu entnehmen.

Tabelle 2-1 Vor und Nachteile Mikrosysteme [1]

Vorteile	Nachteile
geringe Größe und Masse	hohe Anforderungen an Werkstoffe
minimaler Energiebedarf	hohe Anforderungen an Präzision
Kompensation von Umwelteinflüssen	Notwendigkeit von Reinräumen
geringer Ressourcenverbrauch	hohe Anforderungen an Prozesskontrolle
hohe Reproduzierbarkeit	
hohe Stückzahlen (parallele Fertigung)	

Die Hauptanwendungsgebiete der Mikrosystemtechnik liegen vor allem in den Bereichen

- Medizintechnik
z.B. Sonden zur minimal invasiven Therapie, intelligente Dosiersysteme
- Automobiltechnik
Intelligente Sensor/Aktorsysteme z.B. für Airbag oder ABS
- Haus- und Gebäudetechnik
Systeme zur Klimaüberwachung und -regelung, Energiebedarfsoptimierung und Sicherheitstechnik für das "Intelligente Haus")
- Umwelttechnik
mobile Mikroanalysensysteme, chemische Sensorik für Flüssigkeiten und Gase
- Produktionstechnik

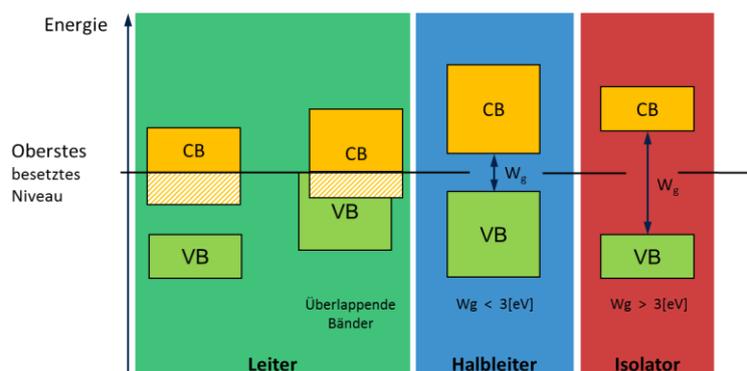
z.B. Mikroreaktoren, in denen chemische Prozesse im Kleinstformat unter sonst nicht möglichen Randbedingungen realisiert werden

- Gentechnik
Gensensorik und biotechnologische Analyse- und Prozesstechnik
- Nanotechnologie
Entwicklung von Werkzeugen für Erzeugung und Manipulation von Nanostrukturen

Die Mikrosystemtechnik kann als eine der Schlüsseltechnologien des 21. Jahrhunderts angesehen werden. [1]

2.2 Halbleiter

Für die Betrachtung der elektronischen Transporteigenschaften durch die Bändertheorie können Festkörper in drei Materialklassen (Leiter, Halbleiter, Isolatoren) unterteilt werden.



Bei dieser Betrachtung sind das Valenzband (VB letztes Band in dem die Elektronen noch lokalisiert sind) und das Leitungsband (CB erstes durchgehendes Band in dem sich Elektronen frei bewegen können) von Interesse. Der Bereich zwischen den Bändern wird als Energielücke (energy gap, w_g) bezeichnet.

Abbildung 1 Besetzung der Energiebänder für Leiter, Halbleiter und Nichtleiter [2]

In diesem Bereich dürfen sich keine Elektronen aufhalten. Wie aus Abbildung 1 zu erkennen ist, wird die Abgrenzung zwischen Halbleiter und Isolatoren über die Größe der Bandlücke definiert. Materialien mit kleinen Bandlücken sind Halbleiter und Materialien mit großer Bandlücke sind Isolatoren. Bei dieser Unterscheidung zwischen Halbleiter und Isolatoren gibt es keine scharfe Grenze und die in Abbildung 1 dargestellte Grenze für den Bandlückenabstand von 3 [eV] stellt einen Richtwert dar. [2], [3]

2.2.1 Einfluss der Temperatur auf die elektrische Leitung

Bei Halbleitern und Isolatoren werden durch eine energetische Anregung Elektronen vom Valenzband in das Leitungsband gehoben. Die elektrische Leitfähigkeit hängt von der Zahl der Ladungsträger im Leitungsband ab. Bei ansteigender Anzahl der Ladungsträger steigt die Leitfähigkeit bzw. sinkt der elektrische Widerstand. Dieser Mechanismus gilt sowohl für Halbleiter als auch für Isolatoren. Bei Isolatoren ist die Bandlücke so groß, dass nur wenige Elektronen bei Raumtemperatur diesen Sprung schaffen, wodurch die Leitfähigkeit sehr gering bleibt. Bei Leitern kommt ein weiterer Effekt hinzu, da das Leitungsband schon gut gefüllt ist, führt eine thermische Anregung und die damit einhergehende stärkere thermische Bewegung zu einer erhöhten Kollisionswahrscheinlichkeit der Rumpfatome des Leiters, wodurch die Beweglichkeit der einzelnen Elektronen sinkt. Durch diese verminderte Beweglichkeit sinkt auch die Fähigkeit Ladungen durch einen Festkörper zu transportieren und somit die Leitfähigkeit. Zusammenfassend kann für Halbleiter und Isolatoren beobachtet werden, dass mit steigender Temperatur die elektrische Leitfähigkeit steigt bzw. der elektrische Widerstand sinkt. [3]

2.2.2 Einfluss der Halbleiterdotierung auf die elektrische Leitfähigkeit

Als Dotierung wird eine gezielte Verunreinigung des Halbleitermaterials bezeichnet. Die Dotierung erfolgt mit Fremdatomen, die in die Gitterstruktur des Halbleiterkristalls eingebaut werden. Die wichtigsten Dotierstoffe für Silizium (am häufigsten eingesetztes Halbleitermaterial in der Halbleitermassenproduktion) befinden sich in der III. Hauptgruppe (Akzeptoren z.B. B, Al, Ga, In, Tl) und der V. Hauptgruppe (Donatoren z.B. P, As, Sb, Bi). Die Dotierung kann durch drei Verfahren erfolgen:

- Diffusion
- Ionenimplantation
- Legierung

Das Verfahren der Legierung wird in der Halbleitertechnik kaum mehr eingesetzt, wohingegen Diffusion und Ionenimplantation zu den Standardverfahren zählen. Die Halbleiter werden je nach Art der Dotierstoffe in p-Halbleiter (Akzeptoren) und n-Halbleiter (Donatoren) unterteilt. Eine solche gezielte Verunreinigung kann die Leitfähigkeit eines Siliziumkristalls um den Faktor 10^6 erhöhen. [4], [5]

2.2.2.1 *n-Dotierte Silizium Halbleiter*

Die Dotierung erfolgt über ein Dotierelement mit 5 Außenelektronen (Elemente der V. Hauptgruppe). Diese besitzen ein Außenelektron mehr als die Siliziumatome. Das

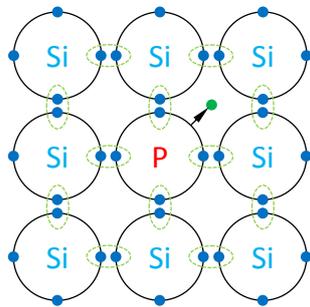


Abbildung 2 Phosphor dotiertes Silizium (n-Halbleiter) [4]

Dotierelement kann sich nun an 4 Siliziumatome binden, wofür 4 Außenelektronen benötigt werden (Abbildung 2). Das überzählige, ungebundene Außenelektron dient als Ladungsträger und benötigt bedeutend weniger Energie, um vom Valenzband ins Leitungsband gehoben zu werden, als die Elektronen, die für die Eigenleitfähigkeit des Siliziums verantwortlich sind. Da das Dotierelement ein Elektron abgibt, wird es als Elektronendonator bezeichnet. Durch diese Abgabe des Elektrons wird das Dotierelement positiv geladen und ist fest in der Siliziumgitterstruktur gebunden. Es bewegen sich

nur die freien Elektronen, jedoch nicht die Dotierelemente. Die Leitfähigkeit, die auf den freien (negativen) Elektronen beruht, wird als **n**-leitend oder **n**-dotiert bezeichnet. [4]

2.2.2.2 *p-Dotierte Silizium Halbleiter*

Die Dotierung erfolgt über ein Dotierelement mit 3 Außenelektronen (Elemente der III. Hauptgruppe). Diese besitzen ein Außenelektron weniger als die Siliziumatome. Durch

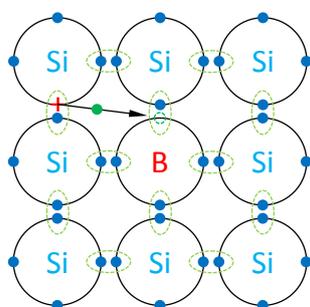


Abbildung 3 Bor dotiertes Silizium (p-Halbleiter) [4]

dieses fehlende Außenelektron entsteht ein Loch im Valenzband der Siliziumatome und die Elektronen im Valenzband werden beweglich. Diese Löcher bewegen sich entgegengesetzt zur Elektronenbewegung, weshalb diese Art der elektrischen Leitung auch als Lochleitung bezeichnet wird (Abbildung 3). Da das Dotierelement ein Elektron aufnimmt, wird es als Elektronenakzeptor bezeichnet. Durch diese Aufnahme des Elektrons wird das Dotierelement negativ geladen und ist wieder wie bei der n-Dotierung fest in der Siliziumgitterstruktur gebunden. Der Energiebedarf, um ein

Valenzelektron in das Leitungsband zu heben, ist bei dotiertem Silizium deutlich geringer als bei undotiertem Silizium. Die Leitfähigkeit, die auf den freien (positiven) Löchern beruht, wird als **p**-leitend oder **p**-dotiert bezeichnet. [4]

2.2.2.3 Darstellung der Dotierung in der Bändertheorie

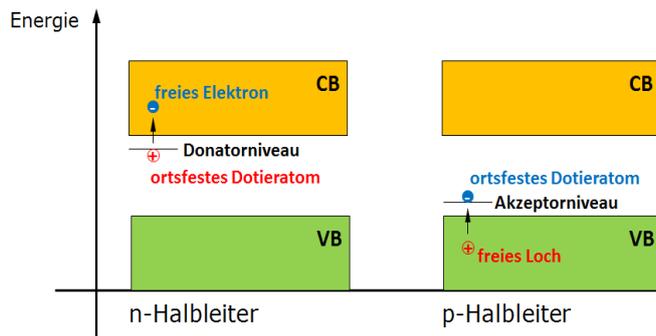


Abbildung 4 Bändermodell für dotierte Halbleiter

Stellt man die vorher beschriebenen Dotierungen im Bändermodell dar, ist klar ersichtlich, dass die Leitung in beiden Fällen auf gegensätzlichen Mechanismen beruht (Abbildung 4). So wird durch einbringen eines Dotieratoms mit 5 Valenzelektronen (n-dotiert) ein Elektron zur Verfügung gestellt, dass sich knapp unterhalb

der Valenzbandkante befindet. Dieses kann durch relativ geringen Energieaufwand in das Leitungsband gehoben werden. Bei der Dotierung mit einem Dotieratom mit 3 Valenzelektronen (p-dotiert) wird eine Leerstelle (Loch) gebildet. Diese wird durch eine geringe Energiezufuhr durch ein anderes Elektron aus dem Valenzband aufgefüllt. [4]

2.2.3 p-n Übergang ohne äußere Spannung

Zwischen p und n Gebiet herrscht aufgrund der Fremdatome ein großer Konzentrationsunterschied in Bezug auf die jeweils freien Ladungsträger. Die Natur ist bestrebt diesen Unterschied auszugleichen. Um einen solchen Ausgleich zu schaffen, diffundieren nun die freien Elektronen aus dem n-Gebiet in das p-Gebiet und freie Löcher aus dem p-Gebiet in das n-Gebiet. Diese negativen und positiven Ladungsträger rekombinieren in den jeweiligen Gebieten. Da nur die freien Ladungsträger wandern können, erzeugen die ortsfesten Ladungen im n-Gebiet eine positive Raumladungszone und im p-Gebiet eine negative Raumladungszone. Durch die Raumladungszonen entsteht ein elektrisches Feld, das die Ladungsträger der Gegenseite abstößt und somit der Diffusion entgegenwirkt. Es stellt sich ein Kräftegleichgewicht zwischen Diffusion und elektromagnetischer Wechselwirkung ein. Es entsteht im Grenzbereich des p-n Übergangs eine Verarmungszone (Zone mit extrem wenigen freien Ladungsträgern), dargestellt in Abbildung 5. [6], [7]

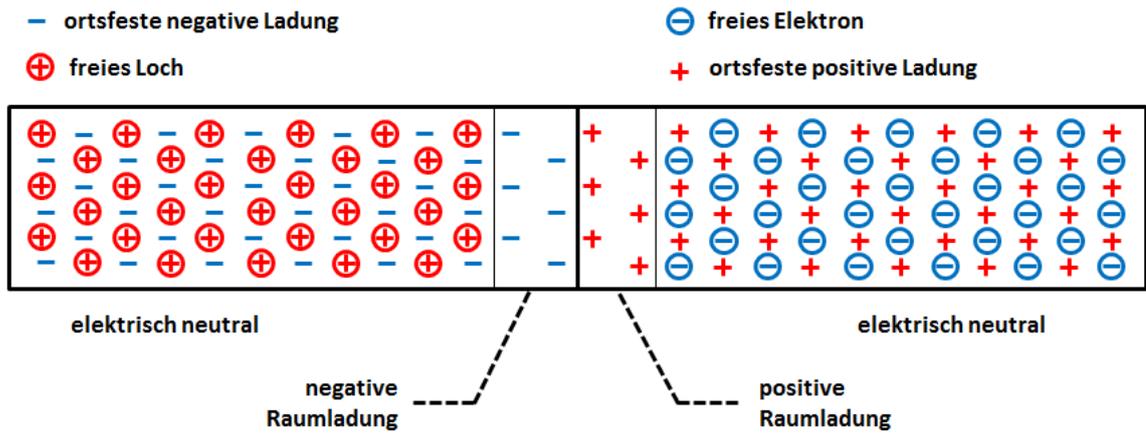


Abbildung 5 Ladungsträger am p-n Übergang ohne äußere Spannung [6]

2.2.4 p-n Übergang in Sperrpolung

Wird an einen p-n Übergang die Sperrspannung angelegt, der Minuspol an der Seite der freien beweglichen Löcher und der Pluspol an der Seite der frei beweglichen Elektronen (Abbildung 6), so vergrößert sich die Sperrschichtweite von W_{S0} auf W_{SR} . Diese Aufweitung der Sperrschicht wird aufgrund der Verschiebung der Ladungsträger durch die externe

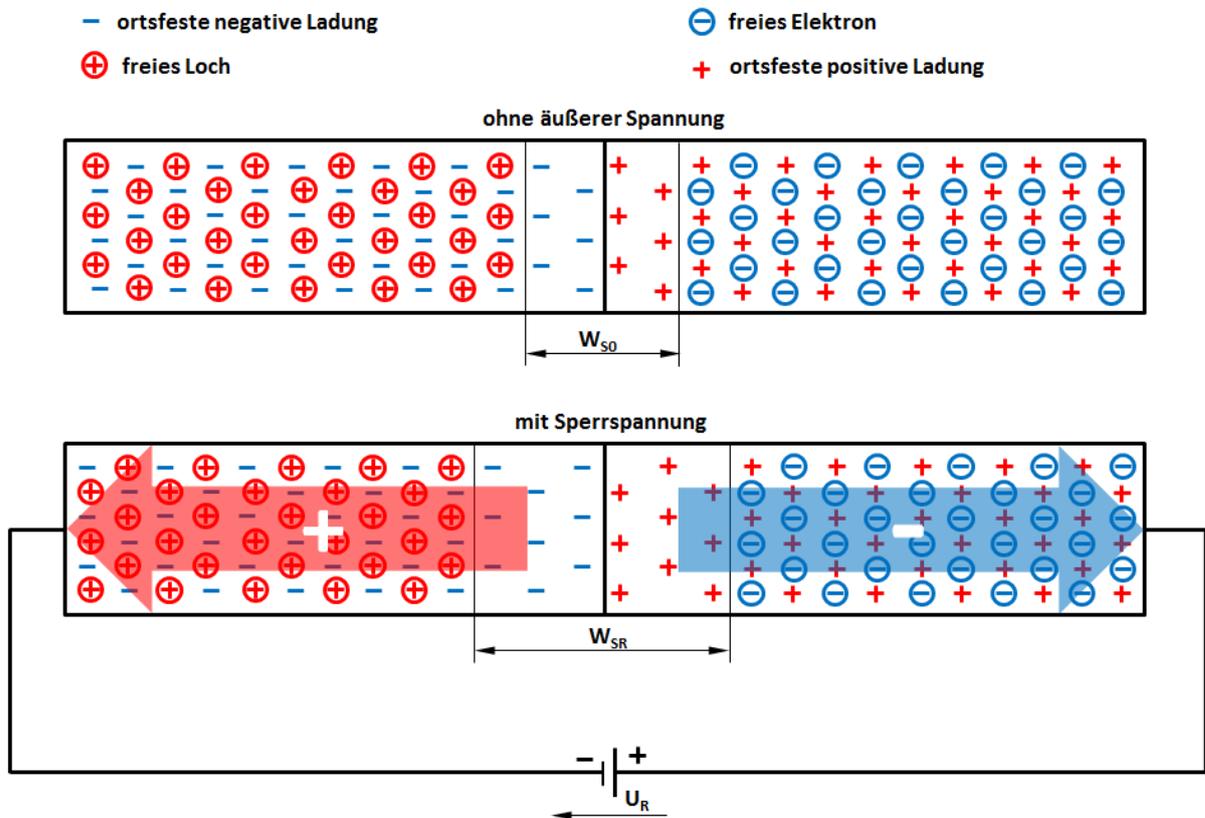


Abbildung 6 p-n Übergang Ausweitung der Raumladungszone durch Sperrspannung [6]

Spannung hervorgerufen. Die jeweils entgegengesetzten Pole ziehen die freibeweglichen invers gepolten Ladungsträger an und stoßen die gleichnamigen freien Ladungsträger ab. Dies führt zu einem kleinen Strom in Sperrrichtung, den sogenannten Sperr- oder Leckstrom. Da die ortsfesten Ladungsträger in ihrer Position fixiert sind und die beweglichen Ladungsträger abgezogen werden, weitet sich die Raumladungszone durch die Verarmung an freien Ladungsträgern aus. Die wenigen Ladungsträger die nachfließen werden durch Diffusion aus den gegenüberliegenden entgegengesetzt dotierten Bereichen bereitgestellt und, wie bereits beschrieben, abgezogen. Dieser Sperrstrom erreicht schon bei kleinen Sperrspannungen einen Sättigungswert und steigt auch bei höheren Sperrspannungen nicht weiter an. [6], [7]

2.2.5 p-n Übergang in Flusspolung

Wird an einen p-n Übergang eine Flussspannung angelegt, der Pluspol an der Seite der frei beweglichen Löcher und der Minuspol an der Seite der frei beweglichen Elektronen (Abbildung 7), so wird die Raumladungszone zusammengedrückt die Sperrschichtweite verringert sich von W_{S0} auf W_{SF} . Diese verringerte Sperrschichtweite wird, durch eine Verschiebung der Ladungsträger, aufgrund der externen Spannung hervorgerufen. Durch die Gleiche Polung der Ladungsträger auf der jeweiligen Seite werden die beweglichen

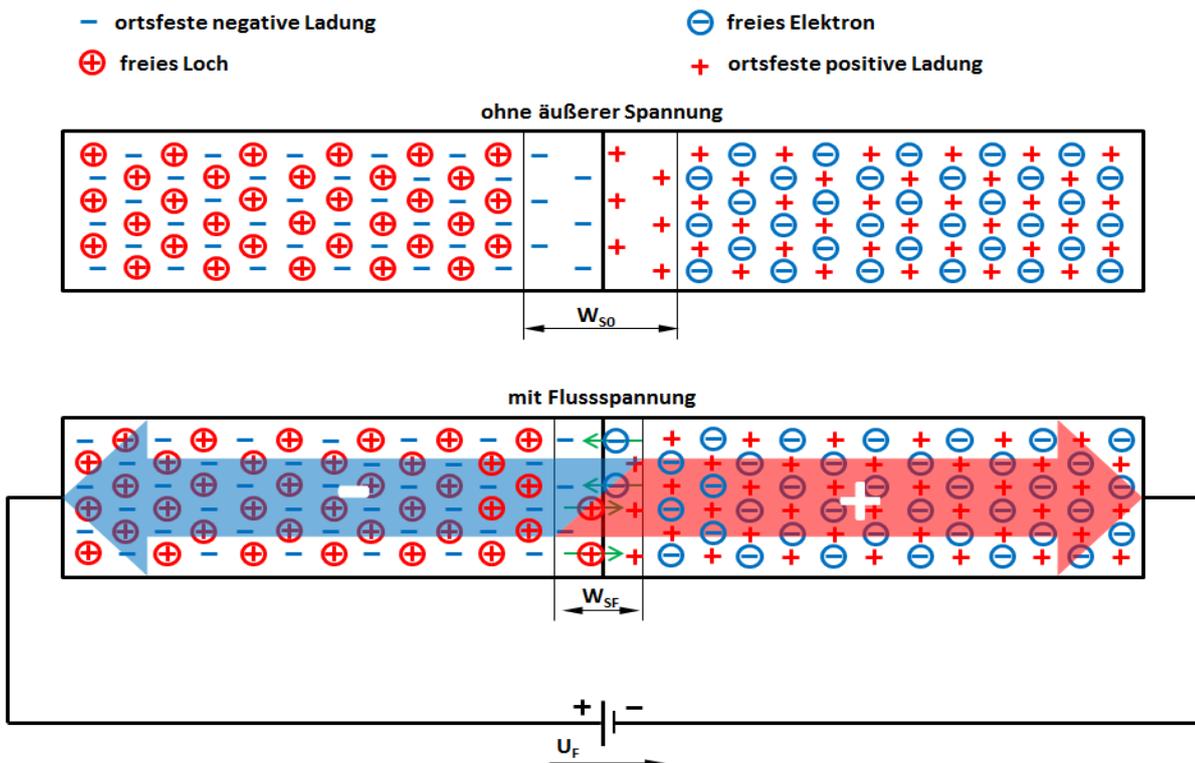


Abbildung 7 p-n Übergang Ausweitung der Raumladungszone durch Flussspannung [6]

Ladungsträger abgestoßen und in Richtung p-n Übergang geschoben. Die jeweiligen Ladungsträger dringen in das benachbarte Gebiet ein und können hier fortlaufend rekombinieren. Durch die Stromquelle fließen ständig neue Ladungsträger nach, wodurch ein Stromfluß vorhanden ist. [6], [7]

2.2.6 p-n Übergang Durchbruchmechanismen

Als Durchbruch wird ein Verhalten eines Bauelementes (bzw. des p-n Übergangs) bezeichnet bei dem das Bauelement trotz eines Sperrbetriebes leitend wird, also die Funktion des Bauelementes nicht mehr gegeben ist. Die Durchbruchmechanismen am p-n Übergang können in drei Mechanismen unterteilt werden, die aber nicht zwangsweise voneinander getrennt auftreten müssen. [6]

2.2.6.1 Lawinen-Durchbruch

In der Raumladungszone innerhalb eines p-n Übergangs werden Elektronen, die durch angrenzende Zonen im Halbleiter eindiffundieren oder durch Paarbildung entstehen,

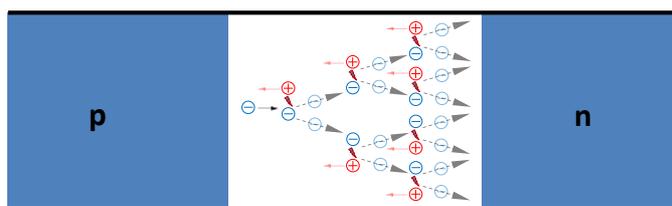


Abbildung 8 Schematische Darstellung des Lawinendurchbruchs [6]

aufgrund des elektrischen Feldes beschleunigt. Ist nun die aufgenommene kinetische Energie groß genug kann durch Stoßionisation das Elektron eines Gitteratoms aus dem Verbund herausgeschlagen werden. Dadurch

sind jetzt zwei Elektronen vorhanden, die durch das elektrische Feld beschleunigt werden (Abbildung 8). Es setzt eine Kettreaktion ein, die durch die Weite der Raumladungszone begrenzt wird. Die Voraussetzungen für einen Lawinen-Durchbruch sind also eine ausreichend hohe Feldstärke zum Beschleunigen der Elektronen und eine ausreichende Weite der Raumladungszone (bzw. Sperrschicht), so dass die Elektronen mehrmals ausreichend Energie aufnehmen können. Die notwendige Sperrschichtweite tritt bei Dotierungen von ca. $10^{17} \dots 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ auf. Die freie Weglänge der Elektronen nimmt mit steigender Temperatur ab, daher muss die Feldstärke zunehmen, um den Lawineneffekt zu starten. Daraus folgt ein positiver Temperaturkoeffizient der Sperrspannung, welcher mit steigender Temperatur steigt. Grundsätzlich ist der Lawinendurchbruch reversibel, wenn die Temperatur nicht zu hoch wird und so zum Ausfall des Überganges bzw. Bauelementes, z.B. durch Risse im Gitter oder Aufschmelzungen, führt. [6], [8], [9]

2.2.6.2 Zener-Durchbruch

Diese Art des Durchbruchs tritt vor allem bei sehr hochdotierten p-n Übergängen auf (Dotierungen $> 10^{18} \dots 10^{19} \text{ cm}^{-3}$). Bei so hohen Dotierungen ist die Sperrschichtweite zu klein für einen Lawinendurchbruch, da die freie Weglänge zu gering ist, um die notwendige kinetische Energie für den Lawineneffekt aufnehmen zu können. Im Umkehrschluss ist jedoch die Weglänge sehr kurz, die ein Elektron zurücklegen muss, um vom p- ins n-Gebiet zu gelangen. Der Zenerdurchbruch lässt sich sehr anschaulich im Energiebandschema darstellen (Abbildung 9). Aufgrund der geringen Sperrschichtweite treten hohe Feldstärken

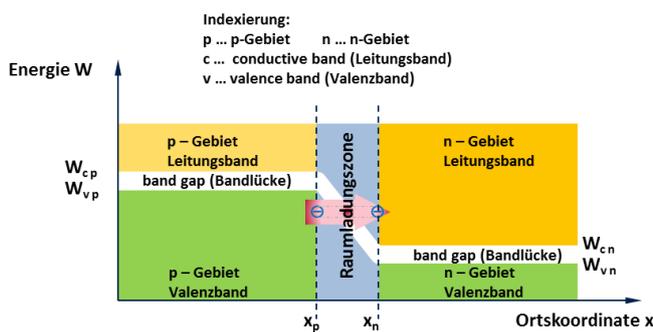


Abbildung 9 Darstellung des Zenerdurchbruchs im Energiebandschema [6]

im Bereich der Sperrschicht auf. Durch diese hohe Feldstärke werden die Kräfte auf die Valenzelektronen der Gitteratome so groß, dass die Valenzelektronen aus der Bindung zu ihren Gitteratomen gerissen werden (innere Feldemission). Den Elektronen aus dem Valenzband des p-Gebiets stehen nun freie Plätze auf gleicher energetischer Höhe im Leitungsband des n-Gebietes zur Verfügung. Um diese freien Plätze besetzen zu können, muss die Sperrschicht überwunden werden. Da die Sperrschichtweite sehr gering ist, können die Elektronen durch die Sperrschicht tunneln. Dem Zener-Durchbruch liegt der Tunnel-Effekt zugrunde. Um von einem Durchbruch, Stromfluss im Sperrbetrieb, sprechen zu können, müssen sehr viele Elektronen durch die Sperrschicht tunneln. Dies ist möglich, da die Tunnelwahrscheinlichkeit mit der Feldstärke exponentiell anwächst. Beim Zener-Durchbruch ist ein negativer Temperaturkoeffizient, im Gegensatz zum positiven Temperaturkoeffizienten beim Lawinendurchbruch, zu beobachten. Da bei steigender Temperatur die Valenzelektronen leichter aus den Paarbindungen gerissen werden können. Wie schon der Lawinendurchbruch, ist der Zenerdurchbruch reversibel. Das Bauteil bzw. Bauelement wird nicht zerstört, wenn es nicht zu lokalen drastischen Temperaturanstiegen kommt, die Risse oder Aufschmelzungen verursachen. [6], [9], [10]

2.2.6.3 Überlappungsbereich Lawinendurchbruch Zener-Durchbruch

Aus den notwendigen Dotierungen für Lawinen- bzw. Zener-Durchbruch lässt sich ein Überlappungsbereich bei Dotierungen von ca. 10^{18} cm^{-3} erkennen. In diesem Bereich können sowohl Lawinen- als auch Zener-Durchbruch nebeneinander auftreten. Dadurch ist es möglich, dass sich der positive Temperaturkoeffizient des Lawinendurchbruchs mit dem negativen Temperaturkoeffizient des Zener-Durchbruchs ausgleicht und somit zu einem neutralen Temperaturkoeffizienten von 0 führt. Wie schon in den beiden vorher besprochenen Fällen (Lawinendurchbruch, Zener-Durchbruch) nimmt der p-n Übergang bei einem solchen Durchbruch keinen Schaden, wenn es nicht zu lokalen drastischen Temperaturanstiegen kommt, die Risse oder Aufschmelzungen verursachen. [6], [9], [10]

2.2.6.4 Thermischer-Durchbruch

Der thermische Durchbruch kann beispielsweise durch Eigenerwärmung, aufgrund von Verlustleistung und somit durch eine zu hohe Sperrschichttemperatur, ausgelöst werden. Die zu hohe Sperrschichttemperatur führt, aufgrund der bei steigender Temperatur steigenden Ladungsträgergeneration, zu einem erhöhten Sperrstrom. Der steigende Sperrstrom führt wieder zu einer Erhöhung der Verlustleistung und somit zu einer weiteren Erhöhung der Sperrschichttemperatur. So entsteht ein Kreislauf, der so lange anhält, bis die Sperrschichttemperatur zu einem Materialversagen führt. Andere Auslösemechanismen wären bei einem nicht völlig homogen aufgebauten p-n Übergang die beiden zuvor beschriebenen Durchbruchmechanismen, die in einem solchen p-n Übergang zu lokalen Überhitzungen führen können. In jedem Fall ist der zerstörende Mechanismus immer der starke Temperaturanstieg, der zu Aufschmelzungen oder Rissen im Kristallgitter führt. [6], [8]

2.3 Halbleiter Bauelemente

Ein Halbleiterbauelement ist ein Festkörperbauelement, bei dem als Grundwerkstoff ein Halbleitermaterial verwendet wird, und dessen charakteristische Eigenschaften auf Halbleitereffekten beruhen. Die Funktionsweise der Halbleiterbauelemente wird durch die physikalischen Effekte der Wechselwirkungen zwischen den Ladungsträgern, den Wechselwirkungen mit den Atomen des Halbleiters und den Wechselwirkungen mit anderen Teilchen (z.B. Photonen oder Phononen) bestimmt. Diese Effekte, die für die technische Anwendung genutzt werden, treten meist an den Halbleiterübergängen auf. Die Bauelemente können in aktive und passive Bauelemente unterteilt werden. Bei aktiven Halbleiterbauelementen wird die Energiebarriere durch äußere Einflüsse (z.B. elektrisches Feld, magnetisches Feld, Licht uvm.) verändert und somit eine Steuerungsmöglichkeit ermöglicht.

Tabelle 2-2 Einteilung von Bauelementen [2]

passive Bauelemente	aktive Bauelemente
Widerstände	Bipolartransistor
Kondensatoren	MOS-Transistor (<u>M</u> etal <u>O</u> xide <u>S</u> emiconductor)
Induktivitäten	MES-Transistor (<u>M</u> etal <u>S</u> emiconductor)

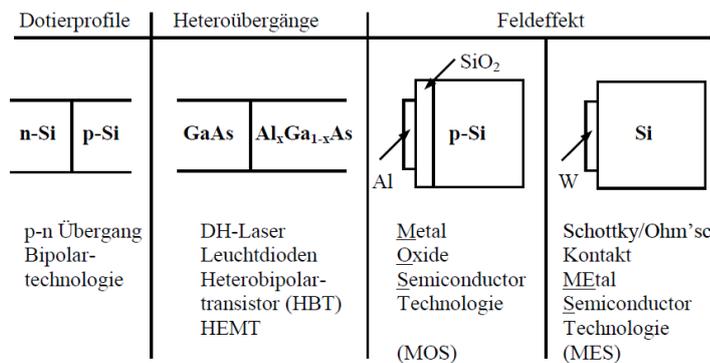


Abbildung 10 Halbleiter Dünnschichtsysteme [2]

Dient das Halbleitermaterial als Substrat, so kann man die in Abbildung 10 gezeigten Schichtfolgen für die gewünschten Effekte nutzen. Es finden auch alle vier Möglichkeiten in der heutigen Technologie ihre Anwendung. Jedoch sind nur sehr wenige

Materialien so kompatibel zueinander, dass die Grenzfläche (Lage der Barriere) für eine technologische Umsetzung sinnvoll ist. Das wichtigste Halbleitergrundmaterial für die heutige Industrie ist der elementare Halbleiter Silizium. Weitere Halbleitermaterialien wären Bor, Germanium, Tellur, Verbindungshalbleiter (Galliumnitrid, Galliumarsenid, Indiumphosphid) oder organische Halbleiter (beruhen auf Kohlenstoffverbindungen. [2], [11])

2.3.1 Diode

Die Diode stellt das einfachste Halbleiterbauelement dar. Grundsätzlich gibt es in der Halbleitertechnik zwei Möglichkeiten, wie eine solche Diode realisiert werden kann. Die erste Möglichkeit ist eine Schottky – Diode, die aus einem Metall-Halbleiter Kontakt besteht. Die zweite Möglichkeit ist ein Halbleiter Kontakt aus gegensätzlich dotierten Halbleitern, ein sogenannter p-n Übergang. Das hydraulische Analogon für eine Diode wäre das Rückschlagventil, da eine Diode nur eine Stromrichtung zulässt, also bei einer p-n Diode einen Elektronenfluss von dem n Gebiet in das p Gebiet (Abbildung 11).

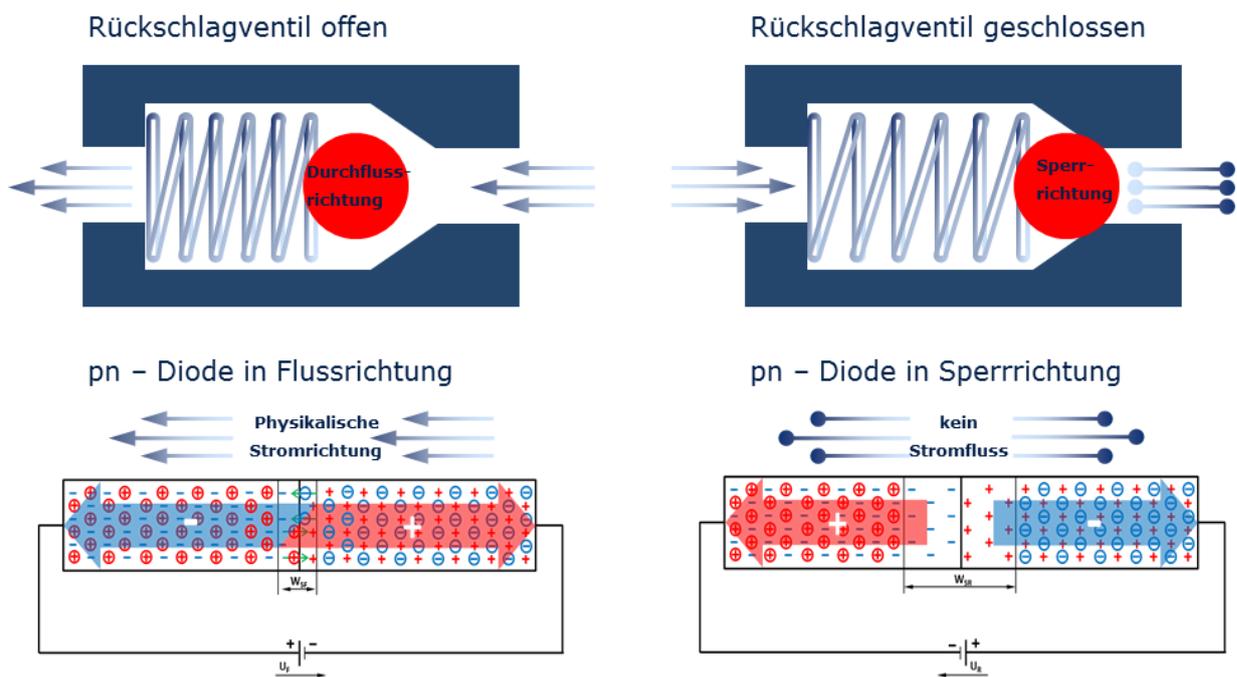


Abbildung 11 Hydraulisches Analogon Diode zu p-n Diode [6]

Die Anwendungsgebiete solcher Dioden sind vielfältig. Häufig werden Sie als Gleichrichter-Dioden (Umformung Wechselstrom zu Gleichstrom) oder Schutzdioden (zum Schutz von Bauteilen vor einer falschen Stromrichtung) verwendet. Des Weiteren gibt es noch spezielle Dioden wie LED (Light Emitting Diode), Laser Diode oder eine Fotodiode. Bei diesen Dioden wird ausgenutzt, dass Energie in Form von Licht emittiert wird, wenn ein Elektron vom Leitungsband in das Valenzband fällt bzw. der umgekehrte Fall, dass durch Licht Elektronen vom Valenzband ins Leitungsband gehoben werden (Photoeffekt). [10]

2.3.2 IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor)

Der IGBT wurde 1979 von Frank Wheatley und Dr. Hans Becke in den USA entwickelt. Im Grunde ist der IGBT eine Weiterentwicklung des MOSFET's. Die Aufgabe des IGBT ist durch Anlegen einer Spannung am Gate einen Strom zwischen E (Emitter) und C (Kollektor) ein bzw. auszuschalten (Abbildung 12). Der IGBT dient als elektrischer Schalter. Als hydraulisches Analogon kann man sich ein Wehr vorstellen, das durch einen Druck (Gegengewicht) den Fluss durch einen Kanal zulässt oder unterbindet (Abbildung 12). Dies ist natürlich nur eine sehr vereinfachte Vorstellung, die die grundsätzliche Funktion des IGBT's veranschaulicht. Die tatsächliche Funktionsweise des IGBT lässt sich an den schematischen Querschnittsdarstellungen in Abbildung 12 erklären. Der IGBT kann zum einfacheren Verständnis in 3 Funktionseinheiten (1, 2, 3 in Abbildung 12) unterteilt werden.

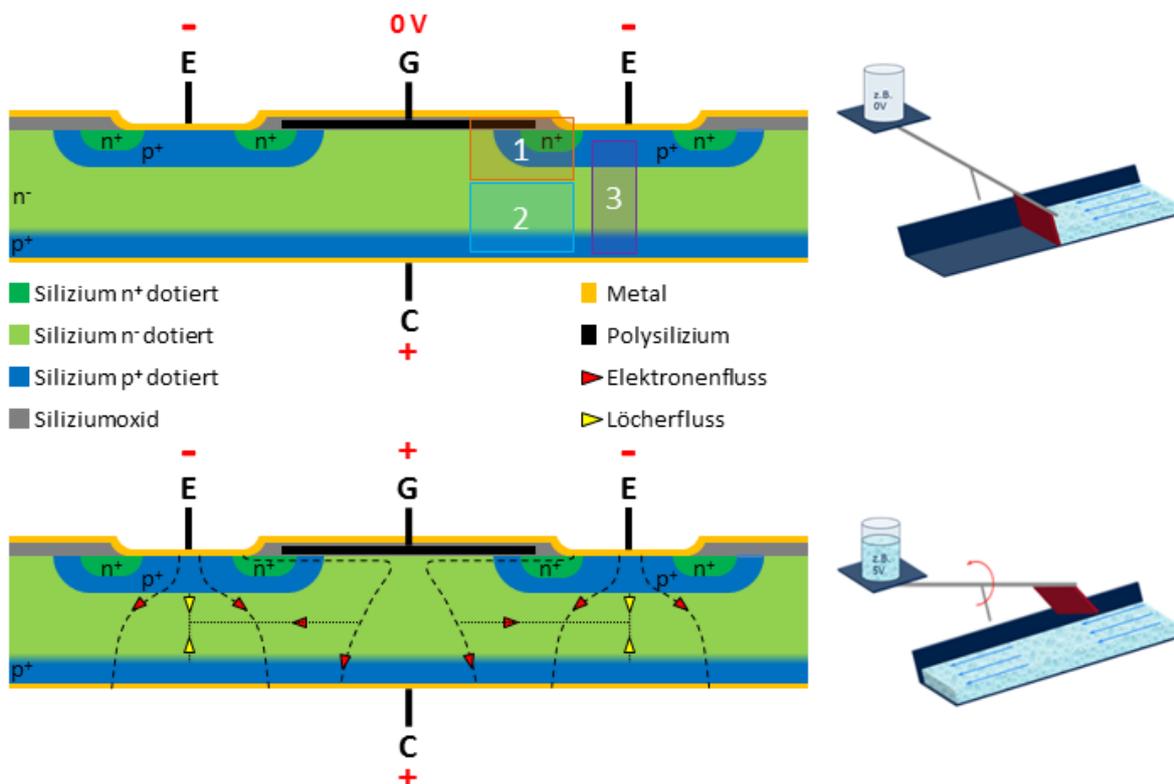


Abbildung 12 Schematischer Aufbau IGBT und Hydraulisches Analogon [2], [8]

Funktionseinheit 1 ist der Feldeffekt Transistor. Hier wird durch Anlegen der Gate Spannung ein n-Kanal in horizontaler Richtung von n^+ zu n^- durch die p^+ Wanne gebildet. Der Strom wird von E (Emitter) in das n^- Gebiet geführt. In der Funktionseinheit 2, einer Diode, wird der Strom bis zu C (Kollektor) geleitet. Ein Teil des Stromflusses der Diode dient nun als Basis für Funktionseinheit 3, dem bipolaren pnp Transistor. Durch den Basisstrom wird nun das n^- Gebiet mit Löchern aus den benachbarten p Gebieten geflutet. Durch die Zunahme an Löchern wird das gesamte n^- Gebiet leitend und durch die fehlenden Löcher im p^+ Gebiet wird auch dieses leitend. Dies gilt ebenfalls für die Gebiete der Funktionseinheit 2. Insgesamt

ist der IGBT nun eingeschaltet, also auf Durchlass gepolt. Die Vorteile und Nachteile bei der Verwendung von IGBT's werden in Tabelle 2-3 aufgeführt.

Tabelle 2-3 Vor und Nachteile IGBT [12]

Vorteile	Nachteile
Leistungslose Ansteuerung	Schnelles Schalten benötigt einen starken Gatetreiber
Höhere Betriebsspannungen als FET	Es kann unter bestimmten Umständen ein Latch-Up auftreten (Strom ist dann nicht mehr kontrollierbar).
Niedrige Verluste	Hohe Abschaltverluste
Gute Kurzschlussfestigkeit	Nur für relativ geringe Schaltfrequenzen einsetzbar (bis ca. 50 kHz, Spezialtypen bis ca. 300 kHz)
Geringe Erhöhung der Verluste bei steigender Temperatur	Nicht rückwärts leitfähig
Keine parasitäre Freilaufdiode vorhanden. Es kann eine Diode verwendet werden, die auf den Anwendungsfall optimiert ist	Keine parasitäre Freilaufdiode vorhanden. Zum Schalten von induktiven Lasten in Halb- und Vollbrücken ist eine externe Freilaufdiode zwingend erforderlich (zusätzliches Bauteil)

Einer der gravierendsten Nachteile ist hierbei, dass der IGBT nicht rückwärts belastet werden darf (ausgenommen reverse blocking IGBT's), da dies zur Zerstörung des Bauteils führt. Eine der herausragenden Eigenschaften ist die Kurzschlussfestigkeit. Aus diesen und weiteren Gründen ist der IGBT eines der am meisten genutzten Leistungshalbleiterbauelemente zurzeit. [6], [8], [10], [12]

2.3.3 Schaltung IGBT mit "Freilauf"diode

Die Schaltung IGBT mit Freilaufdiode ist notwendig um den IGBT zu schützen. Der IGBT darf nicht von der falschen Seite mit Strom belastet werden. Ein solcher Rückwärtsbetrieb würde zur Zerstörung des Bauteils führen. Um dies zu umgehen, wird eine sogenannte Freilaufdiode parallel zum IGBT betrieben, die so gerichtet ist, dass die Diode sperrt, wenn der IGBT durch Vorwärtsstrom belastet wird, also der IGBT Normalbetrieb. Bei einer Belastung durch Rückwärtsströme ist die Diode offen, sodass der Strom am IGBT vorbei abfließen kann. Zu solchen Rückwärtsströmen kann es z.B. durch induktive Lasten kommen.

2.4 Glas

Der Begriff Glas hat im Sprachgebrauch mehrere Bedeutungen z.B. Glas als Trinkgefäß, Glas als Werkstoff oder Glas als Zustandsbeschreibung. Aus diesem Grund gibt es viele Definitionen für den Begriff Glas.

2.4.1 Definition Glas

Für die Definition von Glas wird in dieser Arbeit nur auf den Begriff des Glases als Werkstoff bzw. als Zustand eingegangen. Die folgenden Definitionen von Glas sind in der Literatur zu finden

nach Tammann [13]:

"Im Glaszustand befinden sich die festen, nicht kristallisierten Stoffe."

Diese Definition ist jedoch zu allgemein gehalten, da z.B. nach dieser Definition auch Kieselgel zu den Gläsern gehören würde. Die Definition gehört zu einer Gruppe von Definitionen die vor allem das Viskositätsverhalten in den Vordergrund stellen und die Zusammensetzung von Gläsern nicht einschränken

Einer andere Gruppe von Definitionen gehört die Definition nach der American Society for Testing Materials an [14]:

"Glas ist ein anorganisches Schmelzprodukt, das im Wesentlichen ohne Kristallisation erstarrt."

Bei dieser Definition wird Glas auf anorganische Produkte beschränkt.

Bei den bereits genannten Definitionen wird wieder ersichtlich, dass die Definitionen auf unterschiedlichen Betrachtungsweisen begründet sind. Die Betrachtungsweise eines Glases als physikochemischer Zustand oder die Betrachtungsweise eines Glases als technischer Werkstoff. Diese beiden Betrachtungsweisen stellen auch die Grundlage für die meisten Definitionen dar.

Eine weitere Definition Glas nach dem physikochemischen Zustand ist die Aussage nach Haase [15]:

"Eine eingefrorene unterkühlte Flüssigkeit wird als Glas bezeichnet."

Diese Definition ist bei der genaueren Betrachtung des Herstellungsprozesses und der Thermodynamik von Gläsern entstanden. Die Thermodynamik befasst sich unter anderem mit den unterschiedlichen Energiezuständen der Aggregatzustände (gasförmig, flüssig und fest), wobei der feste kristalline Zustand den Zustand mit der niedrigsten freien Energie und somit den stabilsten Energiezustand unterhalb der Siedetemperatur darstellt. Daher versucht jeder Körper diesen Energiezustand zu erreichen. Glas liegt allerdings nicht in diesem Energiezustand vor, da bei der Abkühlung aus der Schmelze die Energie zu schnell entzogen wird. Durch diese schnelle Abkühlung (Einfrieren) wird die Thermodynamik von der Kinetik überlagert, da die Viskosität so schnell zunimmt, dass die Umlagerung der Moleküle zu Kristallen nicht mehr möglich ist. Würde die Abkühlung langsam erfolgen, würde sich ein

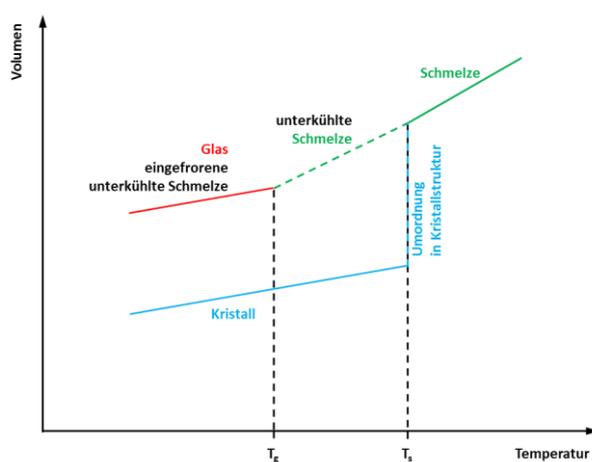


Abbildung 13 Prinzipieller Verlauf der Temperaturabhängigkeit vom Volumen bei der Abkühlung einer Schmelze [14], [16]

Kristall aus der Schmelze bilden. Dieses Verhalten lässt sich anhand der in Abbildung 13 dargestellten Abhängigkeit des Volumens von der Temperatur bei der Abkühlung einer Schmelze sehen. Wird eine Schmelze abgekühlt sinkt das Volumen bis die Schmelztemperatur T_s erreicht wird linear als Funktion des Ausdehnungskoeffizienten ab. Ab der Schmelztemperatur ist die Kinetik der entscheidende Faktor. Im Normalfall setzt an diesem Punkt die Kristallisation ein und das Volumen sinkt sprunghaft. Ist die Kristallisation abgeschlossen nimmt das

Volumen wieder als Funktion des Ausdehnungskoeffizienten des Materials ab. Der Ausdehnungskoeffizient ist allerdings beim Kristall kleiner (geringere Steigung) als bei der Flüssigkeit. Dies entspricht den thermodynamischen Gleichgewichtszuständen. Wenn die Abkühlung mit einer hohen Abkühlungsgeschwindigkeit erfolgt, bleibt den Molekülen nicht genug Zeit um sich umzuordnen, und das Volumen verringert sich weiterhin stetig entlang der grün gestrichelten Gleichgewichtskurve. Der Bereich der unterkühlten Schmelze befindet sich noch im Gleichgewicht, allerdings in einem metastabilen. Wenn die rasche Abkühlung hier enden würde, könnten sich die Moleküle noch zum Kristall umordnen. Dies würde sich in Abbildung 13 als eine sprunghafte (vertikale) Volumensreduktion bis zur Kristalllinie darstellen. Wird die rasche Abkühlung jedoch beibehalten und der Einfrierpunkt (Transformationstemperatur) T_g erreicht, ist eine Umordnung nicht mehr möglich. Der Grund ist, dass die Viskosität bei der Abkühlung von Flüssigkeiten steigt und ab dem Einfrierpunkt zu hoch ist, um den Gleichgewichtszustand zu erreichen. Die Schmelze würde zu einem Festkörper erstarren. Dieser Zustand wird unabhängig von der Zusammensetzung bei einer

Viskosität bei ca. 10^{14} Pa s erreicht. Ab dem Transformationspunkt folgt die Volumensreduktion wieder dem Ausdehnungskoeffizienten wie beim Kristall. Das Volumen des Glases ist allerdings größer als das Volumen des Kristalls aufgrund der fehlenden Ordnung. [13], [14], [16]

2.4.2 Struktur des Glases

Mit der Definition des Glases als unterkühlte eingefrorene Flüssigkeit lässt sich bereits auf eine wie bei Flüssigkeiten ungeordnete Struktur schließen. Auf dieser Grundlage sind vor allem zwei Hypothesen zur Glasstruktur interessant, die Kristallit-Hypothese nach Lebedev und die Netzwerk-Hypothese nach Zachariasen, wobei keine der beiden Hypothesen bisher bewiesen werden konnte. Die beiden Hypothesen werden im Folgenden anhand von SiO_2 basierten Gläsern beschrieben. [14], [16]

2.4.2.1 Kristallit-Hypothese

Die Kristallit-Hypothese geht davon aus, dass Gläser aus Anhäufungen von Mikrokristalliten bestehen. Diese Mikrokristallite sind kleine geordnete Bereiche, wobei die Ordnung im Zentrum dieser Mikrokristallite am höchsten ist und nach außen hin abnimmt. Die Kristallite sind also durch eine amorphe Zwischenschicht verbunden. Der Durchmesser solcher Kristallite wird mit ca. 1,5 nm angenommen. In dieser Größenordnung, die nur wenige SiO_4 Einheiten darstellt, stellt sich die Frage, ob man noch von einem Kristallgitter reden kann. [16]

2.4.2.2 Netzwerk-Hypothese

Die Netzwerk-Hypothese beruht auf der Vorstellung, dass sich bei einem SiO_2 basierten Glas die SiO_4 - Tetraeder zu einem dreidimensionalen, statistisch ungeordneten Netzwerk verknüpfen. Der Unterschied zwischen dem Kristallnetzwerk (Abbildung 14a) und einem Glasnetzwerk liegt somit in der Symmetrie und der Periodizität, die nur beim Kristall vorhanden sind. Darüber hinaus wird angenommen, dass sich die chemischen Bindungskräfte im Glas und im Kristall ähnlich sind. Von Zachariasen sind nach dieser Netzwerk-Hypothese empirische Regeln für die Glasbildung von Oxidsystemen aufgestellt worden.

Diese Regeln besagen:

- Die Koordinationszahl des Kations ist 3 oder 4
- Ein Sauerstoffion ist an maximal zwei Kationen gebunden
- Die Sauerstoffpolyeder dürfen nur gemeinsame Ecken aber keine gemeinsamen Kanten oder Flächen haben

- Mindestens 3 Ecken jedes Sauerstoffpolyeders sind gemeinsame Ecken mit anderen Polyedern

Diese Regeln werden von Oxiden vom Typ EO_2 , E_2O_3 und E_2O_5 (E steht für Element) erfüllt. Typische bekannte Netzwerkbildner sind beispielsweise SiO_2 , B_2O_3 oder P_2O_5 . [14], [16]

2.4.3 Zusammensetzung von Glasnetzwerken

Gläser setzen sich aus 3 Hauptbestandteilen zusammen:

- Netzwerkbildnern ("glass formers")
- Netzwerkwandlern ("glass modifiers")
- Zwischenoxiden ("intermediates")

Netzwerkbildner sind in jedem Glas vorhanden, Netzwerkwandler und/oder Zwischenoxide können zur Beeinflussung der Glaseigenschaften beigemischt werden.

Die Netzwerkbildner stellen die zentralen Bausteine des Glasnetzwerkes dar und sind mit einem Gesamtanteil von mindestens 50% in der Lage ein dreidimensionales Netzwerk aufzubauen. Die Darstellung eines Glasnetzwerkes aus einem SiO_2 Netzwerkbildner ist in Abbildung 14b abgebildet. Die Kationen typischer Netzwerkbildner sind in Tabelle 12-2 mit den jeweiligen Koordinationszahlen und den Einfachbindungsenergien angegeben.

Netzwerkwandler sind Stoffe, die ohne Netzwerkbildner nicht in der Lage sind eigene Netzwerke zu bilden. Sie brechen die vorhandenen Netzwerke der Glasbildner auf (dargestellt in Abbildung 14c) und das Netzwerk verliert an Stabilität, wodurch sich Viskosität und Schmelztemperatur verringern. Weitere Eigenschaften, die von den Netzwerkwandlern beeinflusst werden können, sind elektrische Leitfähigkeit (bei hohen Temperaturen) und chemische Beständigkeit. Die Kationen typischer Netzwerkwandler sind in Tabelle 12-2 mit den jeweiligen Koordinationszahlen und den Einfachbindungsenergien angegeben.

Die Zwischenoxid-Kationen (siehe Tabelle 12-4) brechen ebenfalls die Netzwerkstruktur der Glasbildner auf, indem ein Glasbildner-Kation durch ein Zwischenoxid-Kation im Netzwerk

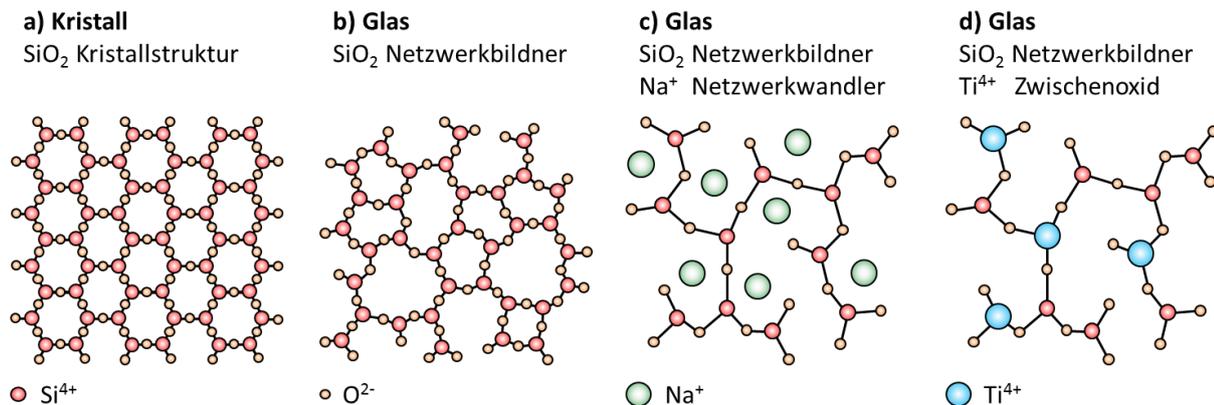


Abbildung 14 Vergleich Kristallnetzwerk mit Glasnetzwerken [14], [16]

ersetzt wird (dargestellt in Abbildung 14d). Durch das Ersetzen der Netzwerkbildner-Kationen mit Zwischenoxid-Kationen wird das entstehende Netzwerk im Vergleich zu einem Netzwerk mit Netzwerkwandlern, wieder stabiler. Dadurch ist bei einem solchen Netzwerk die Viskosität höher als bei einem aus Glasbildnern und Netzwerkwandlern. Weitere physikalische Eigenschaften, die mit Zwischenoxiden beeinflusst werden können, sind chemische Beständigkeit und Lichtbrechung. [14], [16]

2.4.4 Glaskeramiken

Glaskeramiken sind Werkstoffe, die aus Gläsern erzeugt werden, indem Kristalle im Glasnetzwerk gezüchtet werden. Dies kann erreicht werden durch die Beimengung von sogenannten Keimbildnern in der Glasschmelze. Die wesentlichen Merkmale eines Keimbildners sind:

- Eine gute Löslichkeit in der Schmelze
- Eine hohe Diffusionsgeschwindigkeit in der Schmelze
- Eine mit fallender Temperatur deutlich sinkende Löslichkeit in der Schmelze
- Eine der kristallisierenden Glaskomponente ähnliche Struktur

Diese Glaskeramiken können direkt bei der Abkühlung aus der Glasschmelze oder durch eine Temperaturnachbehandlung eines fertigen Glases erzeugt werden, sofern die Keimbildner der Ausgangsschmelze hinzugefügt wurden. Die Art der Keimbildner bzw. deren Temperaturverhalten ist dabei entscheidend, ob die Glaskeramik direkt oder durch eine Temperaturnachbehandlung erzeugt wird. Abbildung 15 zeigt die Kristallwachstumsraten und die Keimbildungsrate in Abhängigkeit von der Temperatur. Wenn die Kristallwachstumsrate und die Keimbildungsrate sich überschneiden (Abbildung 15a) tritt während der Abkühlung

eine Keimbildung bei einer Temperatur auf bei der der Kristall noch wachsen kann. Durch dieses Verhalten ist es möglich sowohl keramische Gläser als auch "normale Gläser" mit einer Abkühlung aus der Schmelze zu erzeugen. Ist diese Überschneidung nicht vorhanden

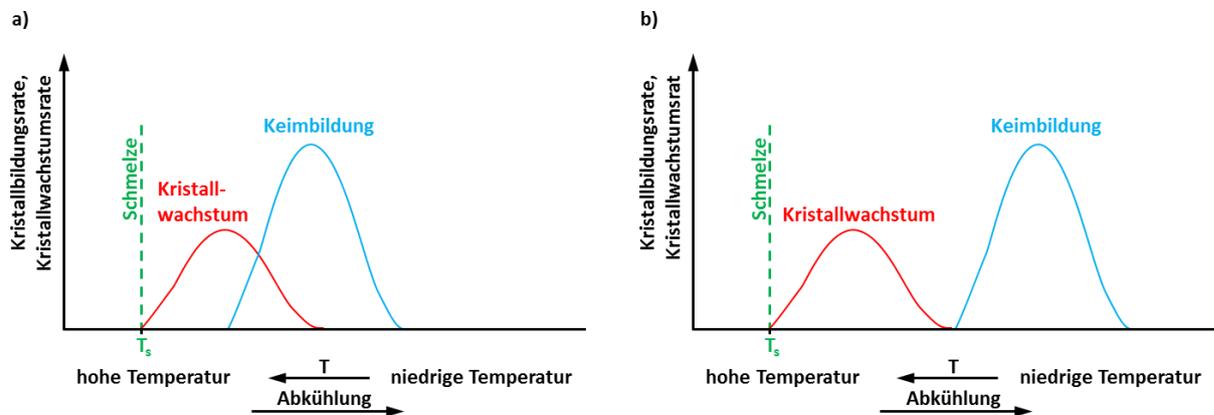


Abbildung 15 Prinzipielle Kristallwachstumsrate und Keimbildungsrate in Abhängigkeit der Temperatur [16]

(Abbildung 15b), können keramische Gläser nicht direkt aus der Schmelze gebildet werden. Die Keimbildung setzt erst bei einer Temperatur ein, bei der kein Kristallwachstum mehr möglich ist. Durch eine Temperaturnachbehandlung bei der das Glas noch einmal auf eine Temperatur erhitzt wird, bei der Kristallwachstum stattfindet, können die Kristalle an den Keimen, die zu diesem Zeitpunkt bereits vorhanden sind, wieder wachsen. Somit ist eine Entglasung hin zu einer Glaskeramik möglich. [16]

3 Testsystem

Das Testsystem ist eine Verschaltung eines IGBT's mit einer Freilaufdiode. Die Verschaltung wurde wie in Abbildung 16 durchgeführt. Als thermische Kennwerte dienen die Verlustleistung, die aus Erfahrungswerten mit 200 W angenommen wurde und die Betriebstemperatur des Testsystems mit ca. 150°C und einer maximal erlaubten Spitzentemperatur von ca. 175°C.

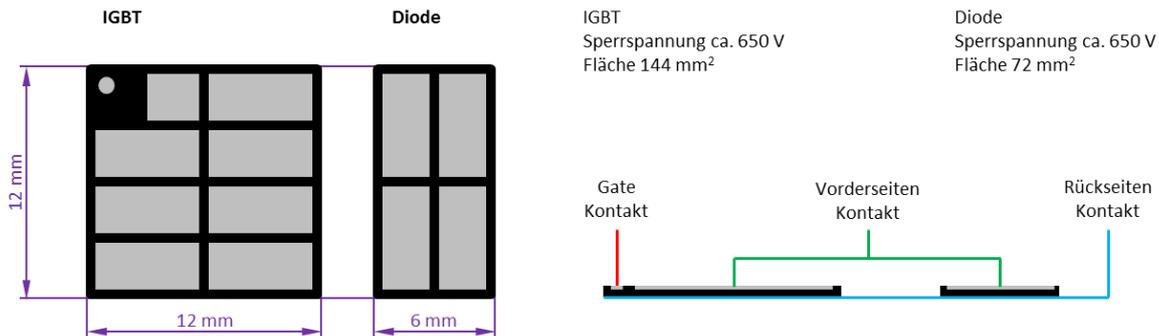


Abbildung 16 Testsystem für die Kühlung der Leistungshalbleiterbauelemente [18]

Der IGBT ist ein Trench IGBT mit Feld Stopp Technologie, mit einer niedrigen Sättigungsspannung von ca. 1,2 V und einer Sperrspannung von ca. 650V. Im Kurzschlussfall, liegt die Abschaltverzögerung des IGBT zwischen ca. 6-10 µs. Beide Bauelemente haben eine Dicke von ca. 70 µm und wurden mit einer lötbaren Vorder- und Rückseite ausgeführt. [17]

4 Kühlung von Leistungshalbleiterbauelementen im Standardmodul

Durch die immer höher werdenden Wärmestromdichten bei Halbleiterbauelementen nimmt die Kühlung solcher Bauelemente eine immer wesentlichere Rolle ein. Sowohl die elektrische Leistung als auch die Lebensdauer (exponentielle Abhängigkeit) hängen von der Betriebstemperatur der Bauelemente ab. Die elektrische Leistung hängt insofern von der Betriebstemperatur ab, als dass eine maximale Betriebstemperatur des Bauelementes nicht überschritten werden darf. Wird also ein höherer Wärmestrom abgeführt, darf mehr Verlustleistung generiert werden, ohne dass die Betriebstemperatur steigt. Eine höhere Verlustleistung entspricht auch einer höheren elektrischen Belastbarkeit des Bauteils.

Die Kühlung der Leistungshalbleiterbauelemente erfolgt heute meistens über einen Kühlkörper der am Modul angebracht wird. Das Modul ist eine Einhausung von meist mehreren Halbleiterbauelementen, die diese von der Umwelt abschirmt. Heute werden 70-80% der Leistungshalbleiterbauelemente, die in Modulen verkauft werden, in sogenannten Standardmodulen verbaut. Der Aufbau eines solchen Standardmoduls ist in Abbildung 17

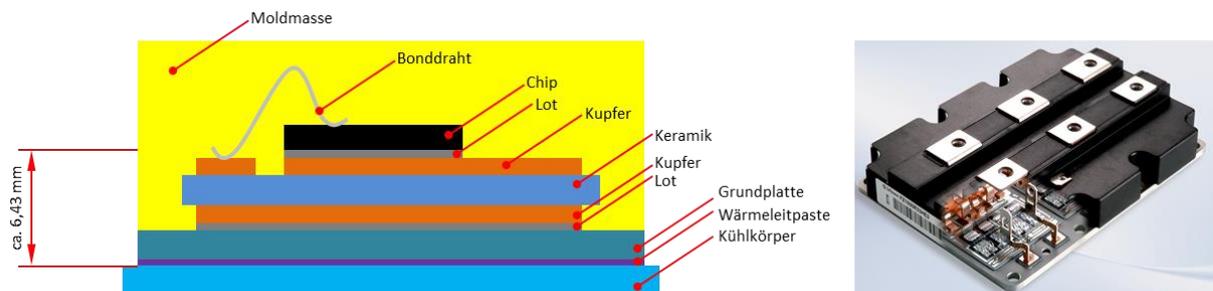


Abbildung 17 Prinzipieller Aufbau und Bild eines Standardmoduls [8], [70]

dargestellt. Am Schichtaufbau des Standardmoduls ist ersichtlich, dass bei einer solchen Kühlung nicht von einer direkten Kühlung gesprochen werden kann. Die Wärmeleitwiderstände zwischen Chip und Kühlkörper haben einen großen Einfluss auf Temperatur die an der Chiprückseite erreicht wird. Die Wärmewiderstände sollten daher möglichst klein gehalten werden. In Tabelle 12-5 ist ein klassischer Schichtaufbau mit einigen wärmetechnischen Daten zu diesem Schichtaufbau gegeben. Die gegebenen Wärmewiderstände in Tabelle 12-5 wurden nach (Gl. 4.1) berechnet, wobei die Fläche des IGBT Chips vom Testsystem als Wärmeübertragungsfläche (144 mm^2) angenommen wurde.

$$R_{th} = \frac{s}{\lambda * A_w} \quad (\text{Gl. 4.1})$$

Aus den so errechneten Wärmewiderständen lässt sich ablesen, dass die Keramikplatte (ca. 182 W/m K), die Grundplatte (ca. 147 W/m K) und die Wärmeleitpaste (ca. 169 W/m K) die größten Widerstände darstellen. Hierbei fällt besonders die Wärmeleitpaste auf, die aufgrund der schlechten Wärmeleitfähigkeit trotz der geringen Schichtdicke (52 μm) einen hohen Wärmewiderstand aufweist. Die Wärmeleitfähigkeit der Wärmeleitpaste wurde in Tabelle 12-5 mit einer mittleren Wärmeleitfähigkeit von 5 W/m K angenommen. In der Realität liegen die Wärmeleitfähigkeiten solcher Pasten jedoch in einem Bereich von 0,8-10 W/m K. Dies würde im "schlechtesten Fall" (0,8 W/m K) zu einem Wärmewiderstand nach (Gl. 4.1) von $R_{\text{th}}=434,028 \cdot 10^{-3} \text{ K/W}$ führen. Dieser Übergang ist zusätzlich problematisch, da es schwierig ist eine gleichmäßig dünne Schicht der Wärmeleitpaste aufzutragen. Dies ist jedoch wichtig, da diese Schicht die thermischen Eigenschaften des Leistungsmoduls prägt. [8], [18]

5 Wärme

Fließt Strom über einen elektrischen Widerstand wird Wärme freigesetzt. Die Menge der freigesetzten Wärme ist dabei abhängig von Strom und Widerstand.

5.1 Wärmegeneration im Halbleiterbauelement

Die Wärmegeneration im Halbleiterbauelement wird hauptsächlich durch den Ohm'schen Widerstand und durch Rekombination hervorgerufen.

Im Falle des Ohm'schen Widerstands ist die Wärmegeneration auf elastische Stöße zurückzuführen. Der Stromfluss über das Bauelement stellt einen Fluss von freien Elektronen durch das Material dar. Auf diesem Weg geben die Elektronen über elastische Stöße, Energie an ihre Stoßpartner (an andere Elektronen, Atomrümpfe und Phononen) ab. Diese werden dabei abgebremst, gestreut und durch das elektrische Feld wieder beschleunigt. Die dabei übertragene Energie an die Atomrümpfe oder Phononen bewirkt eine Vergrößerung der Eigenschwingung um ihre Gleichgewichtslage und erhöht somit die Temperatur des Materials.

Als Rekombination in einem Halbleiter wird der Vorgang bezeichnet, wenn ein Elektron vom Leitungsband in das Valenzband zurückfällt. Bei diesem Zurückfallen wird Energie in Form von Photonen oder Phononen frei. Die Phononen beschreiben die Gitterschwingungen und erhöhen damit die Temperatur.

5.1.1 Verlustleistung

Die Verlustleistung stellt jenen Teil der Energie dar, der im elektrischen Bauteil in Wärme umgewandelt wird. Die Verlustleistung lässt sich unterteilen in:

- Durchlassverluste
- Einschaltverluste
- Ausschaltverluste
- Sperrverluste

Die Sperrverluste sind jene Verluste, die auftreten während das Halbleiterbauelement sperrt. Da das Sperrverhalten bei IGBT's gut ist (nahezu kein Leckstrom), können die Sperrverluste vernachlässigt werden. Die Einschaltverluste sind jene Verluste, die auftreten, wenn das Bauteil von einem Sperrverhalten (kein Stromfluss) zu einem Durchlassverhalten (Strom fließt) geschaltet wird. Die Ausschaltverluste sind der umgekehrte Fall, wenn das Bauteil von einem Durchflussverhalten in ein Sperrverhalten geschaltet wird. Die Durchlassverluste sind jene Verluste die auftreten, während der Strom über das Bauteil fließt. Die Verlustleistung errechnet sich somit aus der Addition dieser Verluste (Gl. 5.1).

$$P_V = P_{leit} + P_{on} + P_{off} + P_{sperr} = d * I_F * U_C + f * W_{on} + f * W_{off} + P_{sperr} \quad (\text{Gl. 5.1})$$

[8]

Beispiel für die Verlustleistung eines IGBT:

Betriebsbedingungen: $I_F = 250\text{A}$, $U_{bat} = 650\text{V}$, $f = 5\text{kHz}$, $d = 0,5$

Daten IGBT:	Durchlass Spannungsabfall	$U_C = 1,2\text{V}$
	Einschaltverlustarbeit pro Puls	$W_{on} = 3,8\text{mW s}$
	Ausschaltverlustarbeit pro Puls	$W_{off} = 3,4\text{mW s}$
	Chipfläche	$A_{Chip} = 144\text{mm}^2$

Für das Beispiel ergibt sich eine Verlustleistung des IGBT nach (Gl. 5.1) von

$$P_V = d * I_F * U_C + f * W_{on} + f * W_{off} = 0,5 * 250 * 1,2 + 5000 * 3,8 * 10^{-3} + 5000 * 3,4 * 10^{-3}$$

$P_V=186$ W. Gemessen an der gesteuerten Leistung (162,5 kW) sind diese Verluste gering. Allerdings wird die Verlustleistung auf einer Fläche von 1,44 cm² erzeugt. Dies bedeutet die Wärmestromdichte beträgt ca. 129 W/cm² oder 1,29 MW/m². Um die Größenordnung der auftretenden Wärmestromdichten bei Leistungshalbleitern einschätzen zu können, ist ein Vergleich von typischen Wärmestromdichten in Abbildung 18 dargestellt. Um eine Zerstörung eines solchen Leistungshalbleiters zu verhindern, ist daher eine Kühlung zwingend erforderlich. [8]

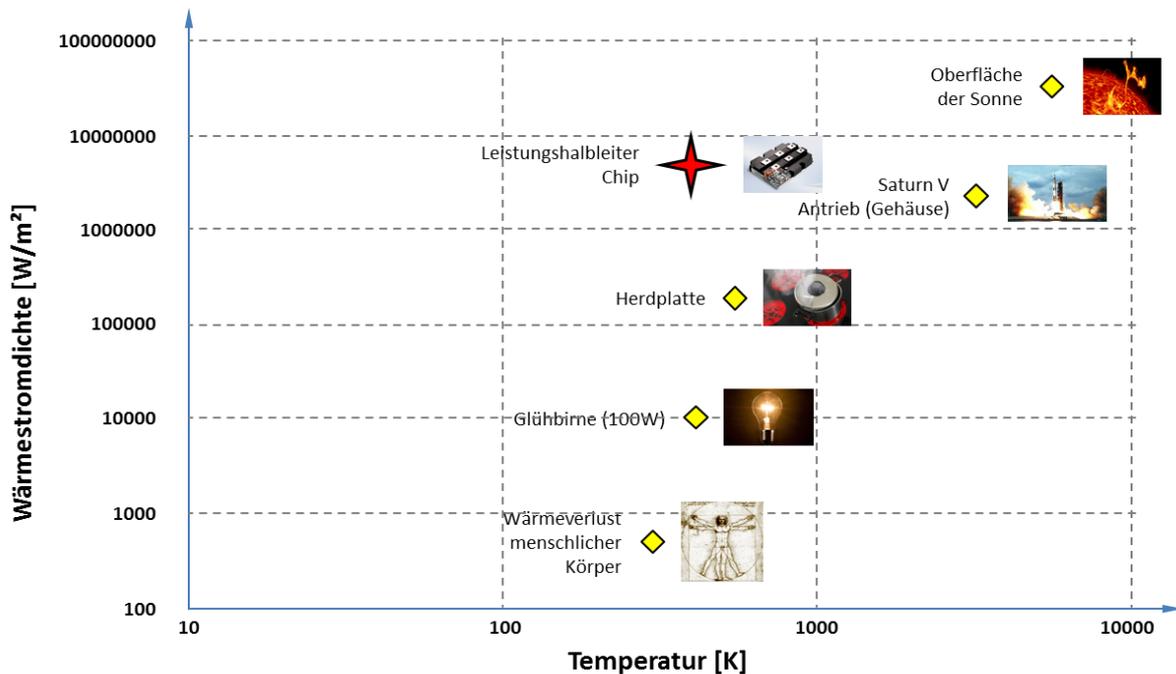


Abbildung 18 Vergleich typischer Wärmestromdichten [8]

5.2 Kühlung

Die Kühlung der Leistungshalbleiterbauelemente dient dazu, die entstehende Verlustleistung aus dem Bauelement abzuführen. Die Entwärmung erfolgt über die drei grundlegenden Wärmeübertragungsarten

- Wärmestrahlung
- Wärmeleitung
- Wärmeübertragung durch Konvektion

Die Wärmestrahlung stellt den Energietransport durch elektromagnetische Wellen dar, durch welche die thermische Bewegung der Teilchen beeinflusst wird. Die Wärmeübertragung durch Strahlung tritt bei jedem festen Körper auf, dessen Temperatur sich über dem absoluten Nullpunkt befindet. Die Strahlung wird aber bereits nach Durchlaufen sehr dünner

Schichten vollständig absorbiert. Strahlung aus dem Inneren eines Festkörpers dringt somit nicht nach außen, und die Emission von Strahlung beschränkt sich auf eine sehr dünne oberflächennahe Schicht. Die Emission und Absorption von Wärmestrahlung bei einem Festkörper sind Oberflächeneffekte. Bei der Emission durch Wärmestrahlung gibt es eine obere Grenze, die von der Temperatur des strahlenden Körpers abhängt. Die maximale Wärmestromdichte durch Strahlung hängt von der Temperatur in der 4. Potenz ab. Dies bedeutet, die Wärmestrahlung spielt für die Kühlung eine Rolle, wenn große Oberflächen bei hohen Temperaturen vorliegen. Bei der Entwärmung von Leistungshalbleiterbauelementen stellt diese Form der Wärmeübertragung daher eine untergeordnete Rolle dar und wird nicht weiter betrachtet.

Die Wärmeleitung stellt den Energietransport über benachbarte Atome, Moleküle und freie Elektronen aufgrund eines Temperaturgradienten im Material dar. Die thermische Bewegung der schnelleren Teilchen wird von den langsameren Teilchen abgebremst, wodurch die langsameren Teilchen wiederum beschleunigt werden. Dieser Vorgang führt zu einem stationären Zustand bei konstanten Wandtemperaturen einer Festkörperschicht, und das Temperaturprofil über die Schichtdicke folgt einer Geraden zwischen den Wandtemperaturen. Die Wärmeleitung spielt eine wichtige Rolle bei der Entwärmung von Leistungshalbleitern, da durch die Wärmeleitung die Wärmeübertragung vom Chip zur eigentlichen Kühlung erfolgt (siehe 9.1.2.-9.1.5). Auch der instationäre Fall der Wärmeleitung spielt bei der Kühlung eine wichtige Rolle und wird in Kapitel 5.3 näher betrachtet.

Die Wärmeübertragung durch Konvektion stellt den Wärmeübergang von einem Festkörper auf ein strömendes Fluid dar. Die Konvektion ist eine Mischung aus Wärmeleitung und Energietransport durch das strömende Fluid. Die Konvektion wird in zwei Arten unterteilt, die natürliche und die erzwungen Konvektion. Die natürliche Konvektion stellt eine Konvektion dar, bei der die Strömung des Fluids von der Erwärmung des Fluids hervorgerufen wird. Bei der erzwungenen Konvektion wird die Strömung von außen erzeugt z.B. durch Pumpen oder Ventilatoren. Die Konvektion wird auch stark durch das strömende Fluid bzw. durch dessen Stoffwerte beeinflusst. Daher wird auch oft von Wasserkühlungen oder Luftkühlungen gesprochen. Die erzwungene Konvektion stellt in der Technik das Mittel der Wahl für die Kühlung von Leistungshalbleitern dar. Bei Bauelementen die eher geringe Leistungen abführen müssen, kommen aber auch passive Luftkühlungen zum Einsatz, bei denen durch natürliche Konvektion, über meist sehr große Flächen (z.B. Kühlrippen) die Wärme abgeführt wird. Die aktive Wasserkühlung stellt eine sehr effektive Form der erzwungenen Konvektion dar. Aus diesem Grund wird in dieser Arbeit diese Form der Wärmeabfuhr für den Aufbau der Kühlung genutzt. Eine nähere Betrachtung der erzwungenen Konvektion für die

einseitige flüssigkeitsgekühlte in Glas gekapselten Kühlung für Leistungshalbleiter am Testsystem wurde in Kapitel 9.1.1 durchgeführt. [18], [19]

5.3 Wärmesenke

Die Wärmesenke dient dazu, Spitzentemperaturen durch Wärmeimpulse zu kompensieren. Diese Wärmeimpulse treten beispielsweise bei einem Kurzschluss auf. Durch den Kurzschluss wird eine große Wärmeleistung erzeugt bis die Kurzschlussabschaltung der Bauelemente nach ca. 20 μs erfolgt. Der Wärmeimpuls wird in dem aktiven Bereich (ca. 10 μm) des Chips erzeugt und führt zu Temperaturspitzen innerhalb des Bauteils, die zur Zerstörung des Bauteils führen. Durch die Wärmesenke wird diese Temperaturspitze gedämpft, indem die Wärme schnell abgeleitet und über das Material verteilt wird, dies führt zu deutlichen geringeren Spitzentemperaturen. Die Materialien besitzen in der Regel eine hohe thermische Leitfähigkeit. Ein solcher instationärer Wärmeleitungsfall wurde für drei Varianten simuliert (siehe 9.2). Die Simulation zeigte einen deutlichen Unterschied in der Spitzentemperatur bei den für die Simulation gewählten Aufbau bzw. Randbedingungen zwischen Kupfer(ca. 233°C), Silizium (ca. 580°C) und Al_2O_3 (ca. 2166°C). Al_2O_3 ist kein Material, das üblicherweise für Wärmesenken verwendet wird und soll nur zum Vergleich für ein ungeeignetes Material dienen.

6 Gekühlte Leistungshalbleiter

Die gekühlten Leistungshalbleiter werden mit dem Testsystem bestehend aus einem IGBT und einer Diode ausgeführt. Grundsätzlich ist durch geringe Änderungen eine Kühlung anderer Halbleiter-Bauelemente umsetzbar.

6.1 Konzepte, Zielsetzungen

6.1.1 Einseitig flüssigkeitsgekühlter, in Glas gekapselter, Leistungshalbleiter

Es soll ein Aufbau entworfen und gefertigt werden, mit dem es möglich ist das Testsystem bestehend aus einem IGBT und einer Freilaufdiode an der Chiprückseite zu kühlen. Dieser Aufbau soll so gestaltet werden, dass er auf Waferenebene gefertigt werden kann. Die Kühlung soll über einen Flüssigkeitskreislauf und die Einhausung aus elektrischen Isolationsgründen im Bereich des Halbleiters mit dem Werkstoff Glas realisiert werden. Zur Vermeidung von Wärmespitzen soll in den Aufbau eine Wärmesenke integriert werden. Der Wafer soll 24 Systeme beinhalten die erst am Ende des Fertigungsprozesses getrennt werden.

6.1.2 Beidseitig flüssigkeitsgekühlter, in Glas gekapselter, Leistungshalbleiter

Die beidseitige Kühlung soll wie schon die einseitige Kühlung auf Waferenebene zu fertigen sein, und die Leistungshalbleiter sollen sowohl an der Chiprückseite als auch an der Chipvorderseite gekühlt werden. Das Ziel der Entwicklung wird ein grundsätzlicher Aufbauplan sein, der als Ausblick für weitere Entwicklungen dient. Ein funktionsfähiger Demonstrator ist bei der beidseitigen Kühlung nicht gefordert. Einzelne Prozessschritte sind jedoch so zu planen, dass sie in einer Halbleiterfertigung realisierbar sind.

6.2 Aufbau/Entwicklung des einseitig flüssigkeitsgekühlten in Glas gekapselten Leistungshalbleiters am Testsystem

Der Aufbau des einseitig flüssigkeitsgekühlten in Glas gefassten Leistungshalbleiters beginnt mit einem gereinigten Standard 6" Glaswafer, dargestellt in Abbildung 19 und erfolgt unter Reinraumbedingungen. Dieser Glaswafer besitzt 2 "flats" und hat eine Dicke von 525 µm. Das Grundmaterial des Glaswafers ist Borofloat33 von Schott [20]. Zur Erzeugung des

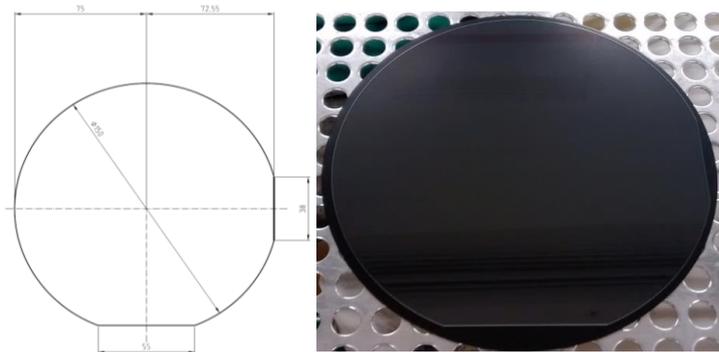


Abbildung 19 Standard 6" Glaswafer mit 2 Flats

Basis-Chipträger-Glases (im Weiteren als Basisglas oder Basiswafer bezeichnet) ist eine Strukturierung des Standardglaswafers notwendig. Die Strukturierung erfolgt mittels nasschemischer Ätzung mit einer Hartmaske.

6.2.1 Vorbereitung der Nasschemischen Ätzung des Basisglases

Die Auswahl der Hartmaske erfolgt über die Glasätzchemie und die in der Halbleiterindustrie gebräuchlichen Schichtmaterialien. Als Ätzchemikalie für das Basisglas wird Flusssäure (im Weiteren als HF bezeichnet) gewählt, da HF eine relativ hohe Ätzrate bei Siliziumoxid basierten Gläsern aufweist. Es ist eine gute Selektivität zwischen der Ätzung von Siliziumdioxid und Silizium mit HF gegeben, daher wird Polysilizium als Hartmaskenmaterial gewählt. Die Abscheidung von Polysilizium erfolgt durch einen Ofenprozess in einer Silan-(SiH₄)-Atmosphäre. Hierbei wird eine Pyrolyse des Precursors (Silan) durchgeführt, dies bedeutet, Silan wird thermisch (bei Temperaturen zwischen 600 - 650 °C) zersetzt (Gl. 6.1), und das entstehende Silizium wird an der Waferoberfläche abgeschieden. Dieses Verfahren wird bei einem niedrigen Druck (0,1 – 1 mbar) durchgeführt, einem LPCVD Verfahren (**L**ow **P**ressure **C**hemical **V**apour **D**eposition). Die Dicke der Hartmaske wird mit ca. 50-100 µm festgelegt (Einstellung der Dicke über Prozessparameter wie Druck, Temperatur und Zeit).



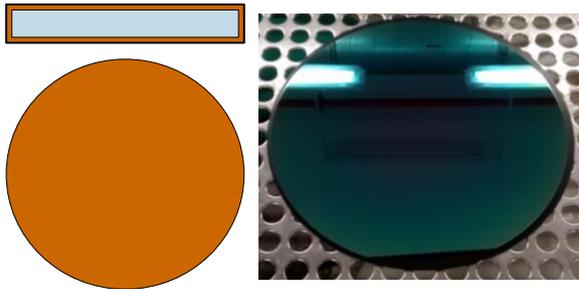


Abbildung 20 Glaswafer beschichtet mit aSi

Der so gefertigte Wafer ist ein Glaswafer der vollständig mit aSi (amorphes bzw. Poly-Silizium) überzogen wurde (Abbildung 20). Diese Schicht dient als Hartmaske bei der nasschemischen Ätzung. Die nasschemische Ätzung ist eine isotrope Ätzung, daher muss die Hartmaske eine gewisse mechanische

Stabilität aufweisen. Wenn die Hartmaske zu dünn ausgeführt wird und die Unterstützung durch das Glas wegen der Unterätzung verliert, kann diese brechen, wodurch die Strukturierung ihre Maßgenauigkeit verliert. Um die Hartmaske zu strukturieren, wird ein fotosensitiver Lack mit einem Spinn-Verfahren auf beiden Seiten des Wafers aufgebracht. Die Dicke der Lackschicht beträgt ca. 2 - 3 μm . Für die Strukturierung der aSi Schicht werden Belichtungsmasken entworfen. Es sind zwei Masken notwendig, um sowohl Vorderseite als auch Rückseite zu strukturieren.

Die Vorderseitenmaske wird so entworfen, dass eine Kupferwärmesenke zur Reduzierung von Spitzentemperaturen von Wärmeimpulsen durch einen galvanischen Prozess zu einem späteren Zeitpunkt erzeugt werden kann. Für den galvanischen Prozess ist es notwendig alle Bereiche, in denen später eine Wärmesenke aufgewachsen werden soll, zu verbinden, sodass der Wafer später nur an zwei Stellen kontaktiert werden muss. Es würde auch eine Kontaktierung ausreichen, zur besseren Stromverteilung ist jedoch eine Kontaktierung an zwei Stellen vorgesehen. Diese Verbindungen der Bereiche wird über einen umlaufenden Ring am Wafer erreicht in den zwei Kontaktflächen integriert werden. Die Rückseitenmaske ist im Vergleich zur Vorderseitenmaske eine einfache Maske mit rechteckigen Bereichen für die Kühlkanäle. Es wird bei den Masken darauf geachtet, dass keine großen überlappenden freien Bereiche bei einer Belichtung von Vorder- und Rückseite entstehen, da bei der späteren Ätzung an beiden Seiten des Wafers ein Materialabtrag erfolgt und die Restdicke des Wafers in diesen Bereichen am geringsten ist. Diese Bereiche sind in der weiteren Prozesskette nach dem Ätzen die gefährdetsten Bereiche für einen Bruch (Abbildung 21).

Mit den so entworfenen Masken kann eine Belichtung durchgeführt werden. Bei den ersten

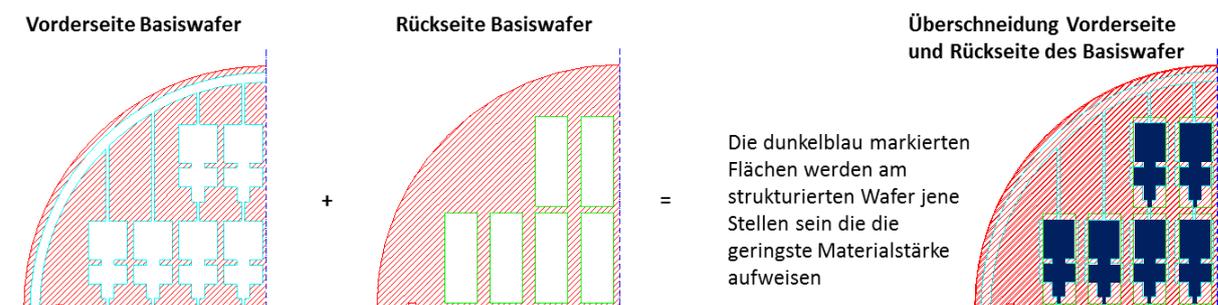


Abbildung 21 Überschneidung Vorder- und Rückseiten Masken Basiswafer

Versuchswafern wird auf das LDI (**L**aser **D**irect **I**maging) Verfahren zurückgegriffen. Bei den weiteren Belichtungen werden die erstellten Masken benutzt und die Belichtung mit einer in der Halbleiterindustrie Standard Proximity UV-Belichtungsanlage von EVG durchgeführt. Bei der UV Belichtung der ersten Wafer wird zuerst die Vorderseite belichtet, der Wafer gedreht, die Rückseite belichtet und im Anschluss entwickelt.

Bei der Prozessierung stellte sich heraus, dass aufgrund des mangelnden Kontrastes der belichteten Vorderseiten zu den unbelichteten Bereichen ein automatisches Ausrichten nicht möglich und ein manuelles Ausrichten nicht mit der erforderlichen Genauigkeit möglich ist. Aus diesen Gründen wurde dazu übergegangen nach der Belichtung der Vorderseite die Entwicklung der Vorderseite direkt durchzuführen und im Anschluss die Rückseite zu belichten und zu entwickeln. Bei dieser Reihenfolge der Schritte war der Kontrast erheblich besser und es konnte ein automatisches Alignment durchgeführt werden.

Die Entwicklung der belichteten Wafer wird über ein Spinnverfahren in den bereits für die Belackung benutzten Anlagen durchgeführt. Die Belackung wird mit einem Positivlack durchgeführt, daher wird in den belichteten Bereichen die Hartmaske durch die Entwicklung freigelegt während bei den unbelichteten Bereichen die Lackschicht erhalten bleibt. Der



Entwicklungsschritt wird mit einem Wasserspülschritt und einem Trocknungsschritt (durch Abschleudern, Zentrifugieren) in der für die Entwicklung genutzten Spinn-Anlage abgeschlossen.

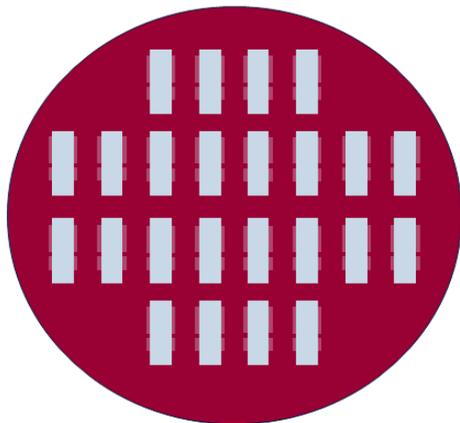


Abbildung 22 Prinzip Basisglas mit plasmageöffneter Hartmaske Ansicht Rückseite

Durch die Entwicklung wird das Silizium teilweise freigelegt. In diesen Bereichen wird die Hartmaske durch einen Plasmaätzschritt in einem Barrelreaktor geöffnet, um eine Maske auf dem Glaswafer für die folgende nasschemische Ätzung zu erhalten und somit die eigentliche Strukturierung des Glaswafers vornehmen zu können. In Abbildung 22 ist eine so geöffnete Hartmaske am Basisglas bzw. an der Rückseite des Basisglases dargestellt.

6.2.2 Nasschemische Ätzung des Basisglases

Die nasschemische Ätzung der Wafer erfolgt in einer SAT (**S**pray **A**cid **T**ool) mit 50% Flusssäure bei 50°C. Die Ätzung wird in drei Varianten mit unterschiedlicher Restglasdicken durchgeführt. Die Restglasdicken entstehen in jenen Bereichen, die sowohl von der Vorderseite als auch von der Rückseite geätzt werden (Überschneidungsbereiche der Masken Abbildung 21). Die Zieldicken, des Restglases, werden mit 100 µm, 50 µm und 30 µm festgelegt. Dabei werden Ätztiefen, bei einer Wafer Startdicke von 525 µm, von 212,5 µm, 237,5 µm und 247,5 µm benötigt (Abbildung 23). Bei der Ätzung ist eine genaue

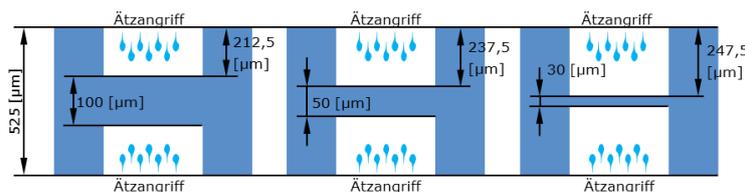


Abbildung 23 Restglasdicke bei beidseitigem Ätzangriff

Kenntnis der Ätzrate zum Erreichen der Zieldicken erforderlich. Die Ätzrate ist von der Temperatur und der Konzentration der Ätzlösung abhängig, aus diesem Grunde

werden Versuche zur nasschemischen Ätzung mittels Flusssäure an Borofloat 33 durchgeführt (siehe 8.1.1). Die Ätzung bei 50°C und 50% Flusssäure ergibt mit der in den Versuchen ermittelten Gleichung (Gl. 8.7), eine Ätzrate von 0,5 µm/s. Daraus folgen die Ätzzeiten für 100 µm mit 425 sec, für 50 µm mit 475 sec und für 100 µm mit 495 sec. Die drei Varianten werden hergestellt, um sicherzustellen, dass die Restglasdicke für eine zerstörungsfreie Prozessierung in den Folgeprozessen ausreicht. Für die weitere Prozessierung gab es bei keiner der beschriebenen Varianten Probleme, daher ist die 30µm Restdicke (geringster Wärmewiderstand) die favorisierte Variante.

6.2.3 Entfernung der Hartmaske und des Fotolacks vom Basisglas

Die Entfernung der Hartmaske und des Fotolacks erfolgt durch eine nasschemische Ätzung. Die Ätzung wird als Tauchprozess im Labor durchgeführt. Bei der Chemikalienauswahl wurde die Entscheidung getroffen, die Entfernung mit 20% Kalilauge (KOH_{aq}) durchzuführen. Alternativ wurde auch eine Ätzung mit 12,5% TMAH (Tetramethylammoniumhydroxid) durchgeführt. Die Ätzung führt bei beiden Varianten zu dem gewünschten Ergebnis. Die Silizium Ätzung erfolgt bei beiden Varianten über die freigesetzten Hydroxidionen (Gl. 6.2).



[21]

Durch die Laugen erfolgt ein chemischer Angriff sowohl auf Silizium (Hartmaskenmaterial) als auch auf den Fotolack, somit kann die Entfernung in einem einzigem Tauchprozess mit anschließender Reinigung durchgeführt werden.

Die Ätzrate war bei diesem Prozess nicht entscheidend, da das Glas von den Laugen nicht geätzt wird und somit eine Überätzung keinen Einfluss auf den Wafer hat. Der Tauchprozess bei beiden Laugen wird als Batchprozess mit einer Ätzzeit von ca. 5min bei ca. 40°C durchgeführt. Das fertige Basisglas ist in Abbildung 24 dargestellt.

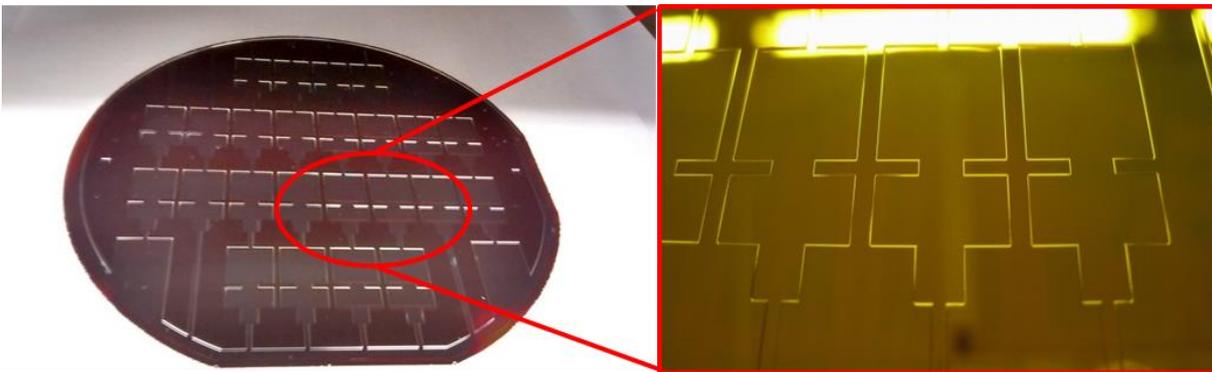


Abbildung 24 Strukturiertes Basisglas

6.2.4 Fertigung Kühlkavitätenwafer

Die Fertigung des Kühlkavitätenwafers wird in 2 Varianten durchgeführt. Als Grundmaterial wird wie beim Basisglas ein Standardglaswafer 6" aus Borofloat 33 mit einer Dicke von $525\mu\text{m}$ genutzt. Die Fertigungsprozesse sind der Herstellung des Basiswafers sehr ähnlich, daher wird im Weiteren nur mehr auf die Änderungen im Detail eingegangen.

Variante 1: einseitige nasschemische Strukturierung mit Erzeugung der Anschlusslöcher durch Laserablation

Bei Variante 1 werden die Kavitäten am Wafer durch eine einseitige nasschemische Ätzung erzeugt. Die Änderungen am Fertigungsprozess sind das Maskenlayout und die Ätztiefe bei der nasschemischen Ätzung.

Das Maskenlayout der Vorderseite des Kühlkavitätenwafers entspricht dem Layout der Rückseite des Basiswafers (Abbildung 21). Der Unterschied zwischen den beiden Masken stellt eine Veränderung der Länge und der Breite der Einzelstrukturen dar. Dies ist notwendig, da die Einzelstrukturen an der Rückseite des Basiswafers und an der Vorderseite des Kühlkavitätenwafers nach der nasschemischen Ätzung die gleiche Größe aufweisen sollen. Durch die unterschiedlichen Ätztiefen und somit unterschiedlichen Unterätzungen der Hartmaske am Basiswafer und am Kühlkavitätenwafer ist dies nur durch eine Anpassung der Maske zu kompensieren. Der Wafer wird beidseitig belackt. Belichtung und Entwicklung erfolgen einseitig, da die Rückseite des Kühlkavitätenwafers nicht strukturiert werden soll und daher vollflächig durch den Fotolack bei der Strukturierung der Hartmaske mittels Plasmaätzen geschützt sein muss.

Die Kühlkavitätenwafer werden wie die Basiswafer in drei Varianten hergestellt, sodass die gesamt Höhe der Kühlkavitäten mit den drei Varianten der Basiswafer jeweils eine Höhe von $500\mu\text{m}$ aufweisen. Die dafür benötigten Ätztiefen sind $287,5\mu\text{m}$, $262,5\mu\text{m}$ und $252,5\mu\text{m}$ (Abbildung 25). Für die Variante mit $252,5\mu\text{m}$ Ätztiefe wird eine Maske hergestellt und für die weiteren Varianten wird die Belichtung mittels LDI (**L**aser **D**irect **I**magi) durchgeführt.

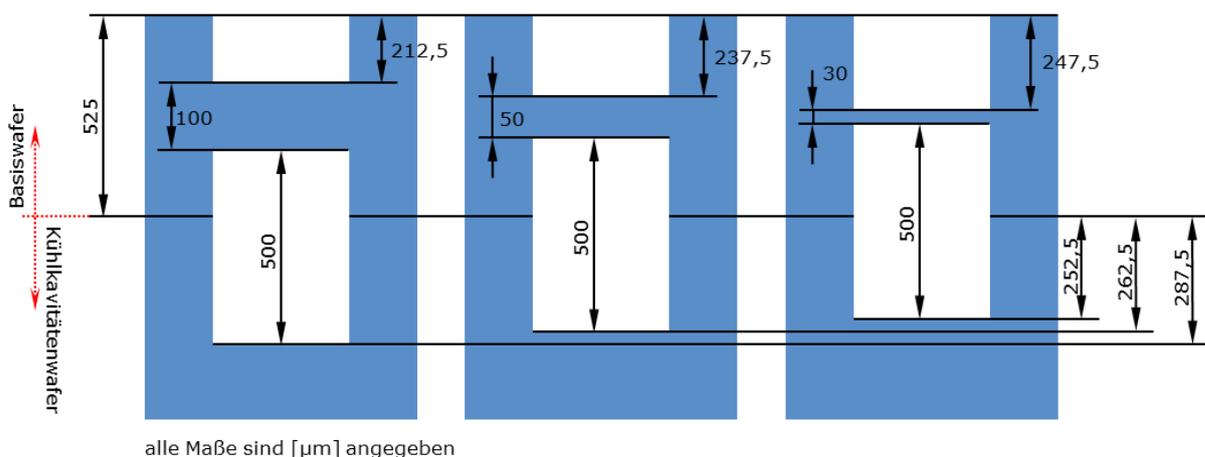


Abbildung 25 Ätztiefen Kühlkavitätenwafer mit lasergebohrten Anschlusslöchern

Die Anschlusslöcher in der Rückseite des Kühlkavitätenwafers werden mittels Ablation erzeugt hierbei werden die im Folgenden näher beschriebenen Verfahren des mechanischen Bohrens und die Laserablation benutzt. Aus den Versuchsergebnissen zum mechanischen Bohren und der Laserablation ist klar ersichtlich, sich die Strukturierung durch mechanisches Bohren nicht für die Herstellung der Anschlusslöcher eignet. Aus diesem Grund wird die Laserablation in Variante 1 gewählt. Ein so strukturierter Wafer ist in

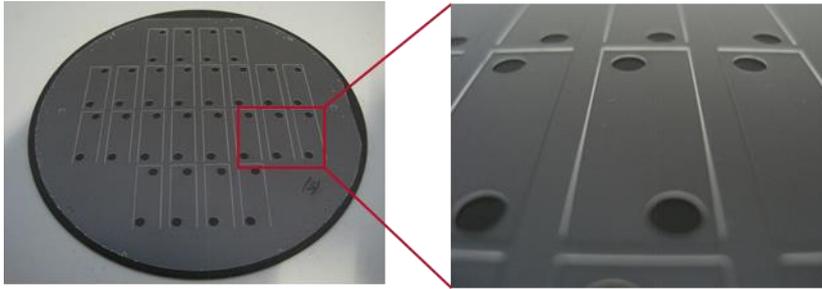
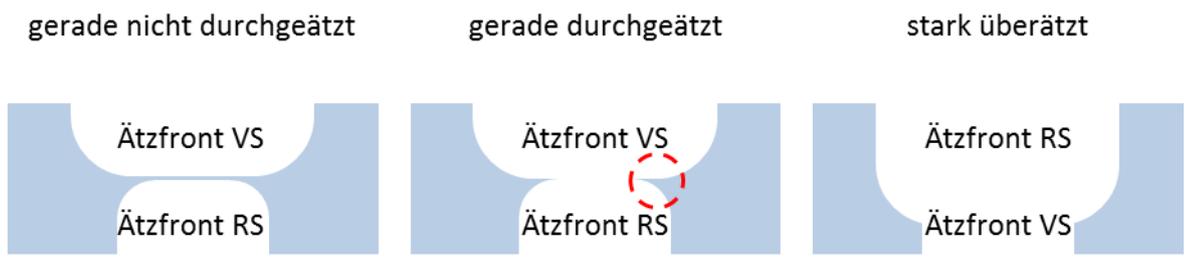


Abbildung 26 Kühlkavitätenwafer mit Anschlusslöchern durch Laserablation

Abbildung 26 dargestellt und erfüllte die Anforderungen hinsichtlich der Qualität (keine Beschädigung des Wafers durch Bohrungen, kein Abplatzen an den Rändern) der erzeugten Löcher.

Variante 2: Erzeugung der Anschlusslöcher durch eine zweiseitige nasschemische Strukturierung

Im Grunde entspricht diese Variante der Fertigung des Basiswafers und wird nur mehr grundsätzlich erläutert. Die Strukturierung erfolgt über eine nasschemische Ätzung mit HF mit einer an Vorderseite und Rückseite unterschiedlich strukturierten Hartmaske. Die Maske für die Vorderseiten-Lithographie ist identisch mit der bei Variante 1 verwendeten. Die Maske für die Rückseiten-Lithographie ist eine Maske mit den Anschlusslöchern. Aufgrund der isotropen Ätzung ist es notwendig die Ätzdauer bzw. Äztiefe so zu wählen, dass eine deutliche Überschneidung der Vorderseiten- und der Rückseiten-Struktur gegeben ist. Ist dies nicht der Fall entsteht an der Übergangskante eine Spitze, wie in Abbildung 27



Durch eine Überschneidung der isotropen Ätzfronten von Vorderseite (VS) und Rückseite (RS) können Ätzspitzen wie in den Rot markierten Bereichen in der Skizze und in der REM – Aufnahme verhindert werden.

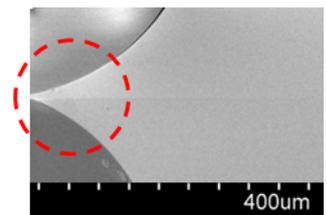


Abbildung 27 Verhinderung von Ätzspitzen durch Überätzung dargestellt.

Eine Überätzung von ca. 100µm reichte aus, um diese Ätzspitze zu verhindern. Dies führte zu einer Äztiefe von 362,5 µm und eine Restglasdicke an der Seite der Anschlusslöcher von

162,5 µm. Die gesamte Kavitätenhöhe aus Basiswafer und Kühlkavitätenwafer summiert sich auf 610 µm. Nach der Strukturierung wird wieder analog zum Herstellungsprozess des Basiswafer die Lack und die Hartmaske mittels einer Kalilaugen-Ätzung entfernt.

6.2.5 Auswahl der Waferverbindungsmethode

Die Auswahl der Waferverbindungsmethode bestimmt die weitere Prozessfolge, da die Waferverbindungsverfahren und die Metallisierungsverfahren aufeinander abgestimmt werden müssen. So ist eine Metallisierung eines verbundenen Waferstacks nicht zielführend, wenn durch die Temperaturen beim sputtern (7.6.2) oder bedampfen (7.6.1) die Verbindung geschädigt wird. Andererseits ist auch eine Metallisierung vor der Verbindung des Waferstacks nicht zielführend, wenn durch die Temperaturen beim Verbindungsprozess und durch die unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten zwischen den Metallen und dem Glas eine Spannung entsteht, die zum Bruch der Glasstrukturen führt. Es wurde festgestellt, dass die Glasstrukturen die entstehenden Spannungen durch die unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten bis zu einer Temperatur von ca. 220°C unbeschädigt überstehen können. Aus diesem Grund kann die Metallisierung vor der Verbindung erfolgen, wenn diese Temperatur im Verbindungsprozess nicht überschritten wird. Die max. Wafertemperatur bei den Metallisierungsverfahren im speziellen beim sputtern liegt für den Seedlayer der galvanisch erzeugten Wärmesenke bei ca. 380°C. Die weiteren Daten für die Abstimmung von Waferverbindungsmethode zu Metallisierungsverfahren sind Tabelle 12-6 zu entnehmen. Es ist ersichtlich, dass die Metallisierung bei dem Epoxidharz Epo-Tek 353ND vor dem Verbinden erzeugt werden muss. Die Glaslote verlangen eine Verbindung vor der Metallisierung. Bei den keramischen Adhäsiven kann die Reihenfolge der Prozessschritte beliebig gewählt werden. Ein weiterer wichtiger Parameter zur Auswahl der Verbindungsmethode ist die mechanische Festigkeit der Verbindung, die mittels Scherversuchen (siehe 8.2.3) bestimmt wurde.

Für die Fertigung der Waferverbindungen wurden zwei Varianten ausgewählt.

Variante1: Erzeugung der Waferverbindung mit einem Epoxidharz (Epo-Tek 353ND) Bei dieser Variante erfolgt der Aufbau der Wärmesenke (6.2.7) vor der Verbindung des Waferstacks. Dies ist notwendig, da die Temperatur beim sputtern des Seedlayers für den Aufbau der Wärmesenke zu hoch ist und die Waferverbindung zerstören würde.

Variante2: Erzeugung der Waferverbindung über einen anodischen Bond. Bei dieser Variante erfolgt der Aufbau der Wärmesenke (6.2.7) nach der Verbindung des Waferstacks. Dies ist notwendig, da die Temperatur beim anodischen Bonden so hoch ist, dass die Wafer aufgrund der unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten, der Metalle (z.B. Kupfer $\alpha_{th} \sim 16,5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) und dem Glas (Borofloat 33 $\alpha_{th} \sim 3,25 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$), zerstört würden.

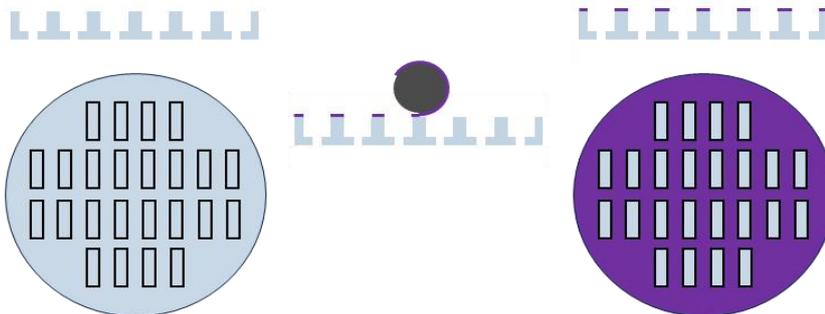
6.2.6 Waferverbindung von Basiswafer und Kühlkavitätenwafer

Die Fertigung der Waferstacks wurde in 2 Varianten durchgeführt. Für beide Varianten ist eine Beschichtung des Basiswafers mit amorphem Silizium notwendig.

Variante 1: Verbindung mit Epoxidharz Epo-Tek 353ND

Diese Beschichtung stellt bei dieser Variante bereits den 1. Prozessschritt des Seedlayers Wärmesenke dar. Die Abscheidung des Seedlayers muss bei dieser Variante aufgrund der Abscheidetemperaturen vor der Verbindungstechnik erfolgen und wird im Kapitel 6.2.7 besprochen. Der bereits gefertigte Kühlkavitätenwafer wird mittels eines Walzverfahrens mit Epo-Tek 353ND beschichtet. Aufgrund des Walzverfahrens wird ein Film des Epoxidharzes an der Oberfläche aufgetragen, tieferliegende Regionen am Wafer bleiben unbeschichtet. Der Basiswafer mit Wärmesenke wird auf den epoxidharzbeschichteten Kühlkavitätenwafer aufgesetzt und ausgerichtet. In der "LAM-Press" wird die Epoxidharzverbindung des Waferstacks bei einem Anpressdruck von ca. 0,4 MPa, der über eine Metallmembran aufgebracht wird, eine Stunde bei 150°C ausgehärtet. Der Prozess wird schematisch in Abbildung 28 dargestellt.

a) Aufbringen des Epoxidharzes auf den Wafer



b) Verbinden und Aushärten in der Lam-Press



Abbildung 28 Fertigung der Waferverbindung mit Epo-Tek 353ND

Variante 2: Verbindung durch anodischen Bond

Bei der Variante über den anodischen Bond wird die Beschichtung benötigt, um die Verbindung herzustellen, da der anodische Bond Verbindungen zwischen Glas und Silizium erzeugt. Der anodische Bond ist temperaturstabil. Somit erfolgt die Abscheidung des Seedlayers nach der Verbindung, um eine zu hohe Temperaturbelastung des Seedlayers beim Bonden zu vermeiden. Das Ergebnis einer solchen Verbindung ist in Abbildung 29 dargestellt.

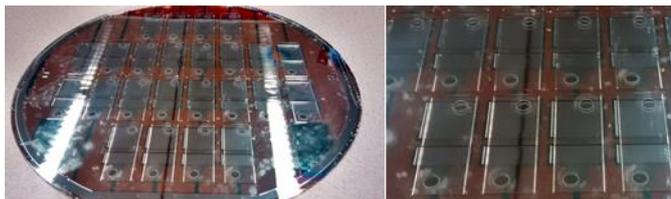


Abbildung 29 anodisch gebondeter Waferstack aus Basiswafer und Kühlkavitätenwafer

6.2.7 Aufbau der Wärmesenke am Basiswafer oder am Waferstack Basiswafer-Kühlkavitätenwafer

Der Aufbau der Wärmesenke gliedert sich in drei Fertigungsschritte.

- Erzeugung des Seedlayers
- Strukturierung des Seedlayers
- Galvanische Erzeugung der Wärmesenke

Der Seedlayer wird aus einem Schichtstapel, bestehend aus 80 nm aSi, 500 nm Al, 700 nm Ti und 500 nm Ag, aufgebaut. Die Abscheidung der Schichten erfolgt in zwei

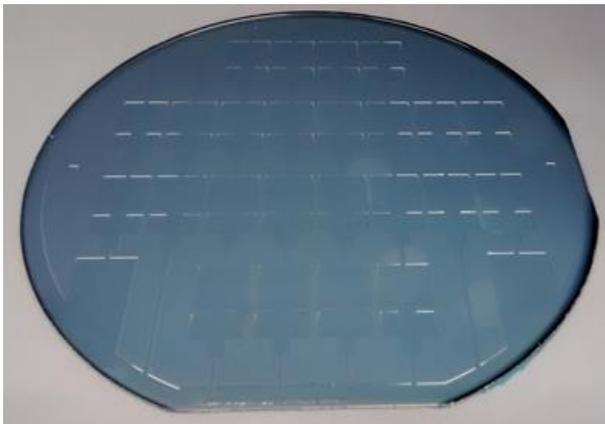


Abbildung 30 Seedlayers auf Basiswafer

unterschiedlichen Abscheidungsprozessen.

Das amorphe Silizium wird durch einen LPCVD Prozess aufgewachsen, und im Anschluss werden die Metallschichten durch Sputtern oder wahlweise durch Bedampfen auf der amorphen Siliziumschicht abgeschieden (Abbildung 30). Es wurden keine Vor- bzw. Nachteile, für diesen Verwendungszweck, der Bedampfung gegenüber dem Sputtern festgestellt.

Die Strukturierung des Seedlayers erfolgt über ein Schleifverfahren. Das Schleifen der Wafer wird im Labor mit einer Laborschleifanlage von Struers (LoboPol 35) durchgeführt. Bei der

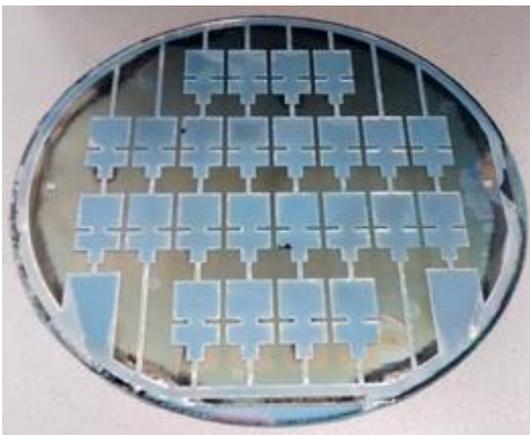


Abbildung 31 Basiswafer mit strukturierter Seedlayer

Strukturierung des Seedlayers wird ein Siliziumcarbid Schleifpapier verwendet. Die weiteren Wafer werden in der Fertigungslinie strukturiert, mit einer Schleifanlage von Disco Technologies. Die Strukturierung erfolgt durch ein Abschleifen der Oberfläche bis zum Glas bzw. bis knapp unter die Glasoberfläche, wodurch nur mehr in den tieferliegenden Bereichen die Metallisierung erhalten bleibt (Abbildung 31). Die Glasoberfläche wird mit einem Profilometer untersucht. Die Ergebnisse sind in Abbildung 32

dargestellt. Die Qualität der Glasoberfläche ist bei der Variante mit der Disco Schleifanlage sehr gut bis auf einige wenige Ausbrüche, die mit großer Wahrscheinlichkeit auf Diamantausbrüche aus dem Schleif-Wheel zurückzuführen sind.

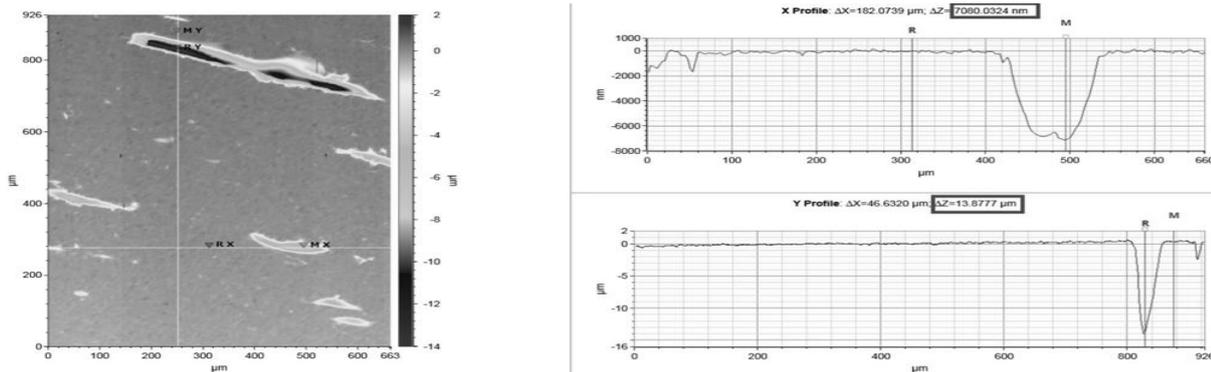


Abbildung 32 Ergebnisse Profilmeteruntersuchungen der geschliffenen Glasoberfläche [23]

Galvanische Erzeugung der Wärmesenke

Die Wärmesenke wird durch ein ECD (**E**lectro **C**hemical **D**eposition) Verfahren erzeugt. Die Wärmesenke wird durch Aufwachsen von 100µm Kupfer aus einem Kupfersulfatbad und 1µm aus einem cyanidischen Silberbad gefertigt. Für den Prozess wird eine Anlage Nexx verwendet, mit der die Abscheidung der Wärmesenke ca. 3h benötigt. Die abschließende 1µm dicke Silberschicht wird abgeschieden, um eine Oxidation an Luft bei der Lagerung bis zu den nächsten Prozessschritt zu verhindern. Bei der elektrochemischen Abscheidung (Abbildung 33a) wird an das zu beschichtende Substrat eine negative Spannung angelegt (Kathode). An einer Gegenelektrode wird eine positive Spannung angelegt (Anode). Die Metallkationen aus dem Elektrolyt oder von der Verbrauchselektrode wandern aufgrund der Polung zur Kathode und werden dort durch Reduktion am Substrat abgeschieden. Ein Wafer vor und nach der galvanischen Abscheidung ist in Abbildung 33 b und c dargestellt.

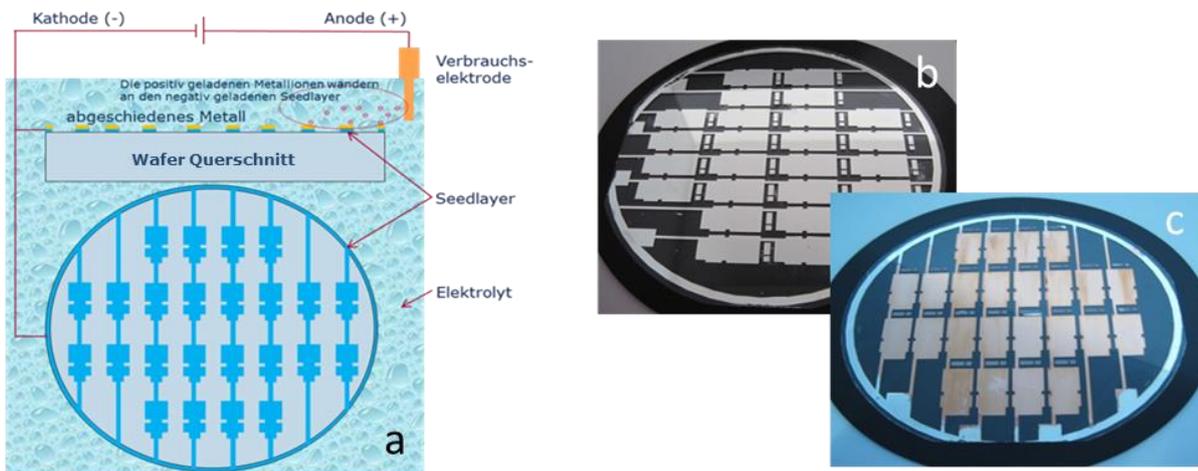
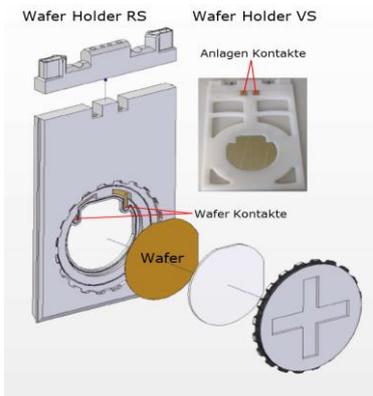


Abbildung 33 Prinzipskizze galvanische Abscheidung (a), Wafer mit Seedlayer (b), Wafer mit abgeschiedenem Cu (c) [36]



**Abbildung 34 Entwurf
Waferholder für Galvanik**

Um den Prozess an der Anlage von Nexx mit dem Basiswafer oder mit dem Waferstack aus Basis- und Kühlkavitätenwafer durchführen zu können musste ein Holder (Abbildung 34) entworfen werden, in den der Wafer geladen und von der Anlage prozessiert werden konnte. Der Waferholder wird aus Teflon gefertigt, der Holder ist sowohl der Lösung bei dem ECD Verfahren als auch als Holder für diverse Versuchsätzungen gedacht. Nach der Fertigstellung des Holders stellte sich heraus, dass der Waferholder für das Handlingsystem der ECD Anlage zu schwer war. Aus diesem Grund wurde ein zweiter Holder aus PE-HD gefertigt und im Bereich ober und unterhalb des Wafers wurden Aussparungen hinzugefügt, wodurch das Gewicht reduziert wird. [22], [23]

6.2.8 Löten des Testsystem auf die Wärmesenke

Das Testsystem wird mittels eines Reflowlötprozesses auf die Wärmesenke gelötet. Die Auftragung des Lotes (ISO-Cream EL3103 bleifrei) erfolgt mit einem Dispenser. Das Lot ist eine Sn95,5Ag4Cu0,5 Legierungspaste mit einem Metallpulveranteil 85% und Korngrößen zwischen 25-45µm. Die Applizierung der Chips erfolgt manuell. Die Aufschmelzung des Lotes wird in einem Infrarot-Ofen durchgeführt, dabei wird das Lot auf ca 220°C erhitzt und die Verbindung erzeugt. Der Herstellungsprozess ist in Abbildung 35 dargestellt.

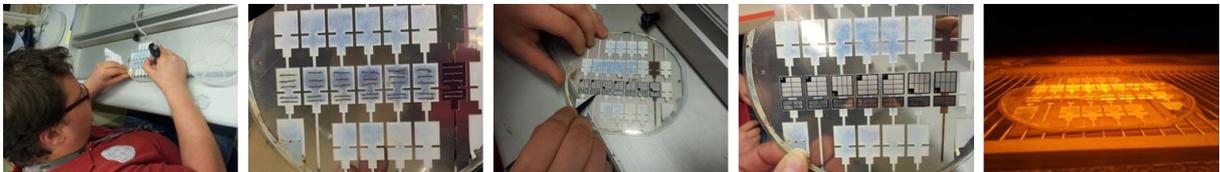


Abbildung 35 Löten der Chips auf die Kupferwärmesenke

Für die Funktion des Chips und für die Thermische Anbindung des Chips an die Wärmesenke ist eine möglichst Void-freie Lötung von Vorteil. Es wurden Versuche durchgeführt, um den Auftrag des Lotes für eine Lötung mit möglichst wenigen Voids zu optimieren.

6.2.9 Vereinzelung des einseitig flüssigkeitsgekühlten in Glas gekapselten Leistungshalbleiterkühlsystem mit Testsystem

Das Vereinzeln (siehe Kapitel 7.9) wird mittels mechanischen Sägens durchgeführt. Es werden Elemente in der Größe von 14x30mm aus dem Waferverbund ausgesägt. Für den Prozess werden die Wafer auf eine Sägefolie, die auf einen Sägeframe aufgespannt ist, geklebt. Die Vereinzelung erfolgt auf einer Disco Säge DFD 6340. Das Sägeblatt ist ein spezielles Diamantsägeblatt für Glas und keramische Werkstoffe mit einer Breite von ca.

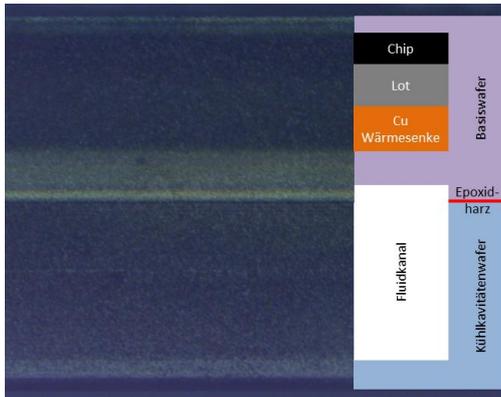


Abbildung 36 Aufnahme Seitenkante nach Sägen

130µm. Es wird ein Fullcut durchgeführt, bei dem ca. 30µm in die Sägefolie eingesägt wird. Die weiteren Parameter sind eine typische Drehzahl von 30-50 kU/min und eine Vorschubgeschwindigkeit zwischen 5-15 mm/s. Da die Wärmesenke in den Basiswafer integriert wird führt der Sägeschnitt hauptsächlich durch das Material Glas. Dies ist ein Vorteil für den Sägeprozess, da Materialübergänge beim Sägen kritisch sind. Bei der Untersuchung der Seitenkanten der Sägestraßen konnten keine Randbeschädigungen (z.B. Mikrorisse) festgestellt werden (Abbildung 36).

Die entstehenden Elemente (dargestellt in Abbildung 37) sind durch den Glas Aufbau sehr robust und das Handling der Bauelemente mit der in Glas gekapselten Kühlung ist weit weniger kritisch als das Handling der 70 µm dicken Chips.



Abbildung 37 Ausgesägte einseitige in Glass gekapselte Leistungshalbleiterkühlsysteme mit eingelöteten Chips

Aus diesem Grund gibt es keine Probleme bei den folgenden Aufbauarbeiten bzw. beim Anschluss an die Kühlung nach dem Lösen der Bauelemente von der nach dem Sägen belichteten Folie.

6.2.10 Aufbau des Kühlkreislafs und Anschluss des einseitig flüssigkeitsgekühlten in Glas gekapselten Leistungshalbleiters

Der Kühlkreislauf wird als ein Zweikreissystem ausgeführt. Die beiden Kreise sind über einen Vorratsbehälter mit einem Fassungsvermögen von 1l verbunden. Die Durchflussmengen

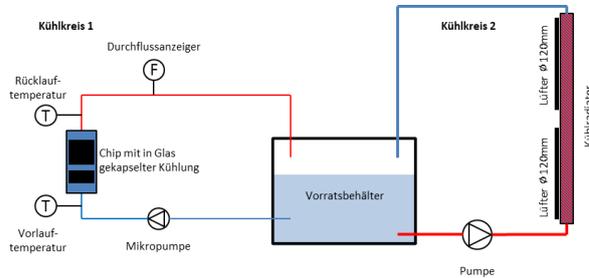


Abbildung 38 Kühlkreislauf für flüssigkeitsgekühlte in Glas gefasste Kühlelemente für Leistungshalbleiter

zwischen Kreis 1 und Kreis 2 verhalten sich zueinander in einem Verhältnis von ca. 1:20. In den Rücklauf von Kreis 1 ist ein Temperaturfühler für die Rücklauf-Temperatur und ein Durchflussanzeiger eingebaut und in den Vorlauf von Kreis 1 ist ebenfalls ein Temperaturfühler zur Bestimmung der Vorlauf-Temperatur integriert. Über die Spreizung zwischen Vor- und

Rücklauf-Temperatur kann mit dem Durchfluss und der Wärmekapazität die abgeführte Wärme bestimmt werden.

Die Anbindung der Verschlauchung an das Kühlsystem wird in 2 Varianten durchgeführt. Bei

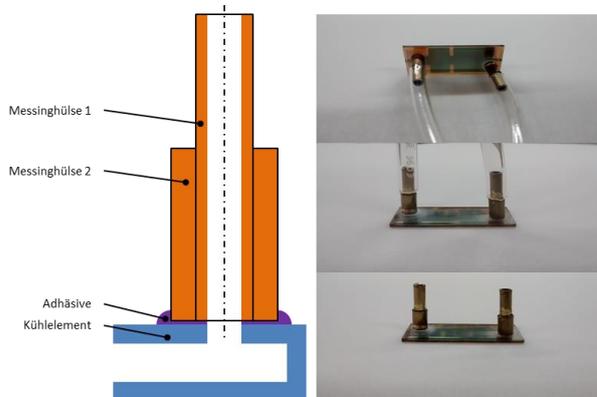


Abbildung 39 Anschlusskonzept Variante 1 und Bilder des fertigen Anschlusses

Variante 1 wurden 2 Messinghülsen in einander gesteckt, sodass ein Absatz entsteht auf den der Schlauch aufgeschoben werden kann. Die Messinghülsen werden über den Anschlusslöchern des Kühlkavitätenwafers aufgeklebt. Durch die Verwendung der zwei Messinghülsen werden zum einen die Klebefläche vergrößert und zum anderen ein Anschlag für die Verschlauchung

geschaffen. Das Anschlusskonzept und die so gefertigten Anschlüsse sind in Abbildung 39 dargestellt. Variante 2 ist so entworfen, dass eine Umlenkung des Kanals in einen PMMA-Block durch Bohrungen erreicht wird. Dadurch können die Schlauchanschlüsse horizontal anstatt vertikal realisiert werden, dies hat Vorteile bei der Aufstellung. Es werden bei dieser Variante Standardschlauchanschlüsse verwendet, die in den PMMA-Block eingeschraubt sind. Das Kühlelement wird in einer Vertiefung an der Oberseite des PMMA-Blocks eingeklebt und hat daher eine deutlich größere Klebefläche als die Anschlusshülsen bei Variante 1. Der komplette Aufbau ist in Abbildung 40 dargestellt. Bei der Fertigung dieser Variante wird der Block noch etwas vergrößert, um mit einer aufgeklebten Kupferfolie auf

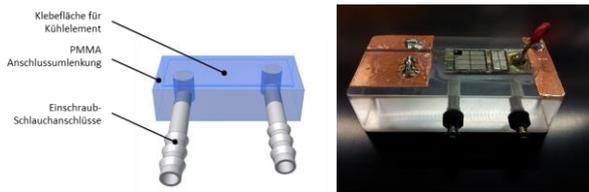


Abbildung 40 Anschlusskonzept Variante 2 mit Bilder des fertigen Anschlusses

dem Block noch 3 Kontaktflächen (Vorderseitenkontakt, Gatekontakt und Rückseitenkontakt) für eine leichtere Handhabung bei Versuchen zu integrieren. Die Vorderseitenkontakte werden mit einem Drahtbondverfahren mit den dafür vorgesehenen Kupferpads

verbunden und der Rückseitenkontakt wird mit einer manuellen Lötung mit dem Kontaktpad verbunden.

Die Funktion der aufgebauten Chips wurde an einem Spitzenmessplatz überprüft (ohne aktivierte Kühlung) und die Ergebnisse der elektrischen Werte entsprachen den Werten eines Chips ohne Kühlaufbau.

6.2.11 Ausführung des einseitig flüssigkeitsgekühlten in Glas gekapselten Leistungshalbleiter-Kühlelementes

Es wurde gezeigt, dass es möglich ist ein Kühlelement für eine einseitige Kühlung des Testsystems mit integrierter Wärmesenke auf Waferebene aufzubauen (Abbildung 41).

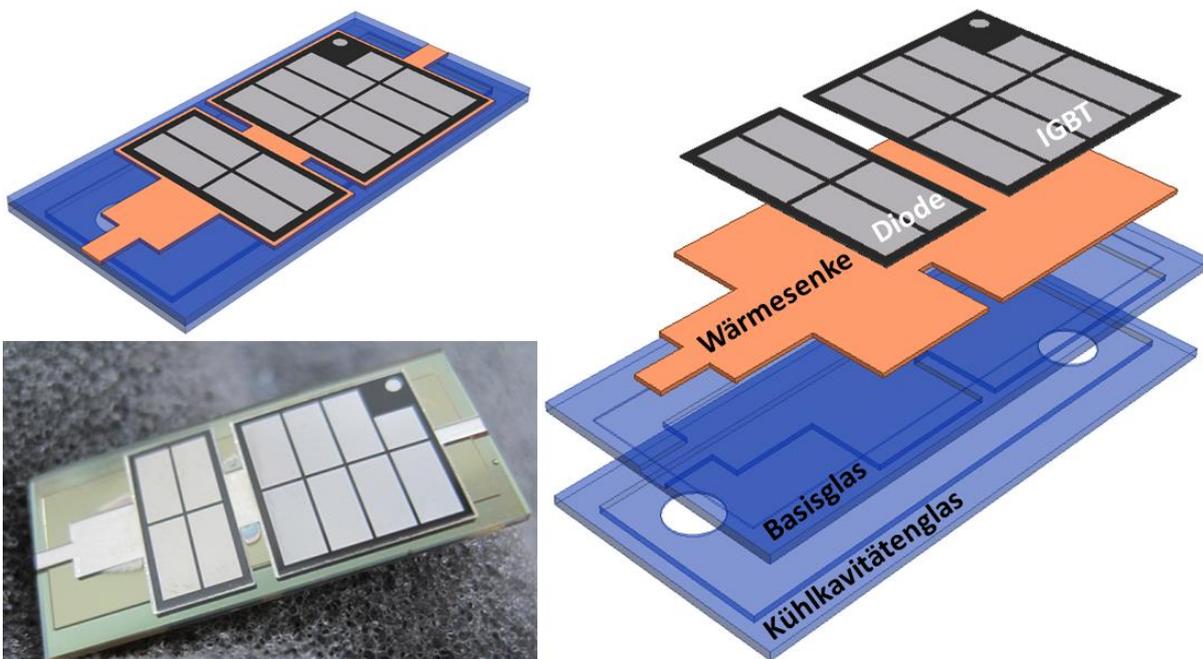


Abbildung 41 Kühlelement für eine einseitige Kühlung des Testsystems mit integrierter Wärmesenke

Das gefertigte Bauteil ist sehr robust gegen mechanische Belastung. Die elektrischen Charakteristika der Bauelemente sind durch den Aufbau bei deaktivierter Kühlung nicht

beeinflusst worden. Die Kühlung wurde im statischen Fall bei einer für das Bauelement geringer Leistung mit Kurzschluss in Versuchen überprüft. Die Kühlleistung reichte dabei aus, um die Bauelemente in einem thermischen Gleichgewicht zu halten. Die Deaktivierung der Kühlung führte zu einer sofortigen thermischen Zerstörung der Bauelemente. Durch die Berechnungen in Kapitel 9.1 für eine Verlustleistung von ca. 200 W konnte gezeigt werden, dass die Temperatur an der Grenzfläche der Kühlkavität zum Fluid einen Wert von ca. 76°C nicht übersteigt und somit eine ausreichende Sicherheit zur Siedetemperatur des Kühlmediums (Wasser) besteht. Die Chiprückseitentemperatur bei der berechneten Kühlung (mit einer Restglasdicke von ca. 30µm) wurde mit ca. 97,8 °C bestimmt, dies liegt einerseits deutlich unter der erlaubten Betriebstemperatur und andererseits unter der berechneten Chiprückseitentemperatur (ca. 170°C) beim Verbau des Testsystems in einem Standardmodul mit gleichen Randbedingungen. Die Reduzierung der Chiptemperatur führt zu einer deutlich längeren Lebensdauer der Chips, da die Lebensdauer exponentiell von der Chiptemperatur abhängt. Ist die längere Lebensdauer nicht entscheidend für den Chip, ist es möglich die elektrische Leistungsfähigkeit des Chips zu erhöhen und die dabei entstehende höhere Verlustleistung mit der Kühlung abzuführen. Die Grenze für die Steigerung der Verlustleistung stellt dabei die Siedetemperatur des Mediums an der Grenzfläche zwischen Kühlkavität und Fluid dar. Durch instationäre thermische Simulation von Wärmepulsen in Kapitel 9.2 konnte gezeigt werden, dass Temperaturspitzen durch eine wie im Aufbau vorhandene integrierte Wärmesenke gedämpft wird. Durch die Wärmesenke kann dadurch die thermische Zerstörung des Bauelementes bis zur Kurzschlussabschaltung bei Kurzschlüssen verhindert werden.

6.2.12 Ausblick zur Optimierung durch Vergrößerung der Wärmeübertragungsfläche des in Glas gefassten flüssigkeitsgekühlten Leistungshalbleiters am Testsystem

Die Vergrößerung der Wärmeübertragungsfläche wird bei dieser Optimierungsidee durch die Erzeugung von Coolingbumps durch die Wärmeübertragungsfläche in den Kühlkavitäten des

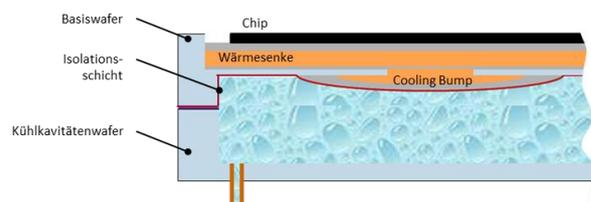


Abbildung 42 Optimierungsmöglichkeit Detail Cooling Bump

Basisglases erreicht. Für die Fertigung der Cooling Bumps (dargestellt in Abbildung 42) werden drei zusätzliche Fertigungsschritte benötigt. Der erste notwendige Schritt ist die Laserablation. Mit diesem Verfahren ist es möglich Löcher in den Basiswafer in der Rückseite des Basiswafers über der Wärmesenke zu strukturieren und auf dieser zu stoppen. Als zweiter Fertigungsschritt ist

eine Galvanik wie bei der Erzeugung der Wärmesenke notwendig, bei der die Wärmesenke selbst als Seedlayer fungiert. Durch das Abscheiden des Kupfers wird zuerst die Bohrung mit Kupfer verfüllt und bei Erreichen der Oberfläche breitet sich das Kupfer auch in horizontaler Richtung aus. Es entsteht ein pilzförmiges Gebilde. Um ein Oxidieren zu vermeiden, ist es möglich einen dünnen Silberlayer galvanisch auf dem Kupfer abzuscheiden. Zum Abschluss muss noch eine Isolationsschicht auf der Rückseite des Basiswafers abgeschieden werden. Eine Möglichkeit für eine Isolationsschicht ist eine gesputterte Aluminiumnitridschicht aber auch andere Isolationsschichten sind möglich. Bei der Abscheidung einer solchen Isolationsschicht ist auf die Abscheidetemperatur zu achten. Ein weiterer Vorteil der Cooling

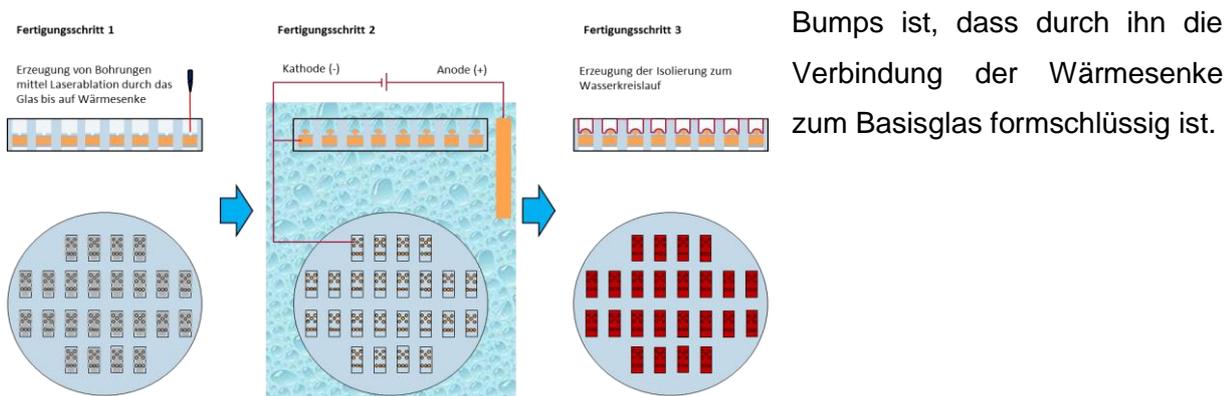


Abbildung 43 Fertigungsprinzip Cooling Bumps

6.3 Aufbau/Entwicklung des beidseitig flüssigkeitsgekühlten in Glas gekapselten Leistungshalbleiters am Testsystem

Der Aufbau für die zweiseitige in Glas gekapselte Kühlung ist ein Entwurf der sich aus 4 Glaswafern zusammensetzt.

- Basiswafer (Abbildung 44a)
- Basisdeckwafer (Abbildung 44b)
- Rückseiten Kühlkavitätenwafer (Abbildung 44c)
- Vorderseiten Kühlkavitätenwafer (Abbildung 44d)



Abbildung 44 Aufbau zweiseitig in Glasgekapselte Kühlung

Durch den fertigen Aufbau wird es möglich sein sowohl die Chip Vorderseiten als auch die Chip Rückseiten zu kühlen.

6.3.1 Fertigung des Basiswafers

Die Fertigung des Basiswafers für die zweiseitige Kühlung ist der Fertigung des Basiswafers für die einseitige Kühlung sehr ähnlich. Es können dieselben Masken verwendet werden. Der Unterschied der Basiswafer ist die Ätzdauer während der nasschemischen Strukturierung, da der Basiswafer für die zweiseitige Kühlung durchgeätzt wird. Die Ätzdauer muss so berechnet werden, dass ein Abtrag von $363,5 \mu\text{m}$ erzeugt wird. Dieser Abtrag errechnet sich aus der halben Waferdicke für die Durchätzung und einer $100 \mu\text{m}$ Überätzung um Ätzspitzen (siehe Abbildung 27) am Übergang zwischen Vorder- und Rückseite zu erzeugen. Nach der Strukturierung des Basiswafers erfolgt die Herstellung des Seedlayers. Der Seedlayer wird



Abbildung 45 Basiswafer für zweiseitige Kühlung a abgeschiedener Seedlayer, b strukturierter Seedlayer VS, strukturierter Seedlayer RS

und größer sind als die Flächen die von der Rückseiten-Strukturierung (Abbildung 45c) stammen.

wie bei der einseitigen Kühlung an der Vorderseite des Wafers abgeschieden (Abbildung 45a) und durch überschleifen an der Oberseite wieder entfernt (Abbildung 45b). Dadurch entsteht ein Seedlayer an der Stufe innerhalb des Basiswafers in jenen Regionen, die von der Vorderseite gesehen tiefer liegen

und größer sind als die Flächen die von der Rückseiten-Strukturierung (Abbildung 45c)

6.3.2 Fertigung des Basisdeckwafers

Die nasschemische Strukturierung des Basisdeckwafers wird analog zur Prozessierung des Basiswafers durchgeführt, allerdings unterscheiden sich Vor- und Rückseitenmaske. Die Maske für die Vorderseite ist in Abbildung 46 dargestellt. In dieser Maske werden neben der Vorderseiten-Isolation des Gates vom Vorderseitenkontakt eine Versetzung des Gate- und Vorderseitenkontaktes, eine Verbindung des Vorderseitenkontaktes von Diode und IGBT und eine Durchführung für den Rückseitenkontakt erzeugt. Die Rückseitenmaske des Basisdeckwafers (dargestellt in Abbildung 46) sieht der Vorderseitenmaske sehr ähnlich, hat aber kleine Bereiche die nicht deckungsgleich mit der Vorderseiten-maske sind. Aus diesem Grund sind die Justiermarken auf den Wafern wichtig, da nur bei einer genauen Justierung die gewünschten Ebenen durch die Ätzung erzeugt werden können. Der Unterschied liegt in den Strukturen zur Versetzung der Kontakte und in der Verbindung der Vorderseitenkontakte von Diode und IGBT. Aufgrund der bereits besprochenen Ätzspitzenproblematik wird wieder

eine Überätzung von 100 µm durchgeführt. Dadurch ergeben sich bei der Strukturierung wieder wie beim Basiswafer drei Höhenebenen mit Glasdicken von 0 µm (durchgeätzt) in den Bereichen in denen sich Vor- und Rückseitenmaske überlappen, 162,5 µm in der Zwischenebene an der nur von der Vorderseite geätzt wurde und 525 µm (ursprüngliche Glasdicke) an den Bereichen die bei der Ätzung sowohl von der Vorderseite als auch von der Rückseite durch die Hartmaske geschützt werden. Dies wird in Abbildung 46 dargestellt, wobei die Rückseitenmaske in der Darstellung gedreht wurde.

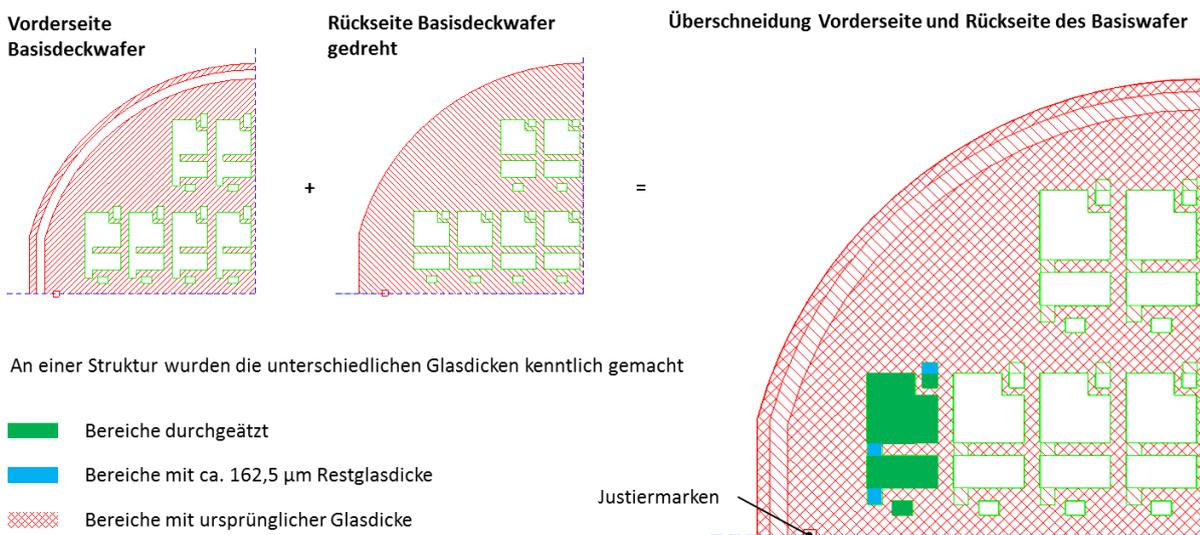


Abbildung 46 Überschneidung Vorder- und Rückseitenmasken Basisdeckwafer

Diese Drehung ist notwendig, da bei der Prozessierung in der Realität der Wafer gedreht wird. Ein so hergestellter Wafer nach der Entfernung der Hartmaske ist in Abbildung 47



Abbildung 47 Basisdeckwafer nach nasschemischer Ätzung ohne Hartmaske

dargestellt. Für die später folgende Galvanik zur Erzeugung der oberen Wärmesenke sowie der Versetzung der Kontakte ist ein Haftvermittler für den Seedlayer an der Zwischenebene notwendig. An der Struktur in Abbildung 46 wurden diese Bereiche blau dargestellt und an dem Wafer umlaufenden Galvanikring. Außerdem

muss eine Verbindung diesen blauen Bereichen und dem Galvanikring geschaffen werden die später wieder entfernt werden können. Um diese Verbindungen zu erzeugen wird ein Sägeverfahren wie beim Vereinzeln benutzt. Durch Einsägen von ca. 15 µm (Sägestrassenbreite ca. 120 µm) werden die Zwischenebenen miteinander und dem

Galvanikring verbunden (Abbildung 48). Es folgt eine Abscheidung von aSi (amorphes Silizium), als Haftvermittler für den Seedlayer.

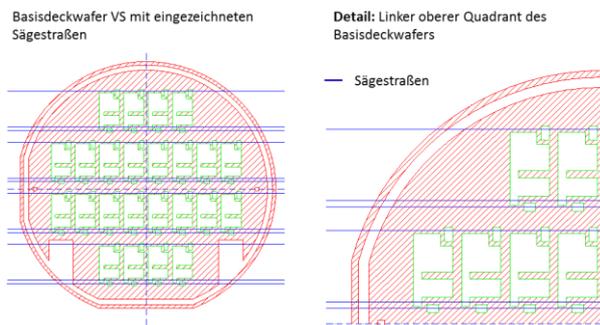


Abbildung 48 Basisdeckwafer mit Sägestraßen

Durch abschleifen der Wafer Vorderseite bis knapp unter die Glasoberfläche wird der strukturierte Haftvermittler für den Seedlayer am Basisdeckwafer geschaffen. Die aSi-Schicht an der Rückseite des Basisdeckwafers wird durch einen einseitigen Trockenätzprozess entfernt.

Der fertige Basisdeckwafer ist in Abbildung 49 in den Übersichtsbildern sowohl auf hellem (aSi deutlicher) als auch dunklem Untergrund (Sägestraßen deutlicher) dargestellt. In der Detailansicht ist der Übergang von der Zwischenebene in die Sägestraße erkennbar.



Abbildung 49 Basisdeckwafer mit Sägestraßen und strukturierter aSi-Schicht

6.3.3 Fertigung des Rückseiten Kühlkavitätenwafer

Der Rückseiten-Kühlkavitätenwafer ist baugleich mit dem Kühlkavitätenwafer der einseitigen Kühlung und wird, wie schon in Kapitel 6.2.4 beschrieben, erzeugt. Der Wafer konnte baugleich erzeugt werden, da die Kontaktierung der Chips über die Vorderseite erfolgt.

6.3.4 Fertigung des Vorderseiten Kühlkavitätenwafer

In den Vorderseiten-Kühlkavitätenwafer wurden neben der Kühlkavität und den Anschlusslöchern auch die Durchführungen für die Kontakte integriert. Aus diesem Grund sind die Kühlkavitäten etwas kleiner als an der Rückseite. Die Fertigung des Wafers erfolgt wieder durch eine nasschemische beidseitige Ätzung wie beim Basiswafer und dem Basisdeckwafer. Die Belichtungsmasken für Vorder- und Rückseite sind in Abbildung 50 dargestellt.

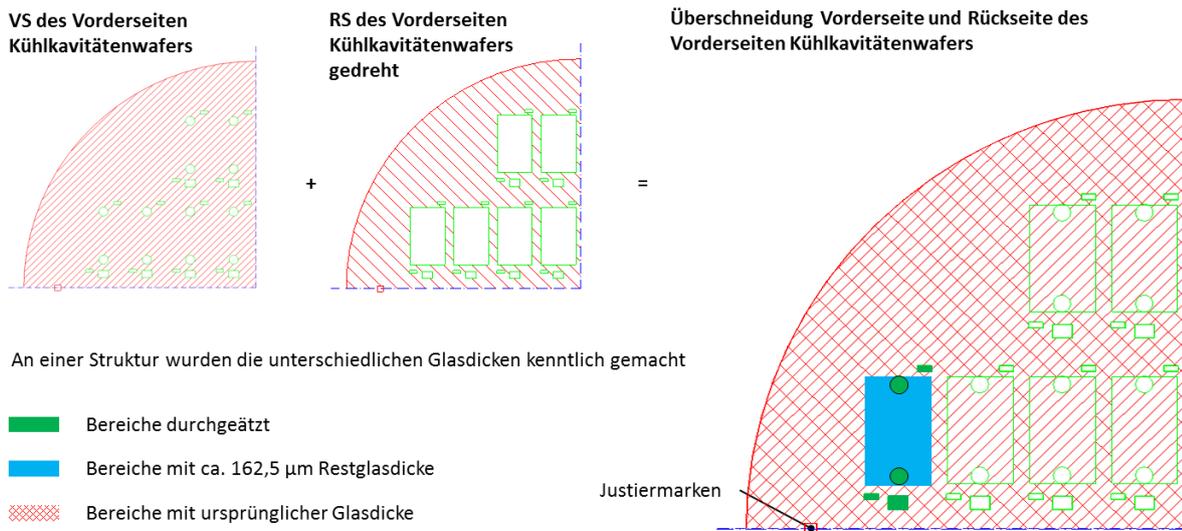


Abbildung 50 Überschneidung Vorder- und Rückseiten Masken, Vorderseiten-Kühlkavitätenwafer

An der Belichtungsmaske der Rückseite (Abbildung 50) sind die Anschlusslöcher nicht vorhanden. Dies ist nicht notwendig, da die Anschlusslöcher innerhalb des Bereiches für die Kühlkavität liegen. Die Ätztiefe wurde wieder wegen der bereits besprochenen Ätzspitzenproblematik, so ausgeführt, dass um 100 µm überätzt wurde. Der gefertigte Wafer nach ablösen der Hartmaske wird in Abbildung 51 dargestellt.

Vorderseiten Kühlkavitätenwafer

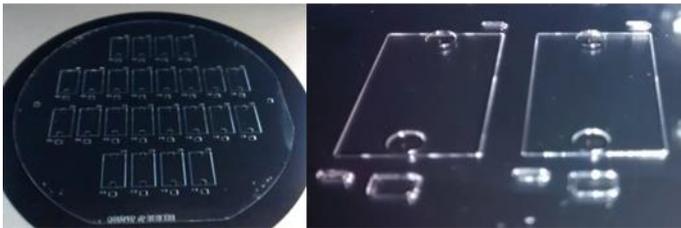


Abbildung 51 Vorderseiten Kühlkavitätenwafer

Die Ätztiefe wurde wieder wegen der bereits besprochenen Ätzspitzenproblematik, so ausgeführt, dass um 100 µm überätzt wurde. Der gefertigte Wafer nach ablösen der Hartmaske wird in Abbildung 51 dargestellt.

6.3.5 Einkapselung der Bauelemente und Kontaktierung

Auf der Rückseite des Basisdeckwafers wird ein Adhäsiv mit einem Walzverfahren oder einem Printverfahren appliziert und die Chips werden mit einem Pick and Place Verfahren

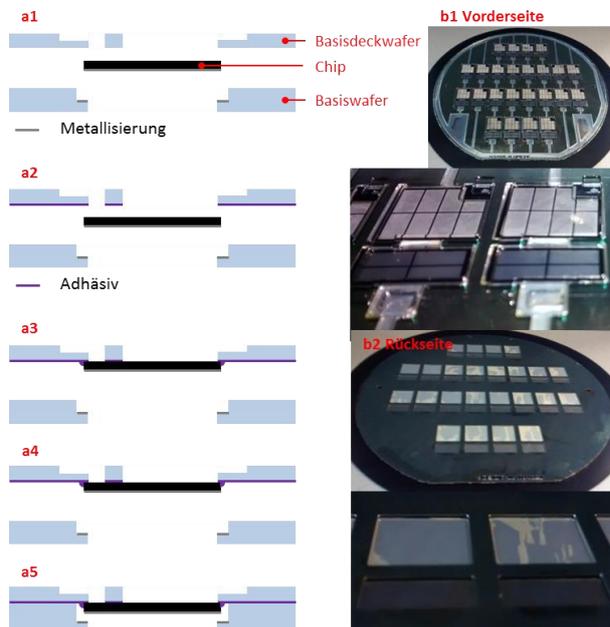


Abbildung 52 Chip Einkapselung a) Prozessfolge Chip, b) Vorder- und Rückseite des Waferstacks

auf dem Wafer positioniert. Im Anschluss wird der Basiswafer mit dem Basisdeckwafer verklebt, sodass die Chips sich in der Kavität zwischen Basis- und Basisdeckwafer an der Unterseite des Basisdeckwafers verbaut sind (dargestellt in Abbildung 52). Wie in Abbildung 52a5 ersichtlich ist, entsteht unter dem Chip eine Kavität. Über eine galvanische Abscheidung wird in dieser Kavität Kupfer abgeschieden. Um dies zu erreichen wird die Kathodenspannung (-) an den Seedlayer an der Stufe des Basisglases angelegt (Abbildung 53a1), wodurch die Abscheidung an dieser Stufe beginnt. An der Stufe wird solange Kupfer abgeschieden bis das abgeschiedene Kupfer an die

Rückseitenmetallisierung des Chips stößt (Abbildung 53a2). Durch diesen Kontakt ist nun die gesamte Chiprückseite auf Kathodenpotenzial und die Vorzugsrichtung der Abscheidung dreht sich um. An der Chiprückseite wird nun solange Kupfer abgeschieden bis das Niveau der Glasoberfläche erreicht wird (Abbildung 53a3). Durch diesen Prozess ist der Chip formschlüssig zwischen Basis- und Basisdeckwafer verankert und das Kupfer dient als Wärmesenke für die Chiprückseite. Ein weiterer Vorteil dieser Methode ist, dass der Chip nicht mehr mit der Wärmesenke verlötet werden muss.

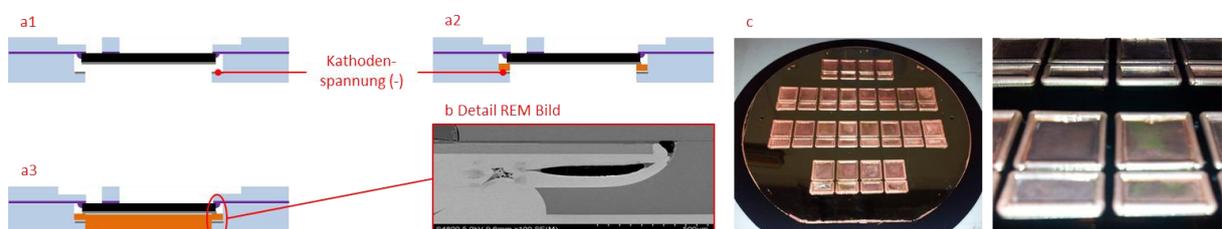


Abbildung 53 Galvanische Verbindung von Basiswafer und Chip [37] a) Prozessfolge, b) Detail REM, c) Foto Wafer und Detailaufnahme

Wie in Abbildung 53c zu erkennen ist, bilden sich bei der galvanischen Abscheidung Kupferringe an der Glaskante der Rückseitenöffnungen. Diese entstehen, durch eine Verdichtung der Feldlinien an der Glaskante während der Abscheidung. Um eine bündige

planarisierte Oberfläche zur weiteren Fertigung zu erhalten, wird mit einem Schleifverfahren bis an die Glasoberfläche geschliffen. Ein Element auf einem so geschliffenen Wafer ist in

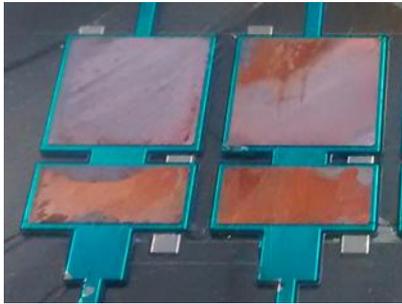


Abbildung 54 Waferstack mit geschliffener Wärmesenke

Abbildung 54 dargestellt, außerdem sind durch das Glas die Sägestraßen auf dem Basisdeckwafer des Waferstacks zu erkennen. Der nächste Schritt ist die Erzeugung der Wärmesenke und der Kontaktierung auf der Waferstackoberseite. Auf der Oberseite des Basisdeckwafer wird ganzflächig der Seedlayer für die obere Wärmesenke abgeschieden (Abbildung 55a2) und wieder bis auf die Glasoberfläche zurückgeschliffen (Abbildung 55a3). Über die bereits erzeugten Sägestraßen mit dem Seedlayer sind jetzt alle Bereiche an denen galvanisch Kupfer abgeschieden werden soll mit dem am Wafer umlaufenden Galvanikring verbunden. Die Kathodenspannung kann somit am Galvanikring

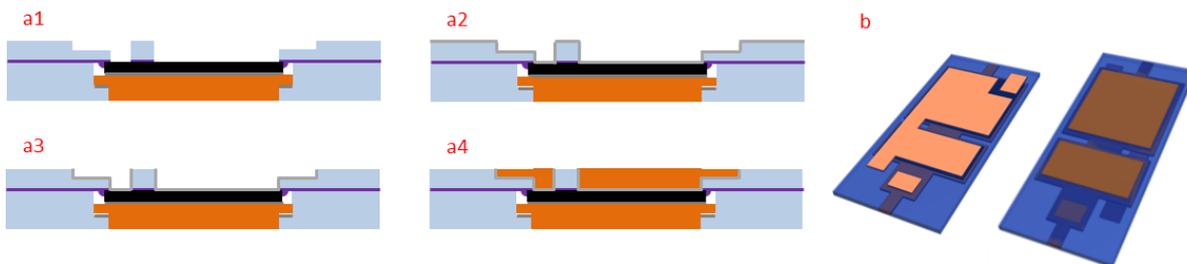


Abbildung 55 Erzeugung der oberen Wärmesenke a) Prozessfolge, b) VS und RS der fertigen Strukturen

angelegt werden und die angeschlossenen Bereiche werden galvanisch verfüllt (Abbildung 55a4).

Zur Erzeugung einer bündigen planaren Oberfläche für die weitere Prozessierung und um die einzelnen Elemente galvanisch zu trennen, wird rückgeschliffen. Die Schleiftiefe wird dabei so gewählt, dass sie etwas größer ist als die Tiefe der Sägestraßen. Die dadurch entstehenden Strukturen sind in Abbildung 55b dargestellt. Im folgenden Schritt wird die Isolierung der Wärmesenken, die auch für die Kontaktierung verwendet werden und daher im Betrieb stromführend sind, erzeugt. Die Isolierung wird durch eine gesputterte Aluminiumnitrid-Schicht an beiden Oberflächen des Waferstacks erzeugt (Abbildung 56a1).

An der Vorderseite des Waferstacks wird auf die Isolierschicht eine Lackmaske (Abbildung 56a2) aufgebracht und strukturiert, um die Aluminiumnitridschicht in Bereichen für die Durchkontaktierung, mit einem Trockenätzprozess wieder zu entfernen (Abbildung 56a3). Die so vorbereiteten Gläser werden mit den Vorder- und Rückseiten-Kühlkavitätenwafern

verbunden (Abbildung 56a4). Durch eine abschließende galvanische Kupferabscheidung an den zuvor mit dem Trockenätzprozess geöffneten Bereichen werden die Kontaktlöcher im Vorderseiten-Kühlkavitätenwafer verfüllt (Abbildung 56a5).

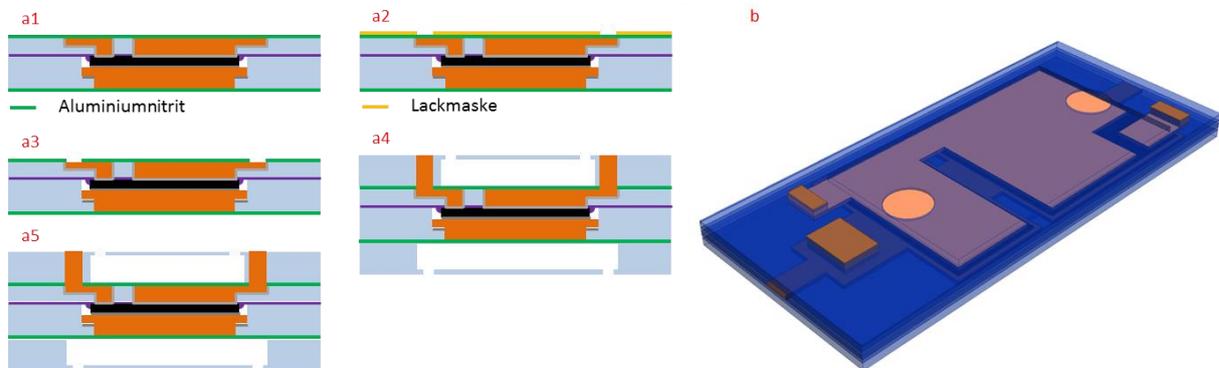


Abbildung 56 Erzeugung der Isolation und Verbindung mit Kühlkavitätenwafern a) Prozessfolge, b) Darstellung der fertigen Struktur

Die Kontaktierung und Verschlauchung kann wie bei der einseitigen in Glas gekapselten Kühlung erfolgen. [24]

7 Fertigungsprozesse in der MEMs – und Halbleiterfertigung

7.1 Reinigungsprozesse

Die Reinigungsprozesse in der Halbleitertechnik sind sehr vielfältig und nach den meisten Prozessschritten notwendig, da sich geringe Verunreinigungen drastisch auf die Bauelemente auswirken. Aus diesem Grund ist eine Fertigung in Reinräumen notwendig, um die Partikelbelastung möglichst gering zu halten und somit Verunreinigungen zu vermeiden. Nicht nur Partikel stellen Probleme dar, sondern auch Reste der verwendeten Chemikalien oder metallische Verunreinigungen aus Metallisierungsverfahren. Die Verunreinigungen können in

- **Mikroskopische Verunreinigungen** z.B. Partikel aus der Reinraumluft, Partikel von Prozessanlagen, Haare oder Hautpartikel des Personals uvm.
- **Molekulare Verunreinigungen** z.B. Kohlenwasserstoffketten aus Önebeln von Vakuumpumpsystemen der Prozessanlagen oder unzureichend entfernte Fotolacke uvm.
- **Alkalische Verunreinigungen** z.B. verursacht durch Salze aus unzureichend gereinigtem Wasser, durch Hautkontakt oder Reste von alkalischen Ätzlösungen uvm.
- **Atomare Verunreinigungen** z.B. Metalle aus Ätzlösungen oder Abrieb aus Prozessanlagen uvm.

Unterteilt werden.

Diese grobe Einteilung der möglichen Verunreinigungen zeigen bereits, wie vielfältig diese sein können. Aber nicht nur die Verunreinigungen sind vielfältig, sondern auch die Randbedingungen, die bei der Reinigung beachtet werden müssen, beispielsweise die Oberflächen, die gereinigt werden, nicht zu zerstören oder bei der Reinigung eine bestimmte Temperatur nicht zu überschreiten. So muss der Reinigungsprozess auf die jeweiligen Anforderungen speziell ausgelegt werden. Die Grundprozesse zur Reinigung sind physikalischer oder chemischer Natur oder auch eine Mischung aus beidem. Ein Beispiel für eine in der Halbleiterproduktion übliche physikalisch-chemischen Reinigungsprozedur ist

- Abblasen von Partikeln mit Stickstoff
- Reinigung in einem Ultraschallbad
- Entfernen von organischen Verunreinigungen mit CAROscher Säure ($\text{H}_2\text{SO}_4 - \text{H}_2\text{O}_2$)
- Entfernen von noch vorhanden Resten organischer Verunreinigungen mit einer $\text{NH}_4 - \text{H}_2\text{O}_2$ Lösung

- Entfernen von metallischer Verunreinigungen mit Salzsäure (HCl) und Wasserstoffperoxid (H₂O₂)
- Trocknen der Wafer in einer Trockenschleuder mit heißem Stickstoff

Nach jedem (ausgenommen ist die Trocknung) einzelnen Prozessschritt ist eine Spülung mit Reinstwasser erforderlich und gegebenenfalls eine Entfernung eines natürlichen Oxids z.B. mit HF. [25], [21]

7.1.1 Fotolack - Entfernung

Da in der Halbleiterfertigung Lithographie (Kapitel 7.4)ein häufig eingesetztes Verfahren ist, wird auch die Fotolackentfernung häufig benötigt. Die Fotolackentfernung folgt hier dem eigentlichem Strukturierungsschritt. Die typischen Verfahren zur Fotolackentfernung sind

- Lösen des Lacks in einem Lösungsmittel z.B. Aceton
- Nasschemisches Ätzen des Lacks in stark basischen/sauren Ätzlösungen z.B. KOH oder H₂O₂/H₂SO₄ Gemischen
- Ätzen des Lacks mit einem Trockenätzprozess

Das Lösen des Lacks mit einem Lösungsmittel ist ein sehr schonendes Verfahren, jedoch hat es den Nachteil, dass es nur eingesetzt werden kann, wenn die Polymerisation des Lacks nicht zu weit fortgeschritten ist. Der Prozess selbst ist von der Prozessführung mit einer nasschemischen Ätzung sehr ähnlich und wird meist wie eine Tauchätzung (Kapitel 7.2.1.1) durchgeführt. Im Unterschied zur Tauchätzung erfolgt der Abtrag jedoch nicht über eine chemische Reaktion sondern über ein Ablösen ("vermischen") des Lacks mit dem Lösungsmittel.

Das nasschemische Ätzen des Lacks ist das Abtragen des Lacks durch eine chemische Reaktion zwischen Lack und der Ätzlösung. Die nasschemische Ätzung ist deutlich aggressiver und schneller als ein Lösevorgang. Typischer Weise ist eine solche Ätzung eine nasschemische Oxidation des Lacks. Die Gefahr ist hierbei, dass nicht nur der Lack von der Ätzlösung angegriffen wird, sondern auch die darunter liegenden Schichten. Aus diesem Grund ist eine sorgfältige Auswahl der Ätzlösung, je nach Material des Lacks und der darunter liegenden Materialien, notwendig. Der Prozess wird meist als Tauchätzung (Kapitel 7.2.1.1) durchgeführt. Ist die Polymerisierung des Lacks sehr weit fortgeschritten, lässt sich der Lack meist auch nicht durch ein nasschemisches Ätzen entfernen.

Bei einem solchen bereits sehr hoch polymerisierten Lack werden zur Entfernung Trockenätzprozesse (Kapitel 7.5) eingesetzt. Oft wird ein solcher Prozess als Veraschung

bezeichnet, da durch Sauerstoffplasma gasförmige Reaktionsprodukte wie Kohlenmonoxid (CO), Kohlendioxid (CO₂) und Wasserdampf (H₂O) gebildet werden, welche durch ein Vakuumpumpsystem abgesaugt, werden. Die Lackschicht kann durch ein solches Verfahren rückstandslos entfernt werden. Der Nachteil ist jedoch, dass die darunterliegenden Schichten durch beschleunigte Sauerstoffionen auch angegriffen werden. [1], [25], [21]

7.2 Glasstrukturierung

7.2.1 Nasschemische Glasstrukturierung

Das Prinzip bei der Nasschemischen Ätzung ist, einen Feststoff mit einem flüssigen Ätzmedium über eine chemische Reaktion abzutragen. Für die Glasätzung wird hier typischerweise wässrige Flußsäure (HF) als Ätzmedium genutzt. Die Bruttoreaktion entspricht der in (Gl. 6.1) dargestellten Reaktion.



Typische Verfahren zur nasschemischen Strukturierung von Gläsern sind Tauchätzverfahren oder Sprühätzverfahren. Die Herausforderung beim Anlagenbau liegt dafür meist bei der Materialauswahl jener Komponenten, die mit der verwendeten Ätzchemie in Berührung kommen. Es wird von Ätzchemie gesprochen, da diese Anlagen meist auch für die Entfernung der Hartmaske und/oder der Lackmaske verwendet wird. Materialien, die häufig zum Einsatz kommen, sind beispielsweise Teflon oder PEEK (Polyetheretherketon). [1], [2], [21], [25]

7.2.1.1 Tauchätzung (Beckenätzung)

Bei der Tauchätzung wird eine ganze Horde mit 25 Wafern in ein Becken getaucht, das mit der Ätzlösung gefüllt wird. Diese Becken sind geheizt, um eine konstante Ätzrate zu gewährleisten, zusätzlich findet auch eine Anregung durch Ultraschall oder eine Umwälzung innerhalb des Beckens beispielsweise durch Rühren statt. Die Äztiefe wird über die Verweilzeit der Wafer im Becken gesteuert, daher ist eine genaue Kenntnis der Ätzrate notwendig. Nach Ablauf der Ätzzeit werden die Wafer über eine Hebeanlage in ein Spülbecken transportiert. Im Anschluss an die Spülung erfolgt oft die Entfernung der Hart- und/oder der Lack-Maske, wenn diese für weitere Prozesse nicht mehr gebraucht werden. Die Entfernung der Hartmaske bzw. Lackmaske erfolgt wieder über eine Ätzung (z.B. Siliziumätzung mit KOH). Die gesamte Tauchätzung wird wieder mit einer Reinigung (Wasserspülen) in einem separaten Becken abgeschlossen. Nach der Tauchätzung ist ein

Trockenschritt notwendig um die Wafer weiterprozessieren zu können (dargestellt in Abbildung 57).

Da sich die Konzentration in den Ätzbecken durch die Ätzung verändert, ist auch die Konzentrationsabhängigkeit der Ätzrate eine wichtige Größe. In der Praxis wird der

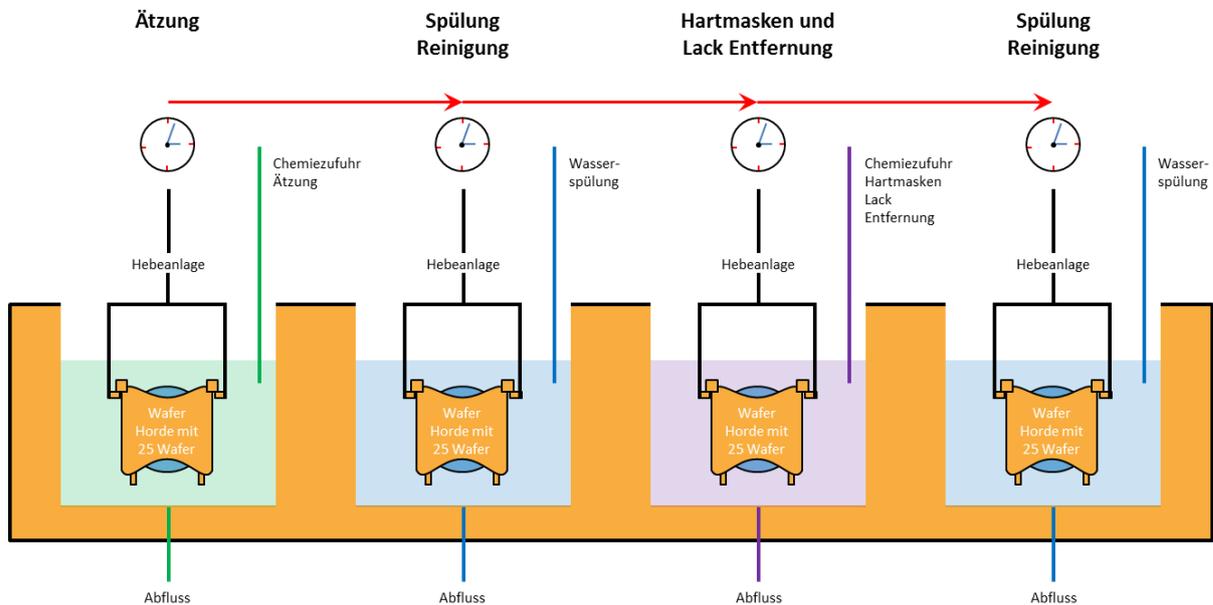


Abbildung 57 Nasschemische Tauchätzung

Konzentrationsabnahme meist durch einen Tausch des Beckeninhaltes mit einer frischen Ätzlösung nach einer bestimmten Anzahl von Wafern Rechnung getragen. Durch den "Beckentausch" wird auch eine Anreicherung von Verunreinigungen im Becken, die über die Wafer eingebracht werden könnten, gegengesteuert. Die wichtigste Prozessgröße bei der Tauchätzung ist somit die Ätzrate die vor allem von Temperatur und Konzentration der Ätzlösung abhängig ist. [1], [2], [21], [25]

7.2.1.2 *Sprühätzung*

Die Sprühätzung ist ein Prozess, der als Einzelscheibenprozess ähnlich der Spray-Belackung (7.4.1.2) oder mit einer SAT (**S**pray **A**cid **T**ool) als Batchprozess durchgeführt werden kann (Abbildung 58). Für eine Volumensfertigung ist der Batchprozess vorzuziehen, da die Kosten pro Wafer deutlich geringer sind. Bei einem Batch Prozess werden die Wafer in einer geeigneten Horde (z.B. Teflon) in einer Trommel in die Ätzkammer geschoben. Diese Trommel ist so ausgeführt, dass der Mantel größtenteils geöffnet ist. Die Sprühköpfe sind in den Mantel der Reaktionskammer integriert. Ist die Horde mit den Wafern in der Trommel, wird die Reaktionskammer geschlossen. In der Tür der Reaktionskammer ist meist ein Sichtfenster zur Beobachtung des Prozesses eingelassen. Dieses Sichtfenster muss chemikalienbeständig sein. Bei einer Glasätzung Flusssäure- beständig; hierbei empfehlen sich Materialien wie z.B. Saphirglas. Der Prozess startet indem die Trommel mit den Wafern

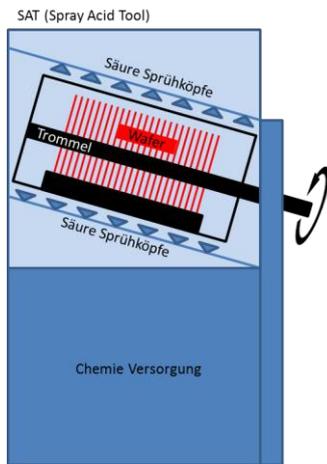


Abbildung 58
Nasschemische
Ätzung in einer SAT

in Rotation gebracht wird. Über die Sprühköpfe werden die benötigten Chemikalien eingesprüht. Wie bereits bei der Tauchätzung (7.2.1.1) besteht der Prozess aus Ätz- und Spülschritten zusätzlich kann bei SAT Prozessen auch die Trocknung in der Anlage durchgeführt werden. Eine Trocknung wird durch Einblasen von heißem Stickstoff über die Sprühdüsen erreicht. Die zugeführten Chemikalie sowie die Ätzkammer werden bei dem Prozess vorgeheizt, sodass eine konstante Temperatur und somit Ätzrate gewährleistet werden kann. Die Konzentration bleibt bei diesem Prozess konstant, da ständig frische Ätzlösung eingesprüht wird und die verbrauchte Ätzlösung über einen Ausfluss in der Ätzkammer abläuft. Somit ist die Kontrolle bzw. Regelung der Temperatur der größte

Einflussparameter auf die Ätzrate. [2], [21], [25]

7.2.2 Mechanisches Bohren von Glas

Das mechanische Bohren wird benutzt, um eine kreiszylindrische Innenfläche in ein Material zu schneiden. Es ist ein Verfahren, bei dem die Drehachse des Bohrers und die Achse der erzeugten Innenfläche identisch sind; der Materialabtrag erfolgt spanend. Bei sehr spröden Werkstoffen, wie Glas, ist das Bohren aber eher den Verfahren Schleifen und Schaben zuzuordnen. Die wichtigsten Parameter sind bei solchen Spröd-Bohrungen die Härte des Bohrers, die Drehzahl des Bohrers, die Anpresskraft und die notwendige Kühlung während des Bohrvorgangs. Um Bohrungen an spröden und harten Materialien durchführen zu können, werden typischerweise Bohrer mit diamantbesetzten Schneiden eingesetzt. [26]

7.2.3 Laserablation von Glas

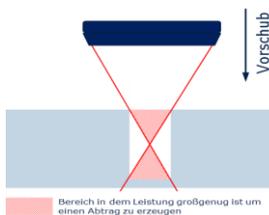


Abbildung 59
Prinzip Laserbohrens

Die Laserablation ist ein Abtragsverfahren, bei dem das Material durch kurze starke Laserpulse an der Oberfläche in einem sehr kleinen Bereich stark erhitzt wird und dadurch abgetragen bzw. schlagartig verdampft wird. Da der Energieeintrag auf ein sehr kleines Volumen konzentriert ist und sich nur auf sehr kurze Pulse beschränkt, ist die Wärmeleitung zu langsam, um die Energie auf den gesamten Festkörper zu verteilen. Dies führt zu einem definierter

Abtrag des Materials. Die maßgeblichen Parameter bei der Laserablation sind die Wellenlänge, die Strahl- bzw. Fokusgeometrie, Intensität, Pulsenergie, die

Pulsrepetitionsrate und die Geschwindigkeit der Relativbewegung zwischen Werkstück und Laserstrahl. Durch die Relativbewegung von Strahl zu Werkstück können aber nicht nur Bohrungen erstellt werden im Prinzip kann jede nach oben offene erzeugt Geometrie hergestellt werden. [27]

7.2.4 Glasschleifen

Das Schleifen der Glaswafer funktioniert nach einem Rotationsschleifprinzip. Es rotiert sowohl der Wafer als auch das Schleifwheel, jedoch in entgegengesetzter Richtung. Die Rotationsachsen des Wafers und des Schleifwheels sind um einen Abstand etwas größer als der Waferradius versetzt. Das Schleifwheel besitzt einen Ring, der mit Diamanten besetzt ist. Wird das Schleifwheel auf den Wafer während der Rotationsbewegungen aufgesetzt, erfolgt ein Abtrag an der Oberfläche des Wafers in Form von Schleifriefen die durch die Diamanten in die Oberfläche geschnitten werden. Der gesamte Prozess findet unter einer intensiven Wasserspülung statt. Die Wasserspülung hat den Hintergrund, den Abtransport des abgetragenen Materials zu gewährleisten und die frei werdende Wärme abzutransportieren. Der Prozess ist in Abbildung 60 prinzipiell dargestellt.

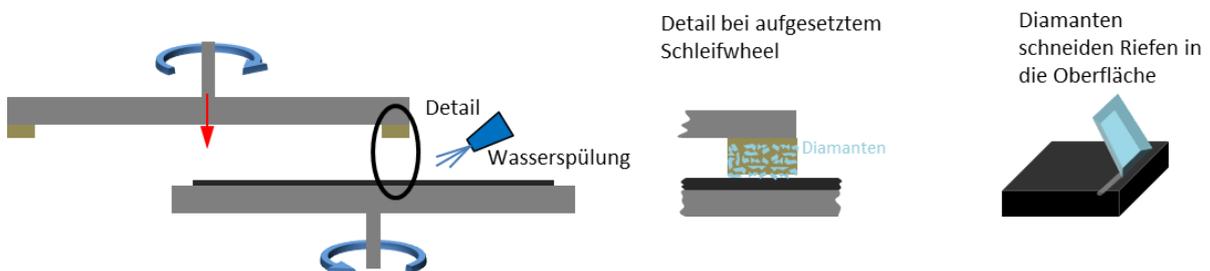


Abbildung 60 Prinzip Waferschleifen

7.2.5 Fotostrukturierung von Glas

Das fotostrukturierbare Glas ist ein Glas, das durch nasschemische Ätzung mit Flusssäure ohne abgeschiedene Hartmaske strukturiert werden kann. Für diese Art der Strukturierung werden spezielle Gläser wie z.B. Foturan der Schott AG benötigt. Die Zusammensetzung und einige Eigenschaften eines solchen Glases sind in

Tabelle 12-7 gegeben. Bei dem Foturanglas sind neben den Hauptbestandteilen vor allem die Beimengungen Ag_2O , Sb_2O_3 und CeO_2 von Interesse. Durch das Sb_2O_3 wird bei der Produktion von Foturan die kristallchemische 3^+ Wertigkeit des Cerions stabilisiert, wodurch es später bei der Belichtung bei einer Wellenlänge von ca. 310 nm Licht absorbiert. Durch diese absorbierte Energie kann das Cerion ein Elektron abgeben und in die stabilere 4^+ Wertigkeit übergehen. Das abgespaltene Elektron reduziert das Ag^+ Ion. Durch diese Silberatome ist die bei der Belichtung abgebildete Struktur latent im Glas gespeichert. Im nachfolgenden Temperaturprozess (ca. 500°C , 1h) dienen die Silberatome als Kristallisationskeime für die bei höheren Temperaturen (ca. 600°C , 1h) entstehenden Lithiummetasilikatkristalle. Durch diese Lithiummetasilikatkristalle kristallisiert der gesamte belichtete Bereich aus (Glaskeramik), während die nicht belichteten Bereiche im amorphen Glaszustand verbleiben. Bei einer anschließenden Ätzung ist die Ätzrate in den polykristallinen (belichteten) Bereichen deutlich höher als in den amorphen (unbelichteten)

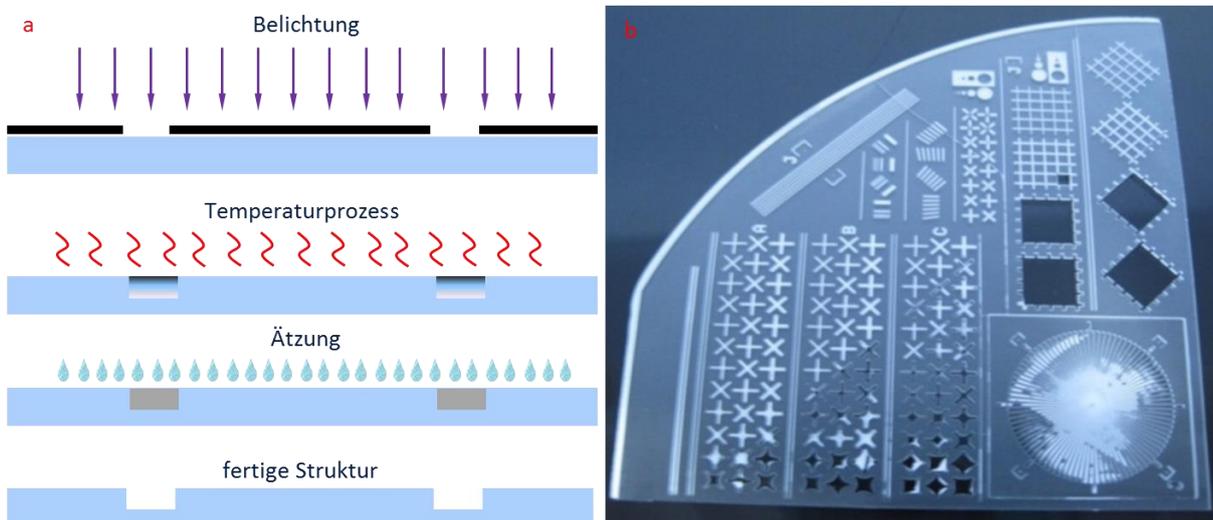


Abbildung 61 Foturan a) Herstellungsprozess, b) erzeugte Testätzung [36]

Bereichen. Bei einer Ätzung mit einer 10% Flußsäure wird beispielsweise eine Selektivität von 20:1 erreicht werden. Der prinzipielle Herstellungsprozess (a) und eine im Labor erzeugte Versuchsätzung mit Teststrukturen (b) sind in Abbildung 61 dargestellt.

Der Nachteil der so erzeugten Strukturen ist, dass sehr feine Strukturen durch diese Methode nicht hergestellt werden können, da die Lithiummetasilikatkristalle eine deutlich geringere Ätzrate als das kristallisierte Glas hat. Eine weiter interessante Möglichkeit, die sich durch fotostrukturierbare Gläser erschließt, ist, die Belichtung über gekreuzte Laserstrahlen durchzuführen. Die benötigte Intensität ist dabei nur im Kreuzungspunkt hoch genug um den Prozess auszulösen, wodurch auch vergrabene Strukturen erzeugt werden können.

Für die Herstellung der in Glas gefassten flüssigkeitsgekühlten Leistungshalbleiter am Testsystem wurden die fotostrukturierbaren Gläser nicht verwendet, da diese Gläser deutlich teurer sind als die Borofloatgläser. [1], [23] , [28]

7.3 CVD - Chemical Vapour Deposition

Bei den CVD Verfahren handelt es sich um chemische Gasphasen- abscheidungsprozesse. Durch eine Reaktion der gasförmigen Ausgangsverbindungen (Precursor) werden eine feste und eine gasförmige Phase auf der Produktseite erzeugt. Die üblichen Unterteilungen

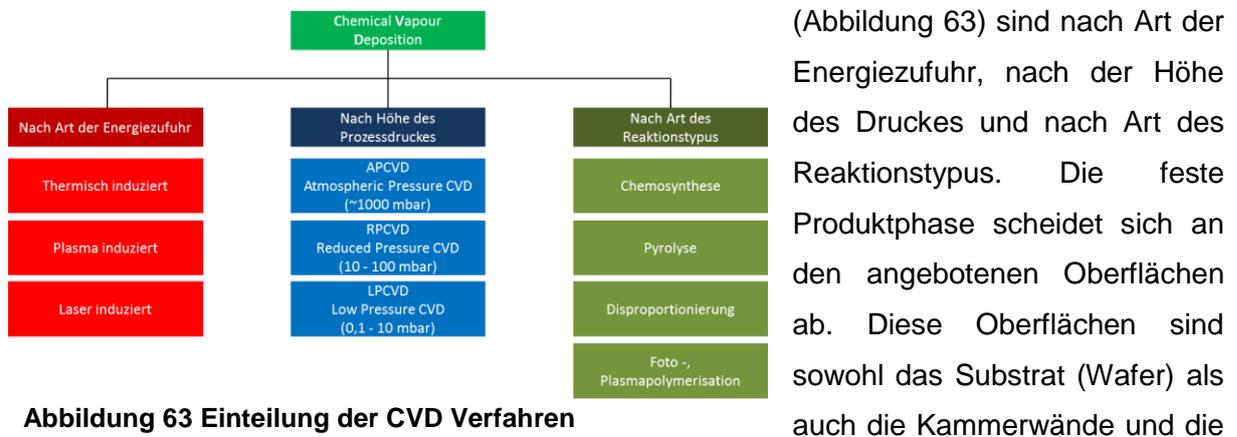


Abbildung 63 Einteilung der CVD Verfahren

(Abbildung 63) sind nach Art der Energiezufuhr, nach der Höhe des Druckes und nach Art des Reaktionstypus. Die feste Produktphase scheidet sich an den angebotenen Oberflächen ab. Diese Oberflächen sind sowohl das Substrat (Wafer) als auch die Kammerwände und die Oberflächen aller Einbauten. Die Qualität der so abgeschiedenen Schichten hängt vor allem davon ab, dass die Feststoffe keine Aggregate bilden, bevor sie sich an den Oberflächen abscheiden. Es ist daher von Vorteil wenn die Bildung des Feststoffes oberflächennah abläuft, dies wird durch geringe Drücke der Gasphase und durch Zufuhr von Energie an der Substratoberfläche begünstigt. Diese Energien können in Form von thermischer Energie, Strahlungsenergie (z.B. Licht) oder durch Plasmaaktivierung zugeführt werden. Thermisch

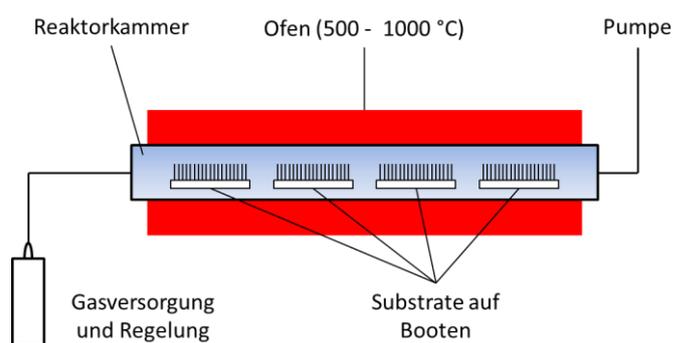


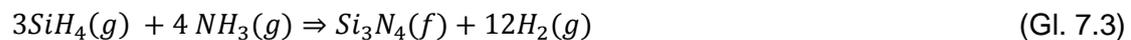
Abbildung 62 Thermisch induziertes CVD (Ofenprozess) [1]

induzierte CVD-Verfahren sind beispielsweise Ofenprozesse, bei denen die Reaktionskammer durch den Innenraum eines Ofens gebildet wird in dem der Precursor über eine Gasversorgung bereitgestellt wird und der Prozessdruck über eine Pumpe gehalten wird (Abbildung 62).

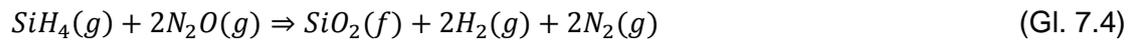
Die Reaktionen bei einem CVD Abscheidungsprozess sind vielfältig, aber es kann zwischen 4 prinzipiellen Reaktionstypen unterschieden werden.

- Chemosynthese:

Bei der Chemosynthese werden über Redoxreaktionen flüchtige und nicht flüchtige Produkte gebildet. Die festen Produkte werden an der Oberfläche abgeschieden. Die gasförmigen Produkte werden nicht in die Schicht eingebaut und werden über eine Pumpe abgesaugt, die auch den Prozessdruck sicherstellt. Die Edukte werden der Kammer über eine Gasversorgung zur Verfügung gestellt. Beispiele für solche Redoxreaktionen sind die Bildung von Karbiden (Gl. 7.2), Nitriden (Gl. 7.3) oder Oxiden (Gl. 7.4).



in LPCVD -Verfahren typische Substrattemperaturen 800 – 900°C



- Pyrolyse

Bei der Pyrolyse werden die Precursor-Verbindungen thermisch aufgespalten. Die dabei entstehenden festen Verbindungsbruchstücke werden wieder an den Oberflächen abgeschieden, und die gasförmigen Verbindungsbruchstücke werden aus der Prozesskammer abgesaugt. Eine typische Anwendung für einen solchen Prozess ist eine LPCVD – Polysiliziumabscheidung, wie sie für die Hartmaskenerstellung für eine nasschemische Glasstrukturierung wie in Kapitel 6.2.1 benötigt wird. Die Reaktionsgleichung einer solchen LPCVD – Polysiliziumabscheidung ist in (Gl. 6.1) angegeben. Dieser Prozess findet bei Substrattemperaturen von ca. 500 - 650°C statt und wird typischerweise in einem Ofen (Abbildung 62) durchgeführt.

- Disproportionierung

Bei der Disproportionierung wird das Precursorgas abgekühlt, wodurch ein Zerfall (bei speziellen Gasen) in flüchtige und nicht flüchtige Phasen eintritt. Ein Gas, das sich zu Beginn des Verfahrens auf einem hohen Temperaturniveau befunden hat, kann so durch die Abkühlung eine Schicht der nicht flüchtigen Komponenten auf dem Substrat bilden. Ein Beispiel für so eine Disproportionierungsreaktion ist die CVD-Abscheidung von Germanium nach (Gl. 7.5).



- Foto-, Plasmapolymerisation

Bei der Foto- oder bei der Plasmapolymerisation werden bei gasförmigen Monomeren durch Absorption von Lichtquanten (Fotopolymerisation) oder durch Elektronenstöße (Plasmapolymerisation) freie Bindungen erzeugt die durch Vernetzung der Monomere zu polymerartigen Abscheidungen am Substrat führen. Diese polymerartigen Schichten können je nach Art des Precursors und Anregungsmechanismus hohe Konzentrationen an Halogenen, Stickstoff oder Wasserstoff enthalten. Mit dieser Methode ist es aber auch möglich Schichten aus diamantartigen Kohlenstoff (DLC...Diamond Like Carbon) oder quarzartigem Siliziumdioxid zu erzeugen.

Um eine CVD – Abscheidung erfolgreich durchführen zu können, müssen eine Reihe von Prozesssequenzen durchfahren werden.

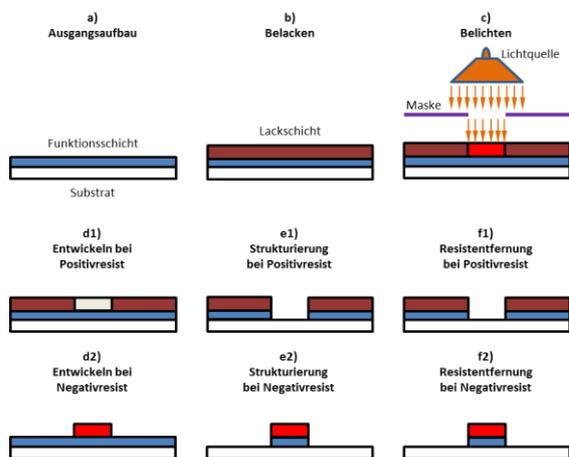
- Transport der Edukte an die Substratoberfläche (Diffusion)
- Adsorption der Edukte an der Substratoberfläche (z.B. Aufnahme der Kondensationsenergie in Form von thermischer Energie durch das Substrat)
- Oberflächenvorgänge am Substrat (Diffusion, chemische Reaktion, Gittereinbau)
- Desorption und Abtransport von der Substratoberfläche der flüchtigen Bestandteile (Diffusion)

Die Wachstumsrate der Schicht wird dabei von der langsamsten Teilsequenz bestimmt. Der Gesamtprozess kann somit diffusions- oder reaktionsbegrenzt sein. [1], [29]

7.4 Lithographische Fertigungsprozesse

Mit der Lithographie ist es möglich eine Maske für eine Ätzung oder Implantationen schnell

und mit hoher Wiederholgenauigkeit herzustellen. Jeder lithographische Fertigungsprozess besteht im Prinzip aus mehreren Basisschritten (dargestellt in Abbildung 64):



- Belackern (mit positiv oder negativ Lack)
- Belichten
- Entwickeln
- Strukturierungsverfahren
- Resist Entfernung

Abbildung 64 Prinzip Lithographie [1], [2]

Wie in aus Abbildung 64 ersichtlich ist, gibt es die Möglichkeit Positiv- und Negativ-Lacke zu verwenden.

- Positivlack: belichtete Lackbereiche werden durch die Entwicklung entfernt
- Negativlack: unbelichtete Lackbereiche werden durch die Entwicklung entfernt

Die Strukturierungsverfahren nehmen eine Sonderstellung bei der Lithographie ein, da sie eigenständige Prozessblöcke in der Fertigung darstellen und nicht zur eigentlichen Lithographie zählen. Die Lithographie dient dazu Masken in hoher Genauigkeit für diese Strukturierungsverfahren herzustellen. Die Wafer kommen nach der Strukturierung wieder zurück in den Lithographieprozessblock zur Resistentfernung. Einige dieser Strukturierungsvarianten stellen aufgrund von speziellen Randbedingungen (z.B. Temperaturen $>200^{\circ}\text{C}$ oder aggressive Medien gegenüber dem Lack) eine besondere Herausforderung dar. Diese Randbedingungen können oft durch den Einsatz von Hartmasken (z.B. aus Siliziumoxid, Siliziumnitrid oder Siliziumcarbid) erfüllt werden. Bei dem Einsatz von Hartmasken wird die Lithografie dazu verwendet, eine dünne Schicht aus einem Material, das die Randbedingungen erfüllen kann, zu strukturieren und diese strukturierte Hartmaske wird dann als Maske für die eigentliche Strukturierung verwendet. Einige mögliche Strukturierungsvarianten, die durch Lithographie bzw. Lithographie mit Einsatz von Hartmasken ermöglicht werden, sind in Abbildung 65 dargestellt. [1], [2]

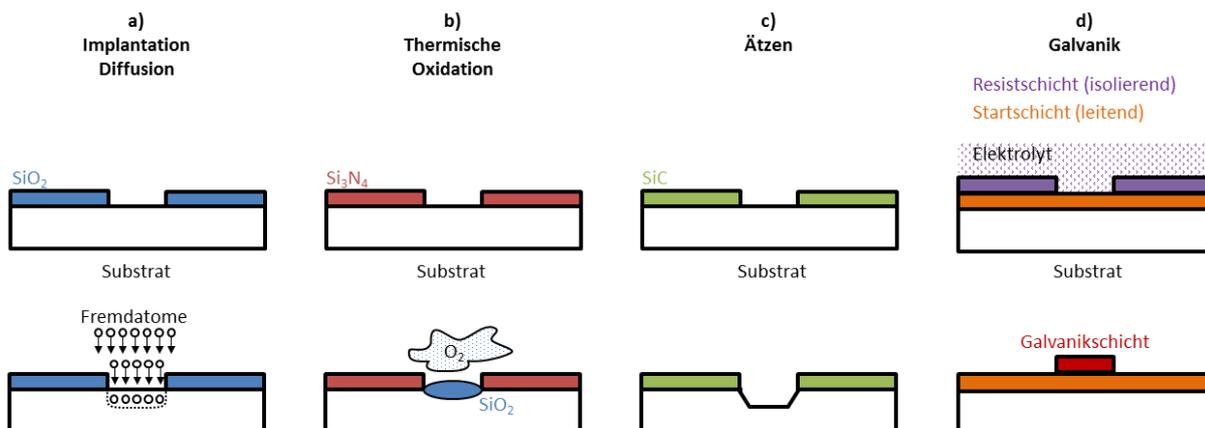


Abbildung 65 Anwendungen von Lithographie zur Strukturierung [1]

7.4.1 Belackung

Die Belackung besteht aus drei grundlegenden Prozesssequenzen:

- Reinigung des Substrates und Aufbringen eines Haftvermittlers
- Lackauftrag
- Härten des Lackes (wird als "soft bake" oder "pre exposure bake" bezeichnet)

Für die Reinigung des Substrates ohne spezielle Anforderungen reicht meist ein Spülen mit Aceton, um organische Verunreinigungen zu lösen, gefolgt von einem Spülen mit Isopropanol, um Verunreinigungen durch das zuvor benutzte Aceton zu beseitigen. Bei höheren Anforderungen an die Reinigung kommen je nach Anforderung und Verunreinigung die in Kapitel 7.1 beschriebenen Verfahren zum Einsatz. Haftvermittler kommen zum Einsatz, um die Waferoberfläche zu hydrophobieren da die Waferoberflächen nach der

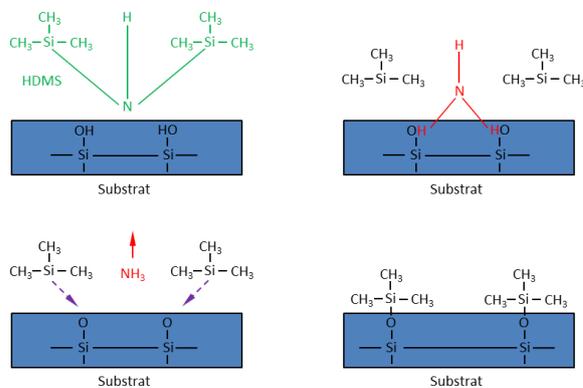


Abbildung 66 Funktionsweise HDMS als Haftvermittler [38]

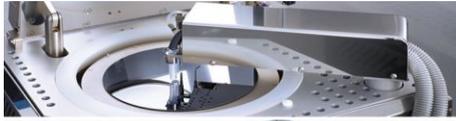
zu zwei $\text{Si}(\text{CH}_3)_3$ -gruppen (Trimethylsiliziumgruppen) und NH_3 Ammoniak wodurch die Wasserstoff- und/oder Hydroxidionen von der Substratoberfläche entfernt werden (dargestellt in Abbildung 66).

Der Lackauftrag erfolgt meist durch Spin- oder Spray- Belackung, die in den folgenden Unterkapiteln näher betrachtet werden.

Der "soft bake" oder "pre exposure bake" dient dazu den Fotolack zu stabilisieren es wird ein Großteil des Lösungsmittels ausgetrieben und somit der vorher flüssige Fotolack verfestigt. Nach dieser Prozesssequenz verbleiben noch ca 5 – 20% des Lösungsmittels im Fotolack, aber er ist stabil genug um die Belichtung (bzw. genauer das Handling für die Belichtung) zu überstehen. [2], [25]

7.4.1.1 Spin-Belackung

Die Spin Belackung ist das am weitesten verbreitete Verfahren zum Auftrag einer



Lackschicht auf einen Wafer in der Halbleiterindustrie.

Dabei erfolgt die Aufbringung des Lackes auf der

Wafermitte, und der Lack wird durch Zentrifugalkräfte,

die durch eine Rotationsbewegung des Wafers

hervorgerufen werden, über den Wafer verteilt. So wird

eine homogene Schicht auf den Wafer aufgetragen und

überschüssiger Lack wird über den Rand

abgeschleudert (siehe Abbildung 108). Die Dicke der

aufgebrachten Lackschicht ist dabei vor allem von der

Viskosität des Lackes und von der

Rotationsgeschwindigkeit des Wafers abhängig. Eine

typische Anlage ist in Abbildung 67 dargestellt. Eine

solche Anlage wird auch für die in Kapitel 7.7.5.3 beschriebenen Spin Verfahren zum Auftrag von Klebstoffen verwendet.



Abbildung 67 Spin Belacker von Süss MicroTec AG [64]

7.4.1.2 Spray-Belackung

Die Spray Belackung ist ein alternativ Verfahren zum Spin Belacken. Sie wird vor allem dann



verwendet, wenn eine Spin Belackung aufgrund einer

zu hohen Topologie am Wafer nicht möglich ist. Bei der

Spray Belackung wird der Lack mit einem Gas (z.B.

Stickstoff) zu einem Aerosol gemischt und auf den

Wafer gesprüht. Um eine gute Homogenität der

aufgebrachten Lackschicht zu erreichen, rotiert auch bei

diesem Verfahren der Wafer um seine eigene Achse

(Abbildung 109). Der große Vorteil dieses Verfahrens

ist, dass der Lack nicht über die Waferoberfläche fließen

muss wo durch Topologie unterschiede Staupunkte

entstehen können die in weiterer Folge zu Lackspitzen

führen. Dies sind Bereiche, in denen der Lack deutlich dünner als am übrigen Wafer ist, oder sogar gänzlich unbelackte Bereiche entstehen. Eine typische Anlage ist in Abbildung 68 dargestellt. Eine solche Anlage wird auch für die in Kapitel 7.7.5.4 beschriebenen Spray

Verfahren zum Auftrag von Klebstoffen verwendet.



Abbildung 68 Spray Belacker von Süss MicroTec AG [64]

7.4.2 Belichtung

Die Belichtung ist ein Standardverfahren in der Halbleiterindustrie, bei der die gewünschten Bereiche auf einem Wafer einer Belichtungsquelle ausgesetzt werden. Dies kann durch unterschiedliche Verfahren erreicht werden. Die am häufigsten eingesetzten Verfahren sind Maskenverfahren, bei denen der Wafer einer Lichtquelle ausgesetzt wird und durch eine Maske Bereiche abgeschattet werden. Aber für kleine Stückzahlen können auch Verfahren eingesetzt werden, bei denen ein maskenloses Direktbelichten (direktschreiben) durch einen Laser betrieben wird. Durch optische Verfahren ohne aufwendige Anlagenkonzepte können bei der UV – Belichtung Auflösungen bis zu $0,1\ \mu\text{m}$ erreicht werden. Die daraus resultierende geometrische Unschärfe entspricht ca. der Wellenlänge der Lichtquelle und diese beträgt bei UV ca. $0,2 - 0,5\ \mu\text{m}$. Durch geeignete jedoch sehr aufwendige und teure Anlagenkonzepte ist es heute möglich deutlich geringere Strukturgrößen zu erzeugen (z.B. $28\ \text{nm}$). Die Belichtung wird hierbei mit deutlich geringeren Wellenlängen durchgeführt. [1], [2]

7.4.2.1 UV - Belichtung

Bei optischen UV – Belichtungsverfahren kann Grundsätzlich in drei Verfahren zur Erzeugung des Abbilds mittels einer Maske unterschieden werden (Abbildung 69).

- Kontaktbelichtung (Abbildung 69 a)
- Proximitybelichtung (Abbildung 69 b)
- Projektionsbelichtung (Abbildung 69 c)

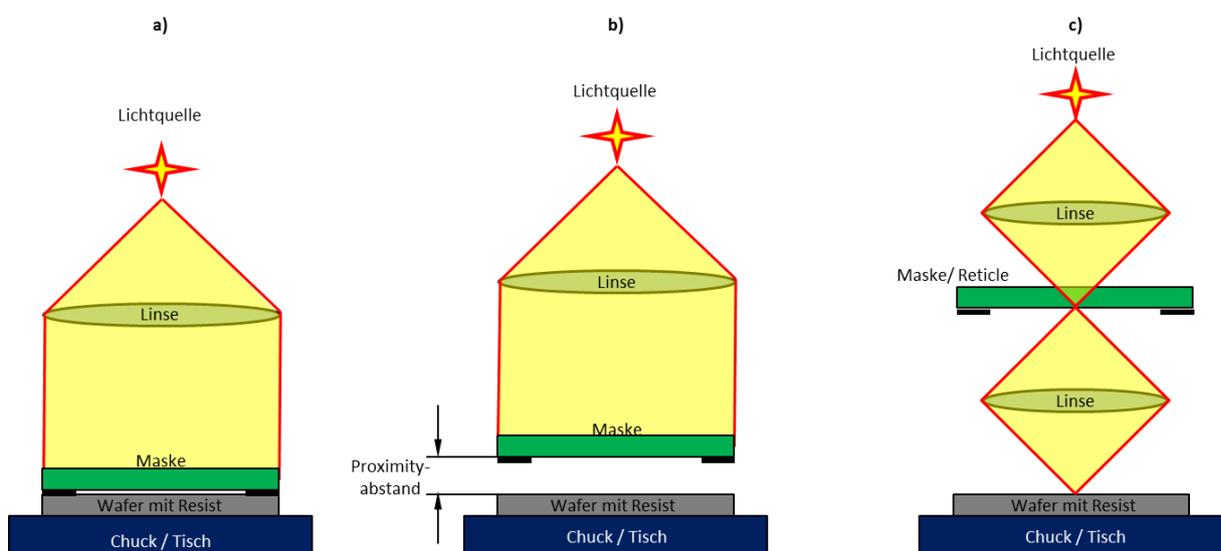


Abbildung 69 Optische Belichtungsverfahren a) Kontaktbelichtung, b) Proximitybelichtung und c) Projektionsbelichtung [1], [2]

Die Kontaktbelichtung ist ein Verfahren, bei dem die Fotomaske in direktem Kontakt mit dem Fotolack beschichteten Kontakt steht, hierbei werden Anpressdrücke zwischen 50 – 300 mbar eingesetzt. Durch diese Berührung werden allerdings Defekte generiert, weshalb das Verfahren nur bei sehr kleinen Chipgrößen eingesetzt wird (durch die Defektdichte wird die maximale Chipgröße begrenzt). Die Auflösung ist bei diesem Verfahren sehr gut (ca. 1µm), jedoch kann durch einen inhomogenen Kontakt die Auflösung über den gesamten Wafer stark variieren. Mit optimierten Anlagen ist es sogar gelungen bei UV-Strahlungswellenlängen von 0,2 µm Strukturen mit 0,25 µm zu realisieren. Aufgrund der Absorption ist es jedoch bei solchen Anlagen bzw. kleinen Strukturen notwendig Maskengrundmaterial zu wechseln. Es bieten sich hier anstatt der sonst üblichen Borsilikatgläser Materialien wie Quarzglas oder Aluminiumoxidglas an.

Bei der Proximitybelichtung befindet sich die Maske in einem definierten Abstand (üblicherweise 10 – 50 µm) über dem Substrat. Durch diesen Abstand zum Wafer kann die Defektdichte deutlich reduziert werden allerdings nimmt die Auflösung durch Beugungsphänomene ab. Je größer der Proximityabstand der Maske ist, umso größer ist die Auswirkung der Beugung. Aus diesem Grund sollte der Abstand möglichst gering gewählt werden, jedoch sind hier mechanisch Grenzen gesetzt. Da man sonst Gefahr läuft den mit Fotolack beschichteten Wafer zu kontaktieren und somit die Defektdichte wieder höher wäre (Kontaktbelichtung).

Bei der Projektionsbelichtung wird die Maske in ein Linsensystem eingeschoben. Durch diesen Aufbau (dargestellt in Abbildung 69c) ist es möglich eine verkleinernde Projektion der Maske (eine solche Maske wird als "reticle" bezeichnet) auf den mit Fotolack beschichteten Wafer zu projizieren wodurch die Genauigkeit erhöht wird. Der Nachteil einer solchen verkleinernden Projektion ist, dass nicht mehr der ganze Wafer in einem Schritt belichtet wird. Es ist notwendig den Wafer abzurasten und einzelne "shots" auf den Wafer zu belichten. Diese einzelnen belichteten Bereiche müssen jedoch dann wieder zueinander justiert werden. Ein solches Verfahren wird als "step and repeat" bezeichnet. Bei Projektionsbelichtung können sehr gute Auflösungen geringe Defektdichten erzielt werden im Vergleich zu den anderen optischen Verfahren siehe Tabelle 12-8.

Bei allen beschriebenen Belichtungsverfahren wirkt sich eine Planarisierung des Wafers um Profilininhomogenitäten (z.B. durch CMP zu verringern) vor der Belackung positiv auf die erreichbare Auflösung aus. Jedes dieser Belichtungsverfahren hat seine Vor- und Nachteile die in

Tabelle 12-9 kurz zusammengefasst werden. Eine sorgfältige Auswahl des geeigneten Belichtungsverfahrens ist notwendig, da es sich bei der Belichtung um ein produktionskritisches Verfahren handelt und nur so die gewünschten Ergebnisse hinsichtlich Genauigkeit und Defektdichte erzielt werden können [1], [2]

7.4.2.2 LDI – Laser Direct Imaging

Das LDI (Laser Direct Imaging) ist ein maskenloses Belichtungsverfahren. Die Belichtung

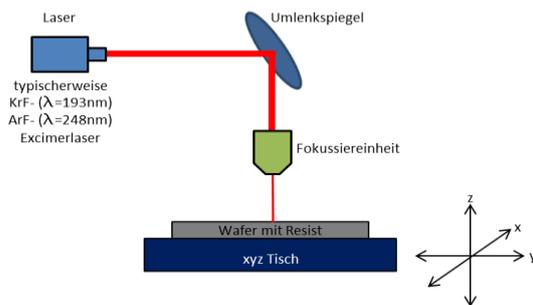


Abbildung 70 Prinzip Laser Direct Imaging

wird typischerweise mit einem fokussierten Laserstrahl aus einem Excimerlaser (Gaslaser) mit Eximeren KrF (Kryptonfluorid) oder ArF (Argonfluorid) durchgeführt. Durch Bewegung des Tisches kann somit ein Muster auf den mit Fotolack beschichteten Wafer geschrieben werden. Der große Vorteil eines solchen Verfahrens ist, dass keine

Masken für ein solches Verfahren benötigt werden, da jedoch der gesamte Wafer abgerastert werden muss, ist die Prozesszeit deutlich höher als bei Masken oder Reticle Verfahren. Auch bei Reticle Verfahren ist der mit einem Schuss belichtete Bereich deutlich größer, da bei einem LDI Verfahren nur ein Bereich in Größe des Laserstrahldurchmessers direkt belichtet wird. Ein solches Verfahren wird daher hauptsächlich in der Entwicklung eingesetzt, wo nur geringe Wafer-Stückzahlen und häufige Layout-Änderungen benötigt werden und somit eine Maskenanfertigung nicht rentabel wäre. [1], [2]

7.4.3 Entwickeln

Die Entwicklung ist jener Prozessschritt, bei dem der Fotolack in den gewünschten Bereichen entfernt wird. Das sind bei einem positiv Fotolack die Bereiche, die belichtet und bei einem negativ Fotolack jene Bereiche, die nicht belichtet wurden. Die hierfür benutzten Lösungen sind vielfältig und müssen auf den Fotolack und auf die Schichtmaterialien unter dem Fotolack abgestimmt sein. Die Aufbringung der Entwicklerlösung wird meist mit den



Abbildung 71 Waferhorde mit 25 Wafern [65]

vorhandenen Belackungsanlagen durchgeführt. Grundsätzlich werden 3 in der Halbleiterindustrie übliche Verfahren zur Entwicklung genutzt.

- Tauchentwicklung
- Spin-Entwicklung
- Spray-Entwicklung

Die Tauchentwicklung ist ein Verfahren bei dem eine komplette Horde im Normalfall bestückt mit 25 Wafern (Abbildung 71) in ein temperiertes Becken gefüllt mit der Entwicklerlösung für ca. 20 – 120 s getaucht wird. Die Horde wird während dieses Tauchvorgangs ständig bewegt oder das Becken wird von der Entwicklerlösung durchströmt. Das ist der große Vorteil dieses Tauchverfahrens gegenüber den anderen Entwicklungsverfahren, da diese Art der Entwicklung einen Batchprozess darstellt und somit auf den Einzelwafer gesehen sehr kostengünstig ist. Jedoch können Spin- und Spray-Entwickler kleinere Strukturen freilegen und die Gefahr von Querkontamination über die Entwicklerlösung ist geringer.

Spin- und Spray-Entwickler funktionieren, wie bereits bei der Lackaufbringung in den Kapiteln 7.4.1.1 (Spin) und 7.4.1.2 (Spray) beschrieben, allerdings mit deutlich geringeren Drehzahlen und einer Stillstands Phase. Die Entwicklung benötigt jedoch die 20 – 120 s je nach Fotolackart pro Wafer. Die Vorteile dieser Verfahren sind die Möglichkeit, kleinste Strukturen freilegen zu können und Verhinderung von Verunreinigung über die Entwicklerlösung, da diese ständig erneuert wird und ein geringerer Chemikalienverbrauch.

Alle drei Verfahren benötigen nach der eigentlichen Entwicklung einen Spül- und Trocknungsprozess. Zur vollständigen Aushärtung des auf dem Wafer verbleibenden Fotolacks sowie zur Entfernung etwaiger Entwicklerlösungs- und Wasserreste wird nach dem Entwickeln ein sogenannter "hardbake" in einem Ofen als Batchprozess bei ca. 100 – 120°C für ca. 60 min durchgeführt. [1], [25], [21]

7.5 Trockenätzprozesse

Die Trockenätzprozesse können in drei Gruppen von Prozessen nach Art des Abtrages unterteilt werden.

- Chemisches Trockenätzen
- Physikalisches Trockenätzen
- Chemisch-Physikalisches Trockenätzen (Kombinationsprozess)

Die Trockenätzprozesse sind Prozesse, die nicht Ätzlösungen sondern mit Gase zum Ätzen verwenden. Dies hat den Vorteil, dass keine flüssigen Reste einer Ätzlösung auf dem Wafer nach dem Ätzprozess verbleiben können. Die wichtigsten Parameter für solche Prozesse sind die Wahl des Prozessgases, Druck, Temperatur und die über die elektrischen Felder eingebrachte Hochfrequenzleistung (typische Frequenzen: 100-400 kHz, 13.56 MHz, 915 MHz und 2.45 GHz). Der Druck ist vor allem deshalb wichtig, um die mittlere freie Weglänge

im Gas (auf mm oder cm Bereich) zu reduzieren, hierbei sind Drücke von ca. 1 - 100 Pa typisch.

Die chemischen Trockenätzverfahren beruhen auf der Ätzung mittels einer chemischen Reaktion. Bei diesen Verfahren wird das Prozessgas über elektrische Felder in ein Plasma übergeführt. Dieses so aktivierte Prozessgas reagiert mit dem abzutragenden Material

Ätzprofil chemische Trockenätzung



Abbildung 72 Ätzprofil chemischer Trockenätzprozess [2]

wieder zu einem Produktgas das über Vakuum Pumpen (die auch den niedrigen Prozessdruck halten) abgesaugt wird. Da der Materialabtrag rein chemisch erfolgt ist dies ein Isotroper Ätzprozess und führt dadurch zu Unterätzungen (dargestellt in Abbildung 72).

Der physikalische Trockenätzprozess beruht auf einem physikalischen Materialabtrag. Hierbei wird ein Edelgas (oder ein Inertgas) mittels elektrischer Hochfrequenzfelder in Ionen aufgespalten, welche in Richtung des Substrates beschleunigt werden. Diese beschleunigten

Ätzprofil physikalische Trockenätzung



Abbildung 73 Ätzprofil physikalischer Trockenätzprozess [2]

Ionen brechen nun beim Aufprall auf das zu ätzende Material Atome bzw. Moleküle aus dem Verbund. Es werden keine chemischen Bindungen vom Prozessgas (bzw. Reaktionsgas) und dem abtragenden oder abgetragenen Material eingegangen; so verbleibt der abgetragene Feststoff in der

Prozesskammer und lagert sich an den vorhandenen Oberflächen ab. Da diese physikalische Abtrag ein gerichteter Prozess ist, spricht man von einer anisotropen Ätzung. Dies bedeutet, es findet keine Unterätzung der Hartmaske statt. Allerdings wird bei diesem Prozess jedes Material angegriffen (mit unterschiedlich hohen Ätzraten), das sich in der Schussbahn der beschleunigten Ionen befindet. Wodurch Ätzprofile wie in Abbildung 73 dargestellt entstehen.

Bei einem chemisch physikalischen Kombinationsprozess wird das Prozessgas wieder wie

Ätzprofil chemisch- physikalische Trockenätzung



Abbildung 74 Ätzprofil chemisch physikalischer Trockenätzprozess [2]

beim chemischen Trockenätzen wieder in Reaktive Ionen zerlegt, die dann Richtung Substrat beschleunigt werden. Allerdings wird die Beschleunigung so gering gewählt, dass die Aufprallenergie die nicht zu ätzenden Schichten kaum beschädigt der chemische Ätzangriff ist

auf Grund der kürzeren Dauer und der gerichteten Bewegung der Reaktiven Edukte an den Flanken stark unterdrückt wodurch sich nahezu gerade Flanken erreichen lassen (dargestellt in Abbildung 74). Durch die Reaktion werden die abgetragenen Feststoffe wieder in gasförmige Produkte übergeführt, die wieder über Vakuumpumpen abgesaugt werden. Dadurch kommt es zu keinen Ablagerungen in der Prozesskammer.

Der große Vorteil eines rein chemischen Trockenprozesses ist die Möglichkeit einen solchen Prozess als Batchprozess durchzuführen, wodurch die Prozesskosten weit geringer sind. Der Vorteil der beiden anderen Prozesse liegt in der Anisotropie des Ätzprozesses. [1], [2], [21]

7.5.1 Plasmaätzen

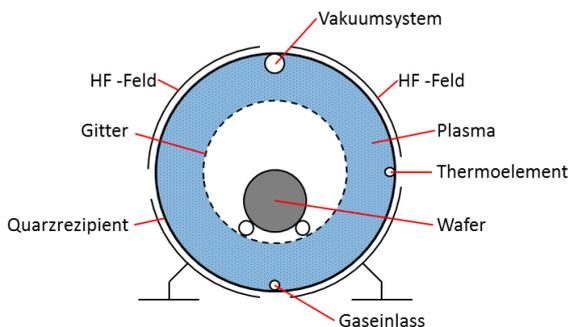


Abbildung 75 Aufbau Barrelreaktor für Plasmaätzprozess [26]

Beim Plasmaätzen wird ein Prozessgas durch ein elektrisches Wechselfeld zur Dissoziation gebracht, wodurch ein aktiviertes Prozessgas entsteht. Dieses aktivierte Prozessgas mit aggressiven Radikalen kann nun mit der zu ätzenden Schicht reagieren, wobei gasförmige Produkte entstehen. Eine solche Plasmaätzung entspricht den bereits beschriebenen chemischen

Trockenätzprozessen. Ein Anwendungsfall

eines solchen Plasmaätzverfahrens ist die Ätzung von Silizium in einem Barrelreaktor (Abbildung 75) zur Strukturierung einer Siliziumhartmaske. Der Barrelreaktor kann in zwei Bereiche aufgeteilt werden. Der Plasmabereich, in dem über die Hochfrequenzenwechselfelder die Dissoziation des Prozessgases stattfindet, und die eigentliche Reaktionskammer, die durch ein Gitter vom Plasmabereich getrennt ist. Dieses Gitter dient dazu geladene Teilchen abzufangen und nur neutrale Radikale in die Reaktionskammer zu lassen um Beschädigungen am Wafer durch physikalischen Abtrag zu verhindern. Ein typisches Prozessgas für eine Siliziumätzung wäre CF_4 (Tetrafluormethan), und die dazugehörige Dissoziation ist in (Gl. 7.6) beschrieben.



Die eigentliche Ätzung findet dann im Reaktionsbereich statt, bei dem die Flourradikale mit dem Silizium zu SiF_4 (Siliziumtetrafluorid) reagieren (Gl. 7.7). Siliziumtetrafluorid ist bereits

bei Raumtemperatur flüchtig und wird über das Vakuumsystem aus der Kammer gepumpt. Die Ätzung ist eine chemische, daher entspricht das Ätzprofil einer isotropen Ätzung.



Dies muss bei bereits bei der Belichtungsmaske berücksichtigt werden, da die Unterätzung kompensiert werden muss. Daher muss der belichtete Bereich um die Dicke der geätzten Schicht kleiner sein als das gewünschte Maß nach der Ätzung. [1], [2], [21]

7.6 Metallisierungsverfahren

Die Metallisierungsverfahren sind Verfahren bei denen eine Metallschicht auf einem Substrat abgeschieden wird.

7.6.1 Bedampfung

Bei der Bedampfung wird ein Metall in einer Vakuumkammer durch Energiezufuhr zum Verdampfen gebracht; dieser Dampf steigt auf und kondensiert an den Substraten. Die Bedampfung an sich kann in 3 Prozessphasen unterteilt werden

- Teilchenerzeugung
- Teilchentransport zum Substrat
- Kondensation der Teilchen an der Substratoberfläche

Das Prinzip einer Elektronenstrahl-Bedampfungsanlage ist in Abbildung 76 dargestellt. Die

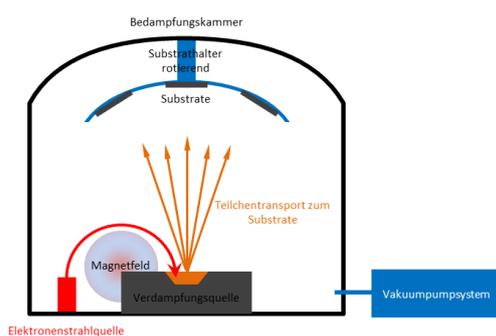


Abbildung 76 Prinzip Elektronenstrahl Bedampfungsanlage

Teilchenerzeugung erfolgt durch einen Elektronenstrahl, der durch ein Magnetfeld auf die Verdampfungsquelle gelenkt wird, wobei die Energiezufuhr nicht über einen Elektronenstrahl erfolgen muss, sondern auch über z.B. eine Widerstandsheizung erfolgen kann. Der Transport der Teilchen erfolgt über einen geradlinigen Weg von der Quelle aus. Die sogenannte Dampfkeule hängt von der Tiegelform, dem Temperaturprofil der

verdampften Masse und der geometrischen Form der verdampften Oberfläche ab. Von der Dampfkeule hängt auch die Schichthomogenität der erzeugten Schichten ab, die durch eine Rotation des Substrathalters noch verbessert werden kann. Die Kondensation der verdampften Teilchen am Substrat erfolgt über Nukleation, da die Bindungsenergie zum Substrat meist kleiner ist als die Kohäsionsenergie zu anderen Dampfteilchen. So diffundiert

das Dampfteilchen an der Substratoberfläche, bis es auf ein zweites Dampfteilchen, meist an Störstellen des Substrates, trifft, und es zu Inselbildungen kommt. Diese Inseln wachsen dann an bis es zu Koaleszenzen, dem Zusammenwachsen der Inseln, kommt und schließlich zu einer geschlossenen Schicht. Die Anlagen sind meist so aufgebaut, dass sich mehrere Verdampfungsquellen in der Prozesskammer befinden und somit ein Schichtstack aus mehreren Metallen erzeugt werden kann. [1]

7.6.2 Sputtern

Das Sputtern kann wie schon das Bedampfen in 3 Prozessphasen unterteilt werden.

- Die Teilchenerzeugung am Target
- Der Teilchentransport zum Substrat
- Die Teilchenabscheidung am Substrat

Durch das Anlegen einer Gleichspannung (Prinzip des Gleichspannungssputtern ist in

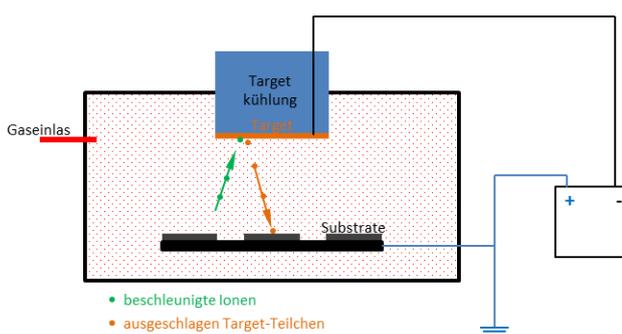


Abbildung 77 dargestellt) zwischen Target und Substraten wird eine Glimmentladung gezündet und die positiv geladenen Gasionen im Plasma in Richtung Target beschleunigt. Die beschleunigten Ionen schlagen am Target Metallteilchen aus der Oberfläche. Gegenüber der Bedampfung liegt der große Vorteil beim sputtern, dass nahezu beliebige

Abbildung 77 Prinzip einer DC Sputter- Anlage

Targetzusammensetzung bzw. Beschichtungszusammensetzungen vom Target auf das Substrat übertragen werden können. Durch den Stoß werden die Metallteilchen vom Target in Richtung Substrate geschleudert. Hierbei ist vor allem der Prozessdruck in der Prozesskammer maßgeblich, da die Teilchen durch elastische Stöße mit den Gasteilchen den größten Teil der kinetischen Energie abbauen. Daher sind geringe Prozessdrücke (typischerweise $p \sim 5 \cdot 10^{-2}$ mbar) und geringe Abstände zwischen Target und Substrat notwendig. Die Teilchen, die an den Substraten abgeschieden werden, haben typischerweise durch den kinetischen Impact auf der Substratoberfläche eine bessere Haftung auf der Oberfläche, allerdings geht damit auch eine stärkere Erwärmung der Substratoberfläche einher. Der zweite Nachteil dieser Abscheidungsmethode ist das durch den Sputtervorgang auch Gasmoleküle in die Schicht eingebaut werden. [1]

7.6.3 Galvanik – Elektrochemische Abscheidung

Die elektrochemische Abscheidung (ECD **E**lectro **C**hemical **D**eposition) von Metallen beruht auf der Elektrolyse. Elektrolyse wird ein Vorgang genannt, bei dem Gleichstrom in Elektrolyten eine chemische Reaktion einleitet und aufrechterhält. Diese Reaktionen an den Grenzflächen der Elektroden sind Reduktionsreaktionen an der Kathode und Oxidationsreaktionen an der Anode. Durch den Gleichstrom wird die Reaktionsrichtung aufrechterhalten. Die Reaktionen an Kathode, Anode und im Elektrolyten erfolgen gleichzeitig, da das Gleichgewicht der elektrischen Ladungen an jeder Stelle des Systems erhalten bleiben muss. Die Metallabscheidung an der Kathode folgt dabei der Reduktionsreaktion (Gl. 7.8)

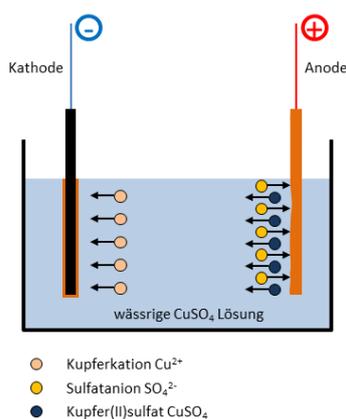


[22]

Die Verfahren, die bei der elektrochemischen Abscheidung zur Anwendung kommen, können in Verfahren mit löslicher Anode und Verfahren mit einer unlöslichen Anode unterteilt werden. [22]

7.6.3.1 ECD mit löslicher Anode

Die Vorgänge bei einer Abscheidung mit einer löslichen Anode werden am Beispiel einer Kupferabscheidung, wie in Abbildung 78, dargestellt erklärt.



Vorgänge im Elektrolyten:

Die wässrige Kupfersulfat-Lösung dissoziiert in positiv geladene Kupferkationen und in negativ geladenen Sulfatanionen siehe (Gl. 7.9). Durch das elektrische Feld im Elektrolyten werden die Kupferkationen von der negativ geladenen Kathode und die die Sulfatanionen von der positiv geladenen Anode angezogen.

Abbildung 78 ECD Kupfer mit löslicher Kupferanode [35]



[22]

Vorgänge an der Kathode:

An der Kathode werden die Kupferkationen unter Aufnahme von Elektronen zu metallischem Kupfer reduziert und somit an der Kathode abgeschieden (Gl. 7.10). Das Schichtwachstum ist bei richtig gewählter Stromdichte gleichmäßig, solange genügend Kupferkationen und genügend Elektronen an der gesamten Grenzfläche vorhanden sind. Daher ist eine gute Durchmischung des Elektrolyten erwünscht.



[22]

Vorgänge an der löslichen Kupferanode:

Das metallische Kupfer der Anode geht durch eine Oxidationsreaktion in Lösung (Gl. 7.11), während die zugehörigen Elektronen über den elektrischen Leiter sich in Richtung Kathode bewegen. Die Kupferanode löst sich auf und liefert so dem Elektrolyten die bei der Reduktionsreaktion verbrauchten Kupferkationen nach.



[22]

Die Anodenreaktion(Gl. 7.11) stellt somit die Rückreaktion der Kathodenreaktion (Gl. 7.10) dar. Durch eine einfache Umpolung könnte somit ein Umkehrung der Abscheiderichtung erreicht werden. Dies wird in der Praxis auch oft durchgeführt, allerdings nur für sehr kurze Zeiträume (kurze Pulse), um eine Reduktion von Fehlstellen im Schichtaufbau zu erzielen.

[22]

7.6.3.2 ECD mit unlöslicher Anode

Die Vorgänge bei einer Abscheidung mit einer unlöslichen Anode werden am Beispiel einer Kupferabscheidung mit einer Platin-Anode, wie in Abbildung 79 dargestellt, erklärt.

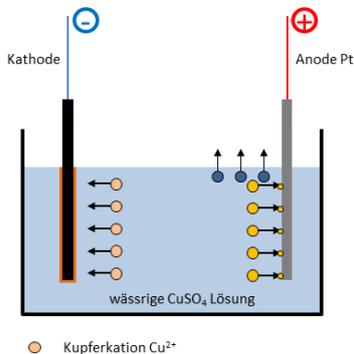


Abbildung 79 ECD Kupfer mit unlöslicher Platinanode [35]

Vorgänge im Elektrolyten:

Die wässrige Kupfersulfat-Lösung dissoziiert in positiv geladene Kupferkationen und in negativ geladenen Sulfatanionen (Gl. 7.9). Durch das elektrische Feld im Elektrolyten werden die Kupferkationen von der negativ geladenen Kathode und die die Sulfatanionen von der positiv geladenen Anode angezogen.

Vorgänge an der Kathode:

An der Kathode werden die Kupferkationen unter Aufnahme von Elektronen zu metallischem Kupfer reduziert und somit an der Kathode abgeschieden (Gl. 7.10). Das Schichtwachstum ist bei richtig gewählter Stromdichte gleichmäßig, solange genügend Kupferkationen und genügend Elektronen an der gesamten Grenzfläche vorhanden sind. Da durch die unlösliche Platinanode keine Kupferkationen nachgeliefert werden können verarmt die Lösung.

Vorgänge an der Anode:

Da die unlösliche Platinanode nicht wie die lösliche Kupferanode in Lösung geht und dadurch dem Stromkreis Elektronen zur Verfügung stellt, muss dies über andere Oxidationsreaktionen erfolgen. Die Bereitstellung der benötigten Elektronen erfolgt durch die Oxidationsreaktionen von Wasser (Gl. 7.12) und des Sulfatanions (Gl. 7.13).



[22]



[22]

Welche der beiden Reaktion bevorzugt abläuft hängt von der Konzentration des Elektrolyten ab. Das Peroxidsulfatanion zerfällt wiederum unter Bildung von Schwefeltrioxid und Sauerstoff in Sulfatanionen (Gl. 7.14).



[22]

Der gasförmige Sauerstoff entweicht aus dem Elektrolytbad und wird an die Umgebung abgegeben. Das Schwefeltrioxid reagiert mit dem Wasser aus dem Elektrolyten weiter zu Schwefelsäure (Gl. 7.15).



[22]

Die Lösung verarmt somit an Sulfatanionen und die Konzentration von Schwefelsäure in der Lösung nimmt zu. Im gesamten gesehen verarmt die Lösung also an Kupfer(II)sulfat und wird durch die steigende Konzentration an Schwefelsäure immer saurer. Dadurch muss das Elektrolytbad von Zeit zu Zeit getauscht werden. Die Häufigkeit der Badwechsel kann durch Zugabe von Kupfer(II)sulfat und Pufferlösungen (zur Stabilisierung des pH-Wertes) deutlich gesenkt werden. [22]

7.7 Verbindungstechniken

Wafer Verbindungsmethoden sind Methoden, durch die eine Form- oder Kraftschlüssige Verbindung zwischen zwei Wafern erzeugt werden kann. Für die Halbleitertechnik sind Methoden von Interesse, die zu temperaturstabilen, kraftschlüssigen Verbindungen führen. Eine besondere Stellung nehmen in der Halbleitertechnik die Trägertechniken ein. Bei reversiblen Trägertechniken ist es erwünscht, dass die Verbindung wieder gelöst werden kann. Dies wird oft durch eine Überhitzung der Verbindung erreicht. Bei Verbindungstechniken, die nicht als reversible Trägertechniken dienen sollen, ist die Temperaturstabilität ein Kriterium, da thermische Belastungen im Betrieb (meist Temperaturen $<200^{\circ}\text{C}$) die Verbindung in den meisten Fällen nicht lösen dürfen. Auch Prozesse, die nach dem Verbinden der Wafer stattfinden, können ein thermisches Kriterium für die Verbindung darstellen, wobei in diesen Fällen in der Regel eine höhere Temperatur erreicht wird, diese jedoch nur für einen bestimmten Zeitintervall (z.B. $>400^{\circ}\text{C}$ für $>3\text{h}$). Diese Verbindungen zählen bereits zu den Hochtemperatur- Verbindungsmethoden. Besonders kritisch sind Folgeprozesse, die ein sehr hohes Temperaturniveau erreichen, beispielsweise Ofenprozesse. Diese können Temperaturen bis zu 1200°C erreichen. In einem solchen Fall wird die Möglichkeit einer stabilen Wafer-Verbindung bereits sehr stark eingeschränkt. Bekannte Methoden für eine solche höchst temperaturstabile Verbindungsmethode sind Silizium-Direktbondverbindungen oder keramische Adhäsive. In Bezug auf die zu verbindenden Materialien sind die in der Halbleitertechnik häufig vorkommenden Kombinationen Si - Si, Si - Glas und Glas – Glas betrachtet worden. In vielen Fällen wird von der Verbindungsmethode auch eine hermetisch versiegelte Verbindung erwartet. Dies können von den im Weiteren näher beschriebenen Verfahren nur der Silizium Direktbond, der Anodische Bond und die Glaslotverbindungen leisten. Grundsätzlich lassen sich die Wafer-Verbindungstechniken in 2 Gruppen unterteilen, in Technologien ohne Zwischenschicht (Silizium-Direktbonds, Anodisches Bonden) und Technologien mit Zwischenschicht (Adhäsives Bonden, Glaslot). [30]

7.7.1 Silizium-Direktbonds

Das Silizium-Direktbonds ist eine Verbindungsmethode, bei der 2 Silizium Wafer direkt ohne eine Zwischenschicht miteinander verbunden werden. Die Silizium-direkt-Verbindungsmethoden können wieder in zwei Verfahren unterteilt werden, das hydrophile und das hydrophobe Direktbonds. Der Prozessablauf (dargestellt in Abbildung 80) ist bei beiden Verfahren sehr ähnlich und unterscheidet sich nur in Details wie zum Beispiel der

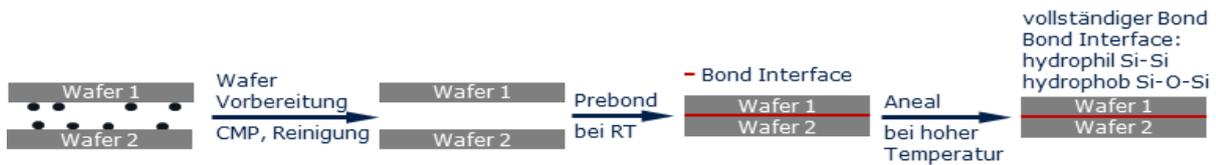


Abbildung 80 Prinzipieller Prozessablauf Silizium Direkt Bonden [45]

Temperatur beim Annealing. Der Mechanismus ist unterschiedlich, wodurch sich auch die unterschiedlichen Festigkeitswerte, die durch die Bindungsenergie dargestellt werden können, erklären. Wie in Abbildung 81 dargestellt ist, erhält der hydrophile (7.7.1.1) Bond bereits bei sehr moderaten Annealing-Temperaturen eine hohe Festigkeit, während der

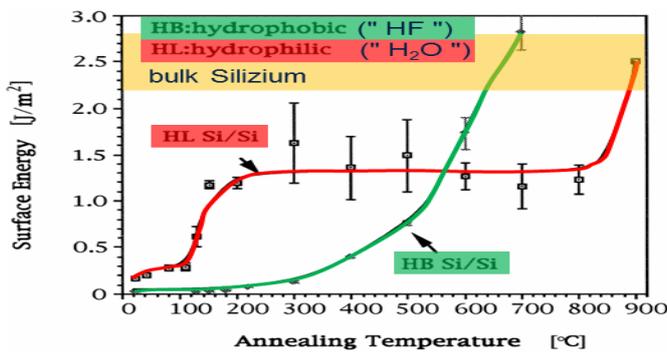


Abbildung 81 Vergleich der Oberflächenenergie von hydrophoben und hydrophilen Silizium direkt Bond über die Bondtemperatur [43], [46]

hydrophobe (7.7.1.2) Bond erst ab ca. 550°C sehr gute Festigkeitswerte aufweist. Im Bereich von 550°C bis ca. 900°C übertrifft der hydrophobe Bond den hydrophilen Bond. Im Vergleich dazu liegt die Bindungsenergie in der Literatur für Silizium bei ca. 2,25-2,8 J/m². Diese Unterschiede in der Bindungsenergie in den beiden Verfahren lassen sich auch anhand eines Diagrammes

darstellen (Abbildung 82), welches die Bindungstypen in den Bondmechanismen zeigt.

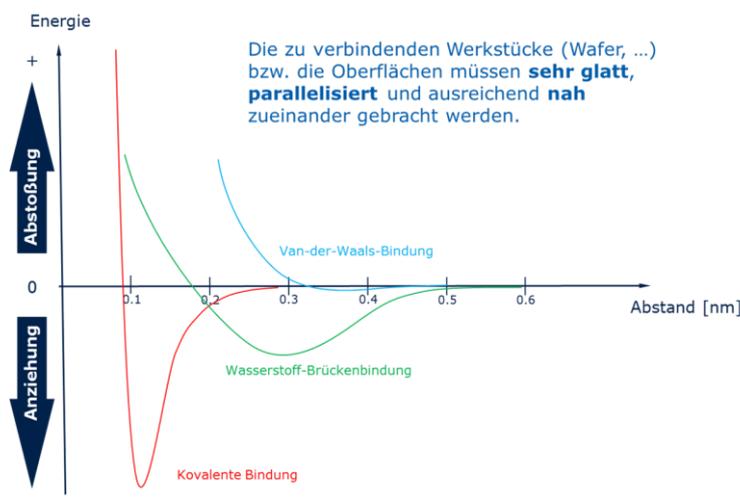


Abbildung 82 Gegenüberstellung von Bindungsenergien bei unterschiedlichen Bindungsarten [43], [62]

Sowohl der Prebond als auch der entstehende fertige Bond unterscheiden sich in ihrer Art. Der hydrophobe Bond wird durch einen van der Waals Prebond der in einen kovalenten Si-O-Si Bond übergeführt wird, erzeugt, wohingegen der hydrophile Bond durch eine Wasserstoffbrückenbindung als Prebond, der in eine kovalente Si-Si Bindung übergeführt wird,

entsteht. Bei beiden Bondverfahren endet man in einem Bereich der Festigkeit, der der Festigkeit von bulk Silizium Material entspricht (Abbildung 81). [31], [32], [33], [34], [35]

7.7.1.1 Hydrophiles Silizium Direkt Bonden

Das hydrophile Silizium Direktbonden ist ein Verfahren, das zu einer direkten Verbindung zwischen 2 Silizium-Wafern in Form einer Si-O-Si Verbindung führt. Der Prozessablauf erfolgt wie in Abbildung 80 dargestellt. Der Mechanismus des Bonds (Abbildung 83) beginnt mit der Ausbildung von Wasserstoffbrücken-Bindungen. Dies geschieht bereits bei Raumtemperatur.

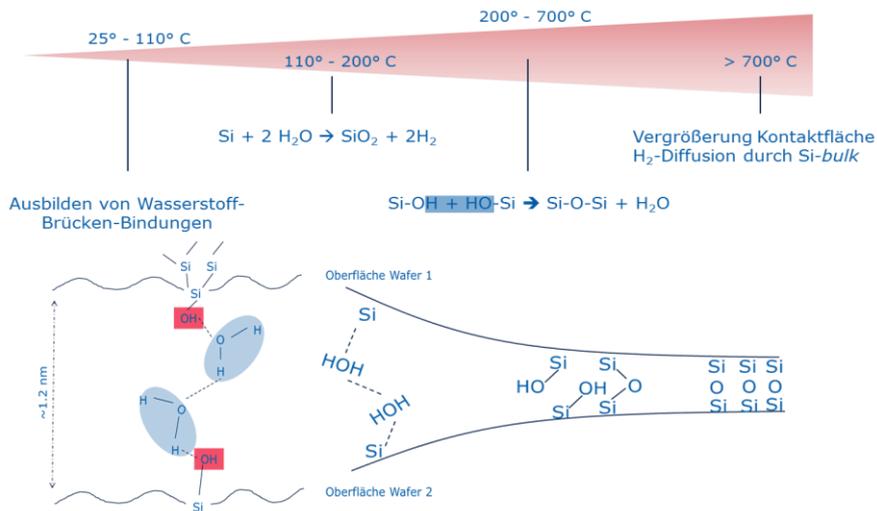
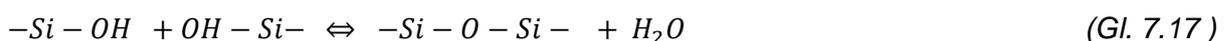


Abbildung 83 Mechanismus hydrophiles Silizium direkt Bonden [32]

Durch den Anstieg der Temperatur kommt es im Weiteren zu Prozessen, die die Grenzflächenstruktur beim Bonden chemisch und physikalisch verändert. So führt die Diffusion in einem Bereich von ca. 110°C-150°C dazu, dass Wassermoleküle in Kontakt mit reinem Silizium kommen, wodurch die in der Reaktionsgleichung (Gl. 7.16) beschriebene Reaktion stattfindet. Es werden hierbei molekularer Wasserstoff und Siliziumdioxid gebildet.



Durch die Entfernung des Wassers an der Grenzfläche, kommt es zu einer Annäherung der Siliziumhydroxidgruppen der gegenüberliegenden Si/SiO₂ Waferoberflächen. Durch fortschreitende Annäherung können diese Siliziumhydroxidgruppen nach (Gl. 7.17) reagieren und eine kovalente Si-O-Si Verbindung bilden. Dies führt zu einem raschen



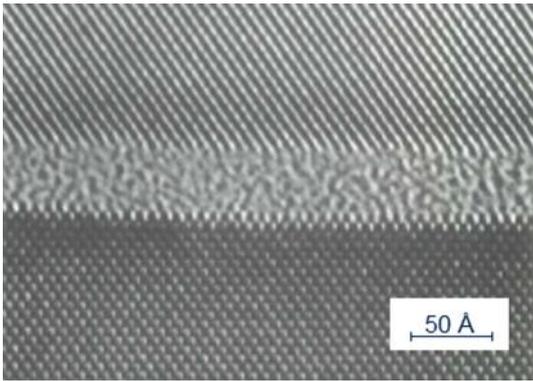


Abbildung 84 HRTEM Hydrophiler Silizium Direkt Bond [45]

Anstieg der Bondenergie, bei ca. 200°C erreicht der Bond sein vorläufiges Festigkeitsmaximum ersichtlich in Abbildung 81. Die Werte bleiben bis zu einer Temperatur von ca. 800°C nahezu konstant. Bei Temperaturen >800°C fängt dann das Siliziumoxid zu fließen an, wodurch Mikrolücken im Bondinterface, die aufgrund von Rauigkeiten zu nicht gebondeten Flächen in den vorangegangenen Bondschritten führten, geschlossen werden können. Das Ergebnis ist

eine ganzflächige Si-O-Si Verbindung zwischen den Wafern. Diese Si-O-Si Verbindung konnte mittels einer HRTEM (high resolution transmission electron microscopy) Aufnahme Abbildung 84 visualisiert werden. [32], [34], [33], [36]

7.7.1.2 Hydrophobes Silizium Direkt Bonden

Bei dem hydrophoben Siliziumdirektbonden wird mittels eines HF Dips die Oberfläche von jeglichem SiO₂ befreit. An den so entstehenden Oberflächen sind die Valenzen mit Fluor und Wasserstoff abgesättigt. Beim Bonden werden Brücken aus 2-3 HF Molekülen zwischen den Wafern gebildet (Abbildung 85) und bei ausreichend ebenen Oberflächen kann auch ein

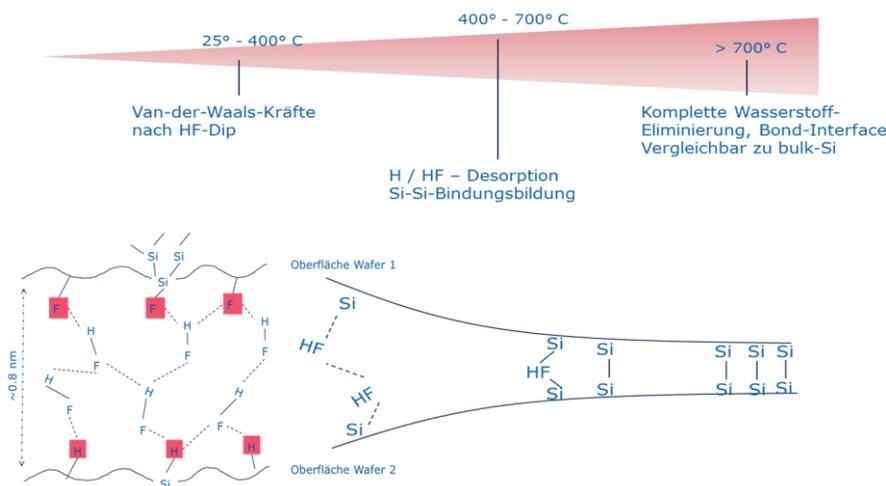


Abbildung 85 Mechanismus hydrophobes Silizium direkt Bonden [43]

Zusammenhalt über Van der Waals Wechselwirkungskräfte der Si-H Gruppen an der Grenzfläche erreicht werden. Bei Temperaturen von 400°C führt die Desorption von Wasserstoff zu Si-Si Verbindung (Gl. 7.18).



Ab diesen Temperaturen ist auch ein immer stärker Anstieg der Festigkeit der Verbindung erkennbar (Abbildung 81). Bei einer Temperatur von ca. 700°C ist die Ausbildung der Si-Si Verbindungen abgeschlossen und der gesamte Wasserstoff ist eliminiert. Die Verbindung

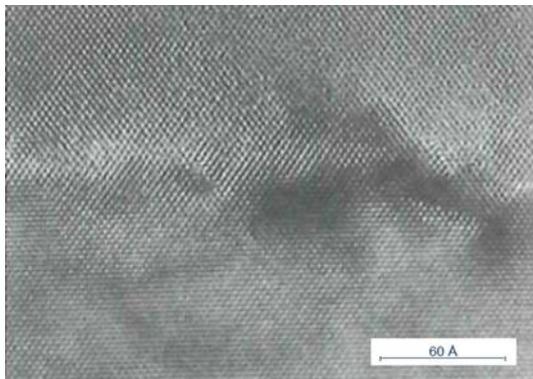


Abbildung 86 HRTEM Hydrophober Silizium Direkt Bond [45]

gleichet nun einem Bulksiliziummaterial. Das Bondinterface ist im HRTEM Abbildung 86 nur mehr schwer zu erkennen, da es sich um reine Silizium Verbindungen handelt. Die Grenzfläche ist nur mehr durch lokale Verzerrungen des Gefüges zu erahnen. Die Festigkeit einer solchen Verbindung entspricht, wie in Abbildung 81 dargestellt, wie auch beim hydrophilen Silizium direkt Bond der Festigkeit von Silizium Substraten (bulk). [32], [34], [33], [36]

7.7.2 Anodisches Bonden

Der Anodische Bond ist eine Waferverbindungsmethode bei der ein Silizium Wafer mit einem Glaswafer irreversibel verbunden werden kann. Mittels Zwischenschichten ist auch ein

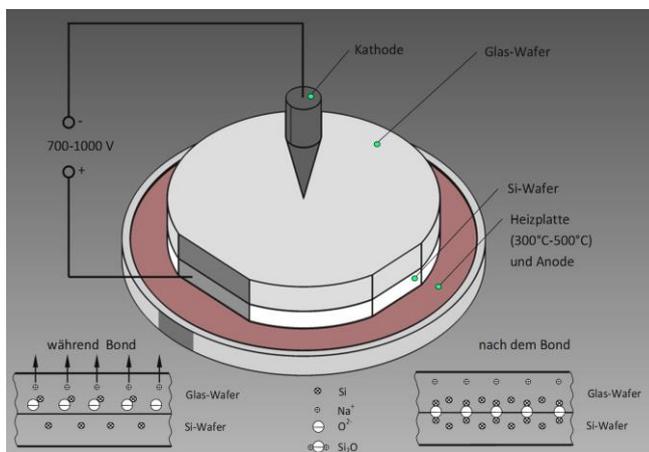


Abbildung 87 Prinzip Anodischer Bond [33], [36]

Verbund von Siliziumwafer mit Siliziumwafer oder Glaswafer mit Glaswafer möglich. Im Falle der Siliziumwaferverbindung könnte diese Zwischenschicht eine durch Alkaliionen verunreinigte Oxidschicht sein und im Falle der Glaswaferverbindung eine Polysilizium Zwischenschicht. Diese Zwischenschichten können beispielsweise durch CVD (Chemical Vapour Deposition) Verfahren

abgeschlossen werden. Der prinzipielle Prozessablauf des Anodischen Bonds wird anhand von Abbildung 87 erklärt. Die Grundvoraussetzung sind sehr glatte, ebene und saubere Oberflächen der zu verbindenden Wafer. Diese Wafer werden in Kontakt gebracht und aufgeheizt (ca. 300°C – 500°C). Die Temperaturerhöhung ist notwendig, um die Mobilität der Na⁺ Ionen auf das für den Anodischen Bond notwendige Maß zu erhöhen. Durch Anlegen einer Gleichspannung (ca. 700-1000V an den Wafern (Glas (-) Kathode, und Silizium (+) Anode) werden die Na⁺ Ionen aufgrund ihrer positiven Ladung und der durch die erhöhte Temperatur gewonnenen Beweglichkeit von der Siliziumglasgrenzfläche in Richtung Kathode

(-) verschoben. In Folge dieser Ladungsverschiebung entsteht an der Grenzfläche im Bereich des Glases ein Ladungsungleichgewicht und somit eine negative Raumladungszone. Auf der Seite des Siliziums wird an der Grenzfläche aufgrund der angelegten positiven Gleichspannung eine positive Raumladungszone erzeugt. Die so erzeugten positive und die vorher beschriebene negative Raumladungszone ziehen sich gegenseitig an (Electrostatic Pull). Die zu verbindenden Wafer befinden sich durch diese Anziehung in Kontakt auf atomarer Ebene. Durch diese Nähe erhalten die Silizium Atome des Siliziumwafers an der Grenzfläche die Möglichkeit eine Verbindung mit den Sauerstoffatomen in dem Glaswafer einzugehen. So wird an der Grenzschicht eine Verbindung der Wafer in Form von kovalenten Si-O-Si Bindungen erzeugt. Der bei dieser Verbindung fließende Strom (Bondstrom) ist ein Maß für die Anzahl der geschaffenen Si-O-Si Verbindungen und somit für die Festigkeit der Verbindung (Abbildung 88). Fällt der Bondstrom auf 0, sind alle möglichen Bindungen eingegangen worden und der Bondprozess

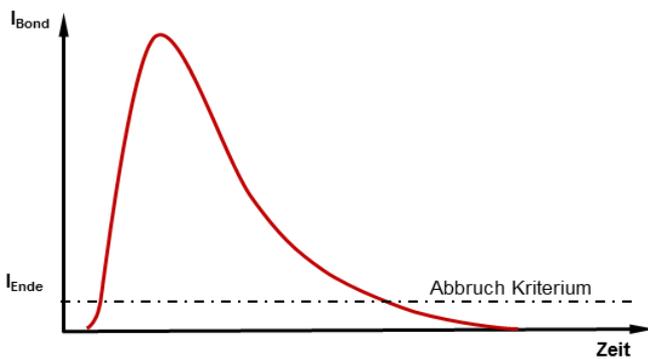


Abbildung 88 Bondstromverlauf Anodischer Bond [48]

ist beendet. In einer realen Anwendung ist eine solche Detektierung des Bond-Endes jedoch aufgrund von äußerer Bedingung nicht sinnvoll, da z.B durch Auftreten eines Leckstromes kein Ende mehr festgestellt werden könnte bzw. die Dauer des Bondvorganges, um die letzten

Bindungen zu erzeugen, deutlich in die Länge gezogen würde. Daher wird bei realen Bondvorgängen meist ein empirisch ermitteltes Abbruchkriterium verwendet beispielsweise eine Beendigung des Bondvorgangs wenn der Bondstrom auf 10% des maximal erreichten Bondstromes gefallen ist. Eine saubere und planare Oberfläche ist eine Grundvoraussetzung für einen Anodischen Bond, da geringste Abstände der Oberflächen (z.B. durch Partikel oder

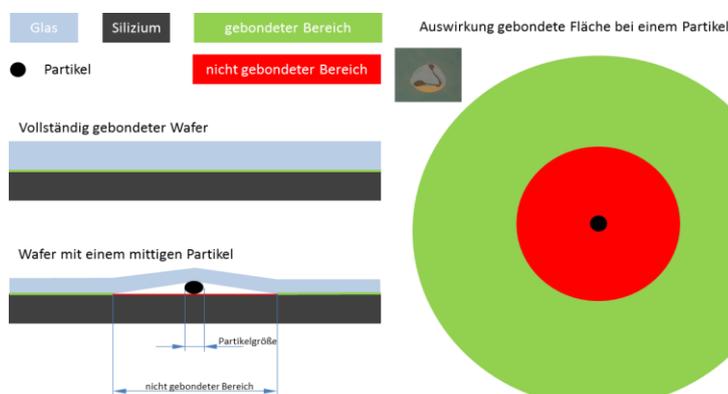


Abbildung 89 Auswirkung eines Partikels auf einen Anodischen Bond

zu große Rauigkeit) schon zu großen ungebondeten Flächen führen (Abbildung 89). In einem solchen Fall fungiert der Partikel als Abstandhalter zwischen den beiden Oberflächen. Die Wafer gleichen sich zwar um den Partikel an (die Wafer

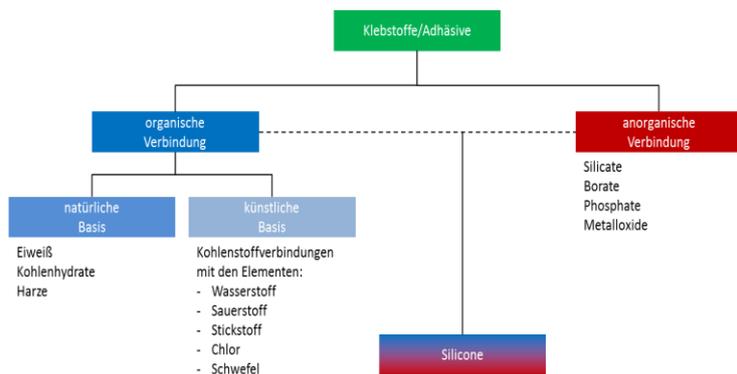
verbiegen sich leicht), jedoch wird über einen großen Bereich ein Bond durch einen zu großen Abstand der Grenzflächenatome der zu verbindenden Wafer verhindert. Solche Fehlstellen erzeugen auch intrinsische Verspannungen in der Verbindung, welche für spätere Bauteile kritisch sein können. Diese Verspannungen treten speziell im Randbereich der Verbindung, also im Übergang zwischen gebondeten und nicht gebondeten Bereich, und am Punkt der Partikelauflage auf. [30], [37], [38]

7.7.3 Adhäsives Bonden

Das Adhäsive Bonden ist eine Technologie bei der ein Verbund der Wafer über eine Zwischenschicht erzeugt wird. Die Einteilung solcher adhäsiven Verbundsysteme wird meist durch die Art der Zwischenschicht oder durch die Art des Abbinde- Mechanismus getroffen, da es kein allgemeingültiges systematisches Ordnungsprinzip gibt. [39], [40]

7.7.3.1 Einteilung der Adhäsive nach der chemischen Basis

Die Einteilung nach der chemischen Basis, wie in Abbildung 90 dargestellt, ist eine sehr



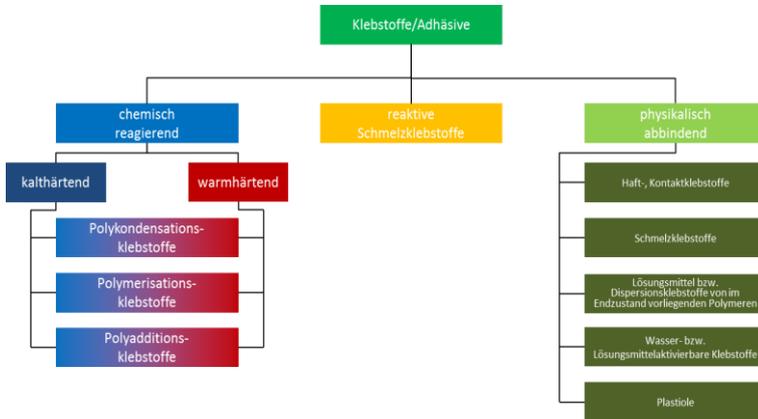
einfache Unterscheidungs- methode bei der die verschiedenen Adhäsive aufgrund ihres chemischen Aufbaues unterteilt werden. Die in Kapitel 7.7.3.4 beschriebenen Epoxidharze würden nach dieser zu den organischen Klebstoffen auf künstlicher Basis zählen und die in 7.7.3.5 beschriebenen

Abbildung 90 Einteilung der Adhäsive nach der chemischen Basis [49]

keramischen Klebstoffe zu den anorganischen Klebstoffen (Omega 600 Magnesiumphosphat, Omegabond 700 Natriumsilikat, Omegabond CC Zirkonsilikat). Als Unterscheidungskriterium nach dieser Einteilung ergibt sich, dass die organischen Adhäsive auf natürlicher Basis meist eine geringere Klebfestigkeit und Alterungsbeständigkeit als die organischen Adhäsive auf künstlicher Basis aufweisen. [39], [40]

7.7.3.2 Einteilung der Adhäsive nach dem Abbindemechanismus

Bei der Einteilung nach dem Abbindemechanismus, dargestellt in Abbildung 91, kann grob zwischen drei große Gruppen unterschieden werden. Bei den physikalisch abbindenden Systemen liegen die Polymere schon in ihrer endgültigen Form vor, da mangels chemischer



Reaktionen keine Verlängerung der Ketten mehr auftreten kann.

Dies bedeutet, dass bei diesen Systemen immer ein Lösungsmittel entfernt werden muss, oder dass durch eine Temperaturerhöhung ein Aufschmelzen und so eine Benetzung der zu verbindenden Oberflächen erreicht wird. Für die Waferverbindung spielen die

Abbildung 91 Einteilung der Adhäsive nach dem Abbinde Mechanismus [49]

physikalisch abbindenden Systeme keine große Rolle. Bei den Systemen mit Lösungsmitteln scheitert die Verbindung oft an den zu geringen freien Oberflächen über die das Lösungsmittel entfernt werden kann. Im Fall von reinen Schmelzklebstoffen scheitert es oft an der Temperaturbeständigkeit, da die Temperatur bei der Verarbeitung auch die maximale Temperaturbeständigkeit der Verbindung darstellt. Chemisch reagierende Klebstoffe sind meist Mehrkomponentensysteme, die ihre Endfestigkeit durch eine chemische Reaktion erhalten. Dies bedeutet, dass solche Systeme eine Zwischenschicht bilden, die in den Ausgangsprodukten noch gar nicht vorhanden ist und erst durch die chemische Reaktion während des Aushärtens entsteht. Der große Vorteil an einem solchen System ist, dass keine Lösungsmittel (oder nur sehr geringe Mengen von Stoffen die als Nebenprodukte der Reaktion entstehen) aus dem Verbundsystem entfernt werden müssen. Ein weiterer Vorteil solcher Verbindungen ist, dass die physikalischen Eigenschaften der Ausgangsstoffe unterschiedlich zu den physikalischen Eigenschaften der fertigen Verbindung sind. So ist die Temperaturfestigkeit deutlich angehoben. Bei den reaktiven Schmelzklebstoffen handelt es sich um eine Gruppe von Klebstoffen die eine Mischform der beiden vorher erwähnten Abbindemechanismen darstellt. So wird eine Benetzung der Oberflächen durch thermisches Aufschmelzen erreicht, und die Aushärtung zur Endfestigkeit bzw. Endtemperaturfestigkeit durch eine chemische Reaktion. [39], [40]

7.7.3.3 Aufbau einer Adhäsivverbindung

Eine adhäsive Verbindung stellt ein Mehrschichtsystem dar. Der schematische Aufbau wird



Abbildung 92 Aufbau einer Adhäsiv Verbindung [49]

in Abbildung 92 dargestellt. Sie besteht grundsätzlich aus den zu verbindenden Fügeteilen im Falle von Waferverbindungen aus den Wafern, die auch aus verschiedenen Werkstoffen bestehen können (z.B. Silizium und Glas), und dem Adhäsiv. Die Adhäsivschicht selbst kann in eine adhäsive Grenzschicht an der Verbindungstelle zu den Wafern und eine kohäsive Volumenschicht unterteilt werden. Das Einführen von Grenzschichten ist vor allem deshalb notwendig, da aufgrund der Anbindung die Möglichkeit einer unvollständigen Aushärtung gegeben ist. Eine solche Unterteilung ist sinnvoll, um ein Versagen bzw. einen Bruch der Verbindung beschreiben zu können. [39], [40]

7.7.3.3.1 Adhäsion (Haftung)

Die Adhäsion beschreibt die Anbindung oder Haftung der Klebeschicht an den Wafer. Diese Verbindung kann in 3 verschiedene Arten (Abbildung 93) der Anbindung unterteilt werden. In

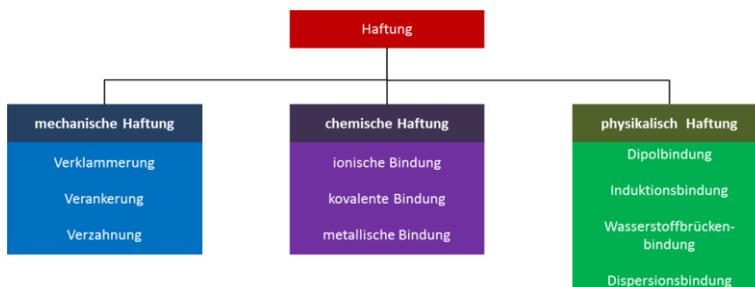


Abbildung 93 Haftungsarten [50]

der Realität treten diese Haftungsmechanismen jedoch nicht getrennt voneinander auf, sondern stellen stets ein Zusammenspiel aus mehreren Mechanismen dar, die in Summe die Adhäsionsfestigkeit bzw. das Haftungsvermögen ergeben.

Die mechanische Haftung beruht vorwiegend auf der Bildung von formschlüssigen-

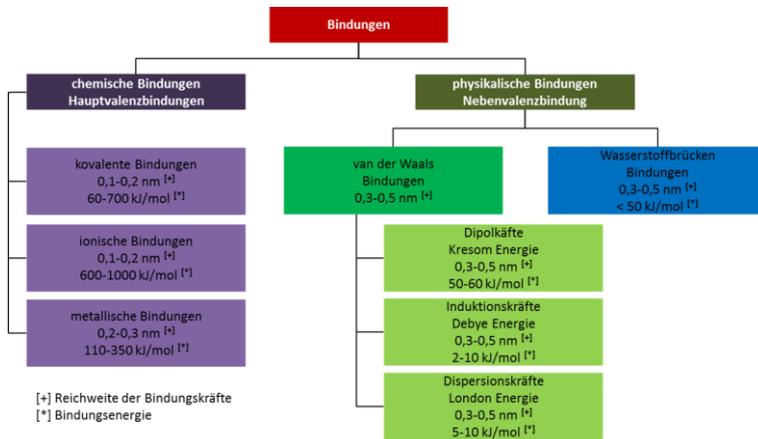


Abbildung 94 Mechanische Haftung [49]

Verbindungen (Abbildung 94). Durch den Auftrag des Adhäsives in flüssiger Form, welches in die Oberflächenrauigkeit eindringt und nach dem Aushärten zu den in Abbildung 93 genannten Verklammerungen, Verankerungen und Verzahnungen führt. Diese Art der Haftung ist jedoch sehr schwer erfassbar, da die Haftung sehr stark von der Oberflächenbeschaffenheit der Verbindungspartner abhängt.

Die chemische Haftung stellt eine Haftung in Form chemischen Bindungen (ionische, kovalente und metallische Bindungen) dar. Diese Art der Haftung zeichnen sich durch sehr starke Bindungskräfte aus.

Die physikalischen zwischenmolekularen Bindungen beruhen auf Wechselwirkungskräften,



also auf Anziehungskräften und Abstoßungskräften. Die Bindungsenergien solcher physikalischen Bindungen sind geringer als die Bindungsenergien bei chemischen Bindungen, jedoch ist die Reichweite der Bindungskräfte höher (dargestellt in Abbildung 95). [39], [40], [41]

Abbildung 95 Bindungsenergien atomarer und molekularer Bindungen [49], [51]

7.7.3.3.2 Kohäsion (innere Festigkeit)

Als Kohäsion wird bei Adhäsivverbindungen die innere Festigkeit der Zwischenschicht bezeichnet. Die Kohäsion ist somit die Stärke der Bindungen in einem Stoff zwischen den Atomen oder Molekülen. Die auftretenden Bindungsmechanismen bei der Kohäsion sind dieselben wie bei der Adhäsion (Abbildung 95). Der Unterschied zwischen Adhäsion und Kohäsion liegt darin, dass bei der Adhäsion zwei unterschiedliche Stoffe miteinander verbunden werden und bei der Kohäsion handelt es sich um die intrinsische Verbindung eines Stoffes. Eine wichtige Größe zur Bestimmung der Kohäsionsfestigkeit stellen die Bindungsenergien dar. Eine Übersicht an Bindungsenergien zwischen Elementen ist in Tabelle 12-10 angeführt. Die wichtigsten Verbindungen bei Adhäsivverbindungen stellen bei Polymeradhäsiven die Kohlenstoffverbindungen C-N (305 kJ/mol), C-C (348 kJ/mol), C-O (358 kJ/mol) und C-H (413 kJ/mol) dar. Bei den keramischen und Glasloten sind vor allem die Sauerstoffverbindungen von Interesse, wie beispielsweise die Si-O Bindung (451 kJ/mol). An den Werten für die Bindungsenergien ist ersichtlich, dass die keramischen Klebstoffe und die Glaslote Vorteile in Bezug auf die innere Festigkeit gegenüber den polymerbasierten Klebstoffen haben. Die volle Kohäsionsfestigkeit steht erst nach dem Aushärten der Adhäsive zur Verfügung, da erst während des Aushärtens die Bindungen etabliert werden, die für die Festigkeit verantwortlich sind. Bei Polymerklebstoffen spricht man erst nach dem Überschreiten des kritischen Polymerisationsgrades von einem ausgehärteten Klebstoff, da die Kohäsionsfestigkeit vor dem kritischen Polymerisationsgrad (Molekulargewicht bei dem

die Eigenschaftswerte konstant bleiben) stark ansteigt und nach dem Überschreiten nur mehr geringe Änderungen in der Festigkeit auftreten. Das Molekulargewicht der Schicht ist

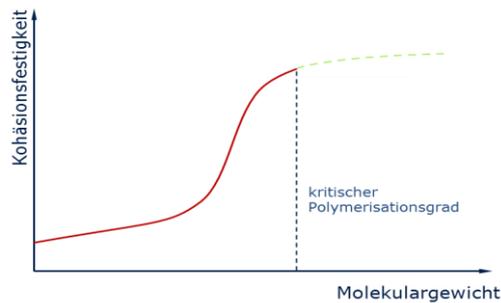


Abbildung 96 Prinzipielle Abhängigkeit der Kohäsionsfestigkeit vom Molekulargewicht bzw. vom Polymerisationsgrad [49]

der Indikator dafür, wie weit die Aushärtung vorangeschritten ist und somit ein bestimmender Faktor für die Kohäsionsfestigkeit (dargestellt in Abbildung 96). Dies führt dazu, dass bei dem Aufbau, wie in Abbildung 92 dargestellt, eine Schwachstelle von der Grenzfläche in Richtung Klebstoffschicht entsteht. Adhäsionsbindungen zum Wafer können die Aushärtung in diesem Grenzbereich beeinflussen und führen zu einer

Schicht die nicht völlig ausgehärtet ist (der kritische Polymerisationsgrad wird nicht erreicht) und daher nicht die Kohäsionsfestigkeit der restlichen Klebstoffschicht. Dieses Phänomen wird in der Klebetechnologie als "weak boundary layer" bezeichnet und kann das Bruchverhalten stark beeinflussen. Die Kohäsionsfestigkeit stellt eine Größe dar, die vor allem durch den Werkstoff und die Temperatur beeinflusst wird. Ein weiterer Faktor, der sich stark auf die Kohäsionsfestigkeit auswirkt, sind Fehlstellen in Form von Fremdstoffen die von Fremdelementen, die direkt zu ungewollten Verbindung innerhalb der Klebschicht führen können, bis zu Blasen (beispielsweise Gasförmige Einschlüsse in der Klebeschicht) reichen können. [39], [41]

7.7.3.3 Bruchverhalten Adhäsiver Verbindungen

Das Bruchverhalten kann grob nach dem Ort des Bruches unterteilt werden (dargestellt in Abbildung 97). Durch die Bestimmung des Ortes lässt sich der ausschlaggebende



Abbildung 97 Ort und Art des Bruches einer Adhäsiv Verbindung [53]

Mechanismus für einen Bruch bestimmen. In der Realität ist dies nicht klar unterscheidbar, da Mischformen (Abbildung 98f) der 4 Grundmechanismen auftreten können. Bei den hier betrachteten Grundmechanismen kann der Fügeteilbruch

vernachlässigt werden, da der Fügeteilbruch (Abbildung 98g) kein Versagen der Verbindung, sondern eine klassische Art des Bauteilversagens darstellt. Der reine Adhäsionsbruch würde einen Verlust der Haftung an der Verbindungsstelle darstellen. Hierbei wird noch unterschieden, ob der Haftungsverlust an einem (Abbildung 98a) oder beiden (Abbildung

98b) Füge­teilen auftritt. Der Grund für einen solchen Haftungsverlust ist, dass die Kräfte aufgrund der Belastung die Adhäsionskräfte (Abbildung 93 und Abbildung 95) übersteigen. Bei einem reinem Kohäsionsbruch (Abbildung 98c) tritt das Versagen aufgrund einer Belastung ein, die größer ist als die inneren Bindungskräfte in der Klebeschicht (7.7.3.3.2). Spezielle Formen des Kohäsionsbruches sind die substratnahen Kohäsionsbrüche (Abbildung 98d,e). Bei diesen Versagensfällen kommt vor allem die weak boundary Problematik zum Tragen.

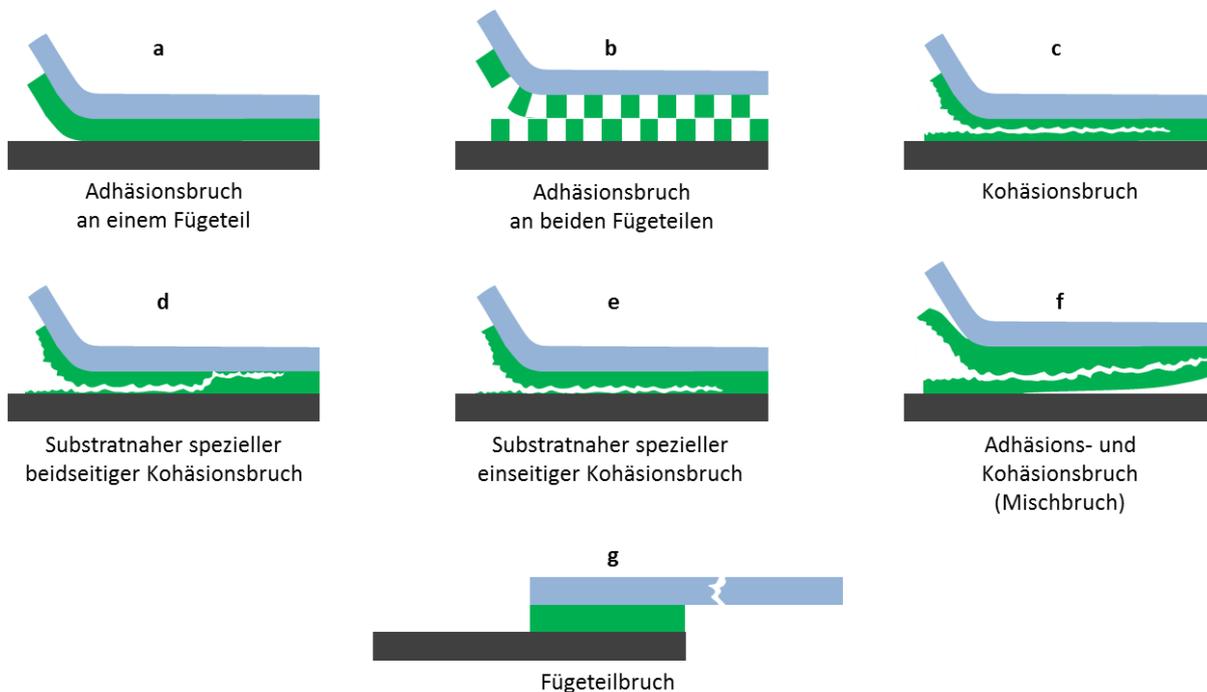


Abbildung 98 Bruchverhalten von Klebungen [49], [53]

Weitere Gründe für einen Versagensfall können die mechanische Verklammerung (Abbildung 94) an der Oberfläche oder Fehlstellen an der Grenzfläche sein. Fehlstellen, Lunker, Partikel und Oberflächenverschmutzungen spielen für die Versagensbetrachtungen eine wichtige Rolle, da sie eine Schwächung der Verbindung darstellen und initiale Punkte für einen Riss oder Haftungsverlust sind. [39], [42]

7.7.3.4 Epoxidharzadhäsive

Die Epoxidharze zählen zu den am meist verwendeten Adhäsiven in der Technik. Sie haben



ihren Namen aufgrund der im ungehärteten Zustand vorhandenen Epoxidgruppen (Abbildung 99), die beim Aushärten für die Quervernetzung der Polymerketten verantwortlich ist. Die unterschiedlichen Epoxidharze zählen zu den Duroplasten und

können in ihrer Erscheinungsform von niedrigviskosen Flüssigkeiten bis zu hochschmelzenden Festkörpern variieren. Aus diesem Grund sind sie bei der richtigen Auswahl von Harz, Härter, Modifizierungsmittel und Füllstoff in vielen Bereichen entsprechend ihren Anforderungen einsetzbar. Die Härtung der Epoxidharze erfolgt durch die Quervernetzung der Polymere. Die Quervernetzung, das sogenannte Härten (hardening bzw. curing), ist in den meisten Fällen eine Aminhärtung die prinzipiell in Abbildung 100 dargestellt ist.

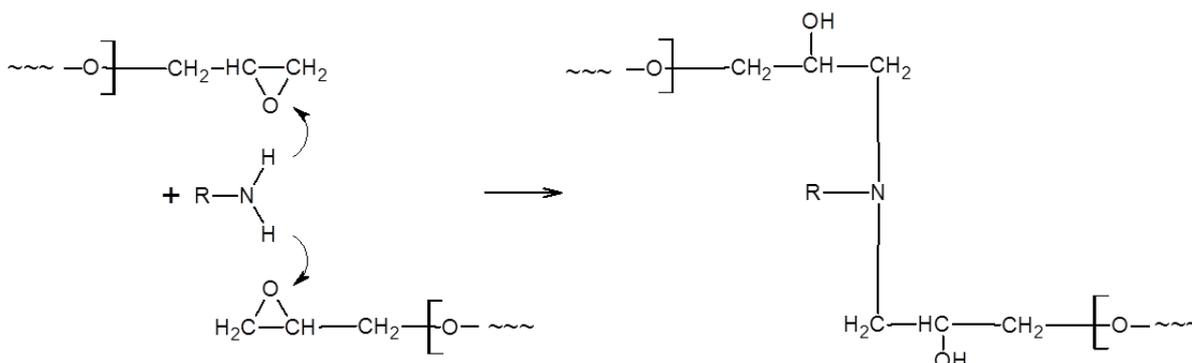


Abbildung 100 Aminhärtung bei Epoxidharzen [54]

Die Epoxidmakromoleküle in der Abbildung wurden der Übersicht halber (bzw. da sie sich je nach Epoxidharz unterscheiden können) nicht ausgeschrieben und mit ~~~ bezeichnet. Das in Kapitel 6.1.1 eingesetzte zweikomponentige Hochtemperaturepoxidharz Epotek 353 ND ist ein Phenol Novolac Epoxid mit einer Dauergebrauchstemperatur zwischen -50 bis 250 °C und einer Kurzzeitgebrauchstemperatur zwischen -50 bis 350°C. Der chemische Aufbau dieses Harzes vor dem Härten ist in Abbildung 101 dargestellt und beinhaltet normalerweise

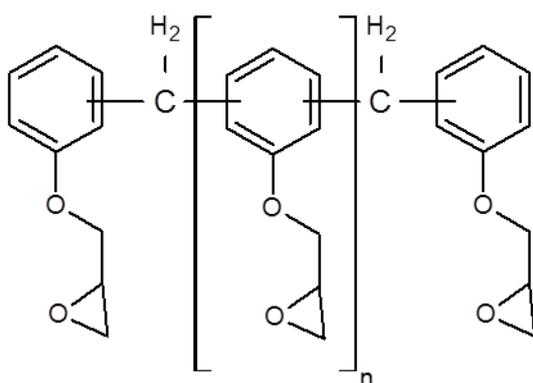


Abbildung 101 Aufbau des Phenol Novolac Epoxidharzes [63]

2 bis 6 Epoxidgruppen ($n = 0$ bis 4). Die Härtung erfolgt analog der in Abbildung 100 dargestellten Aminhärtung. Die Phenol Epoxid Harze zeichnen sich dadurch aus, dass Sie gute Festigkeitswerte über einen großen Temperaturbereich gewährleisten. Dies ist notwendig, da eine Betriebstemperatur des in 6.1.1 verbauten Halbleiters von ca. 175°C erlaubt ist, und die Verbindung dabei nicht geschädigt werden darf. Der breite Temperaturbereich über den die

Festigkeit gewährleistet ist, wird im Vergleich zu Nitril Epoxid oder Nylon Epoxid in Abbildung 102 dargestellt. Die maximalen Festigkeitswerte von Nitril bzw. Nylon Epoxid sind zwar deutlich höher, jedoch sinkt die Festigkeit bei höheren Temperaturen stark ab und kann somit nicht die notwendige Festigkeit über den gesamten Arbeitsbereich des Halbleiters

leisten. Dies führte zur Auswahl eines phenol basierten Epoxidharzes im konkreten Fall des Epotek 353 ND. [43], [44], [45]

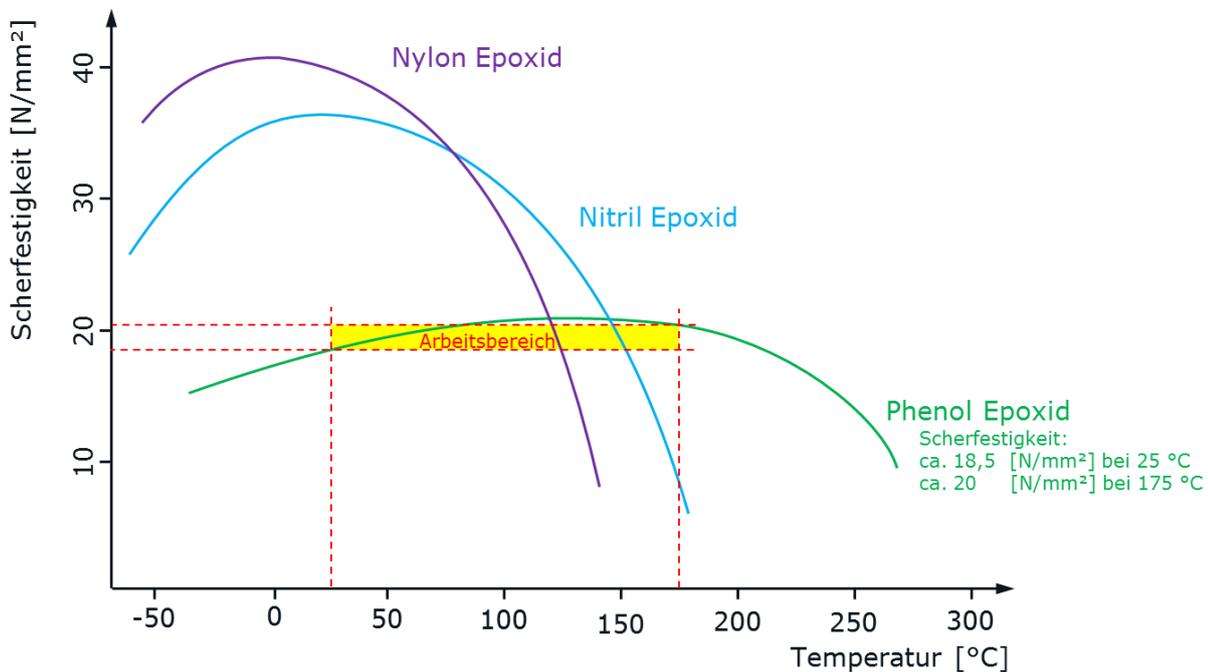


Abbildung 102 Festigkeitsvergleich von Verbindungen aus Phenol-, Nitril- und Nylon Epoxid [55]

7.7.3.5 Keramische Adhäsive

Keramische Adhäsive sind anorganische Klebstoffe mit einer keramischen Basis. Die

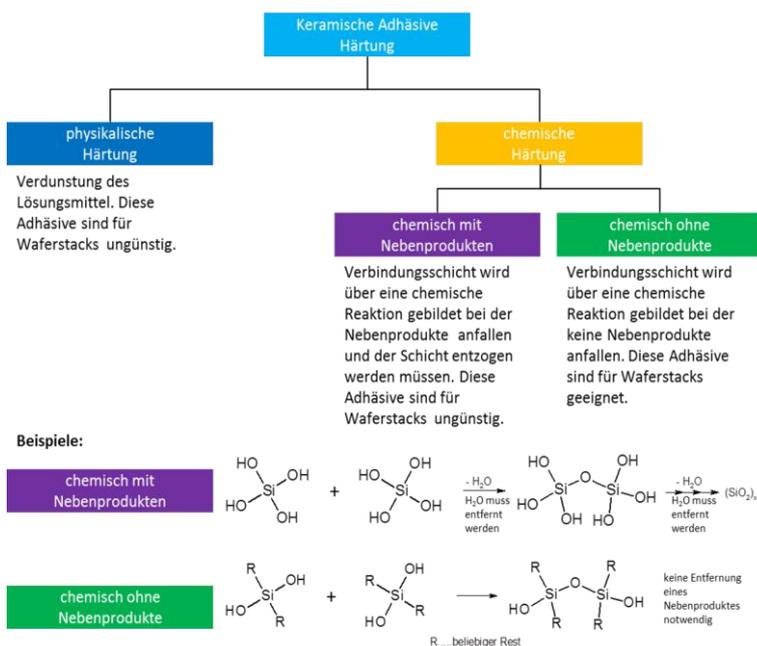


Abbildung 103 Härtung keramischer Adhäsive [54], [56]

Einteilung kann aufgrund dieser Basis erfolgen (Abbildung 104). Die keramischen Klebstoffe zeichnen sich besonders durch die hohe Temperaturbeständigkeit, die teilweise bei über 3000°C liegen kann, bei moderaten Härtungstemperaturen (curing) aus. Die physikalischen Eigenschaften, wie mechanische Festigkeit, thermischer Ausdehnungskoeffizient, Spannungsfestigkeit oder

thermische und elektrische Leitfähigkeit dieser Klebstoffe lassen sich durch die Reinheit, Korngrößenverteilung oder den Zusatz von Füllstoffen beeinflussen. So kann durch Zusatz von metallischen Füllstoffen eine bedingte elektrische Leitfähigkeit erreicht werden. Ein weiteres wichtiges Kriterium beim Einsatz von keramischen Adhäsiven ist der Abbinde-mechanismus (Härtung Abbildung 103), da bei der physikalischen Härtung und bei der chemischen Härtung mit unerwünschten Nebenprodukten die Lösungsmittel bzw. die Nebenprodukte aus der Schicht entfernt werden müssen. Für diese Entfernung wird eine freie Oberfläche benötigt, die in den meisten Fällen bei einem Waferstack nicht vorhanden ist. [39], [46]

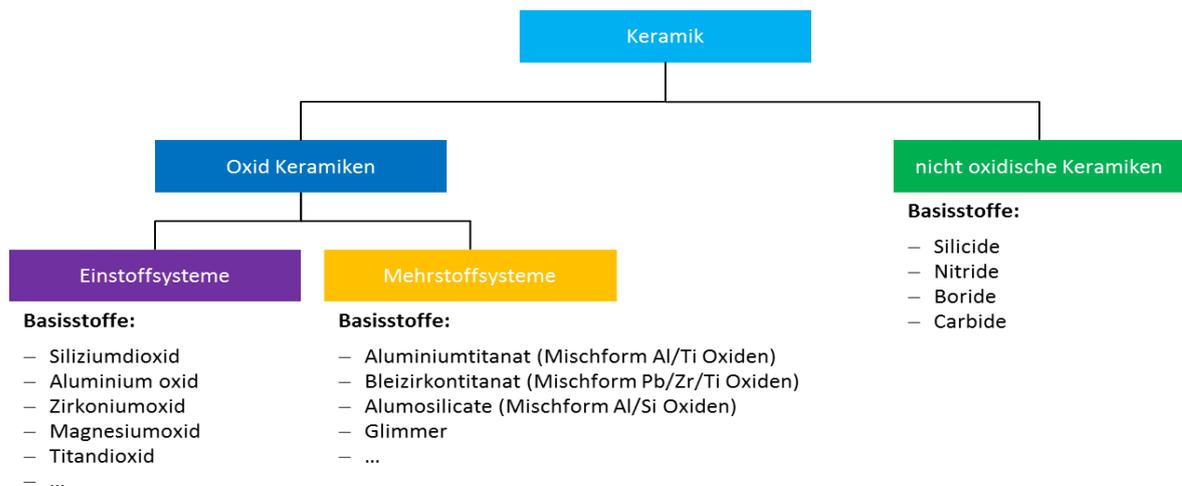


Abbildung 104 Einteilung keramischer Adhäsive aufgrund der Basis [49], [56]

7.7.4 Glaslotverbindungen

Die Glaslote sind Multikomponentenglasverbindungen mit niedrigem Erweichungspunkt. Die

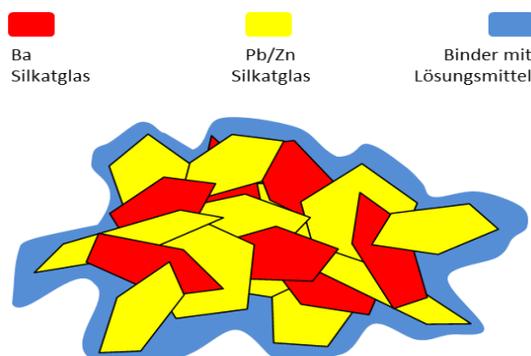


Abbildung 105 Prinzipieller Aufbau eines Glaslotes anhand einer Glaslotmischung aus Ba Silikatglas und Pb/Zn Silikatglas [58]

einzelnen Komponenten sind für den niedrigen Erweichungspunkt, für den thermischen Ausdehnungskoeffizienten oder andere physikalische Anforderungspunkte an das Glaslot verantwortlich. Die Glaslote werden als Pulvergemische hergestellt und für die spätere Prozessierbarkeit durch den Zusatz von Binde- und Lösungsmitteln zu einer Paste weiterverarbeitet. Als Beispiel ist in Abbildung 105 ein solche Glaslotgemisch aus einem Barium- Silikatglas und einem

Blei/Zinn Silikatglas dargestellt. In diesem Beispiel dient das Barium- Silikatglas zur Einstellung des thermischen Ausdehnungskoeffizienten und das Blei/Zinn Silikatglas für den

niedrigen Erweichungspunkt. Die Binder und Lösungsmittel sind notwendig, um eine druckbare Paste zu erzeugen. Printverfahren sind die bevorzugte Applizierungsmethode bei Glasloten. Aus diesem grundsätzlichen Aufbau lässt sich bereits erkennen, dass die Zusammensetzung solcher Glaslote stark variieren kann, je nach Anforderung können verschiedene Mischungen (an Glasarten) in unterschiedlichen Konzentrationen zusammengestellt werden. Die Anzahl an unterschiedlichen Glasarten ist nicht zwangsweise 2 wie in Abbildung 105 dargestellt, sondern kann auch deutlich höher sein. Mittlerweile sind auch Glaslote erhältlich die auf bleibasierte Gläser zum Erreichen des niedrigen Erweichungspunktes verzichten können. Bei diesen Bleifreien Glaslot wird meist auf Bismut als Bleiersatz zurückgegriffen. Die fertige Bondverbindung stellt eine stoffschlüssige Verbindung dar. Die einzelnen Prozessschritte zur Etablierung einer solchen Verbindung werden in Abbildung 106 dargestellt. Im ersten Schritt erfolgt der Auftrag der Glaslotpaste

auf den Wafer (7.7.5) in den meisten Fällen wird dafür ein Druckverfahren verwendet. Der folgende Trocknungsschritt dieser dient zur Entfernung der Lösemittel und zur Polymerisierung des Binders. Die

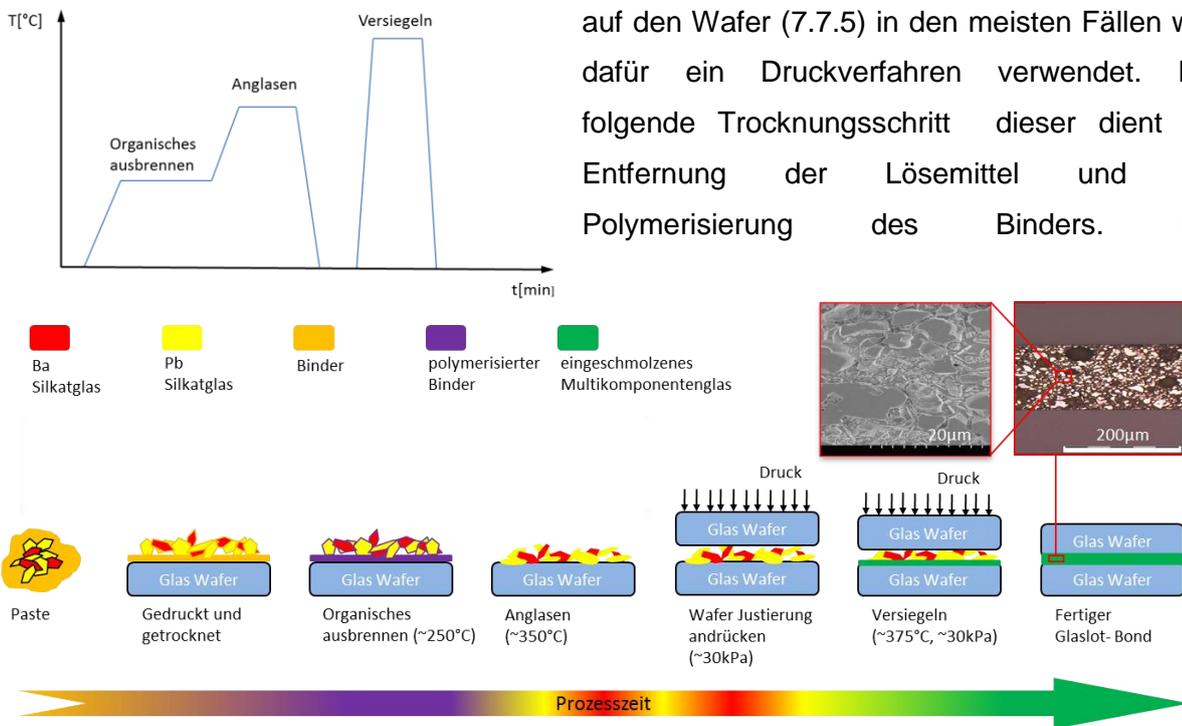


Abbildung 106 Prinzipieller Prozessablauf Waferverbindung durch Glaslote [33], [48], [34], [36]

Polymerisierung des Binders ist notwendig um ein verlaufen der gedruckten Strukturen zu verhindern und somit die Strukturtreue zu erhalten. Bei dem organischen Ausbrennen (Binder burn out) werden die organischen Komponenten aus dem Glaslot entfernt. Es beginnt bereits ein Schmelzprozess bei hoher Viskosität der niedrighschmelzenden Glaskomponenten, wodurch eine erste Fixierung des Glaslotes an der Waferoberfläche erreicht wird. Durch das Anglasen wird diese erste Verbindung nun vervollständigt und so Lunker freie Anbindung an den Wafer geschaffen. Zu diesem Zeitpunkt ist eine Unterbrechung des Bondprozesses möglich aber nicht notwendig. Es folgt die Positionierung

des zweiten Wafers und eine Druckbeaufschlagung. Das Versiegeln unter Druck und der maximalen Prozesstemperatur führt zu einem vollständigen Umfließen der höher Schmelzenden Komponenten und zu der Verbindung des zweiten Wafers mit dem Glaslot. Durch diesen Prozess wird eine hermetisch versiegelte Glaslot Verbindung erzeugt. Bei der Betrachtung dieses Prozesses ist ersichtlich, warum Glaslote als Lote bezeichnet werden, da der Prozess im Vergleich zu den Adhäsiven adhäsiven Verbindungstechnologien eher einem Lötprozess ähnelt. [30], [37], [47], [48], [49]

7.7.5 Applizierungsverfahren für adhäsives Bonden und Glaslotbonden

Die Applizierungsverfahren sind notwendig, um die Adhäsive bzw. die Glaslote in der gewünschten Form und der gewünschten Dicke auf das Substrat zu bringen. Je nach Art des aufzutragenden Materials sind unterschiedliche Methoden von Vorteil oder sogar vom Hersteller empfohlen.

7.7.5.1 Manuelle Auftragung

Die manuelle Auftragung ist für eine Volumenfertigung nicht geeignet. Sie ist vor allem für Vorversuche bzw. Laboruntersuchung von Vorteil, da keine speziellen Fertigungsanlagen für diese Art der Applizierung notwendig sind. Die Nachteile einer solchen manuellen Auftragung sind vor allem, dass keine gute Wiederholgenauigkeit beim Auftrag möglich ist, so variieren die Schichtdicke bzw. das Volumen des aufzutragenden Materials stark. Diese Nachteile können starken Einfluss auf Ergebnisse von Versuchen haben, daher muss eine solche Auftragung bei der Auswertung bzw. der Deutung der Versuchsergebnissen berücksichtigt werden. Bei ersten Versuchen ist diese Aufbringungsmethode jedoch oft das Mittel der Wahl, da die Fertigungsanlagen sehr teuer sind, und das Verfahren für grundsätzliche Aussagen, wie Materialverträglichkeit meist ausreicht.

7.7.5.2 Walzverfahren

Walzverfahren sind Verfahren bei denen der Klebstoff oder das Glaslot auf eine Walze

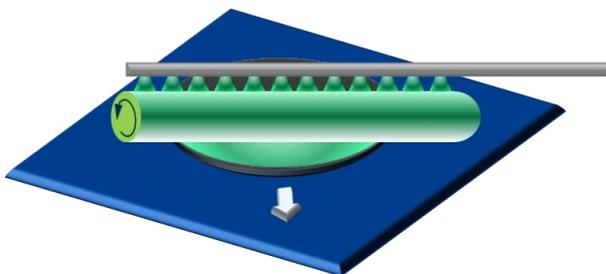


Abbildung 107 Prinzip Kleberauftrag für Wafer über Walzverfahren

aufgetragen wird und der so entstandene Film auf der Walze auf den Wafer abgerollt wird, dargestellt in Abbildung 107). Dieses Verfahren ist vor allem dafür geeignet Wafer ganzflächig bzw. in Streifen zu beschichten. Durch Strukturierung des Wafers ist es bei diesem Verfahren auch möglich Wafer so zu beschichten, dass der Auftrag nur auf

den erhabenen Bereichen des Wafers erfolgt. Eine weitere Möglichkeit eines partiellen Auftrags ist die Strukturierung der Walze. Die Schichtdicke bei dieser Auftragsmöglichkeit kann durch die Dosiermenge, die Drehgeschwindigkeit der Walze, die Viskosität des aufzutragenden Materials und den Abstand der Walze vom Wafer beeinflusst werden.

7.7.5.3 *Spin Verfahren*

Das Spin Verfahren ("spin coating") ist ein Rotationsverfahren bei dem der Auftrag des Klebstoffes in der Wafermitte erfolgt (dargestellt in Abbildung 108). Durch die Zentrifugalkraft

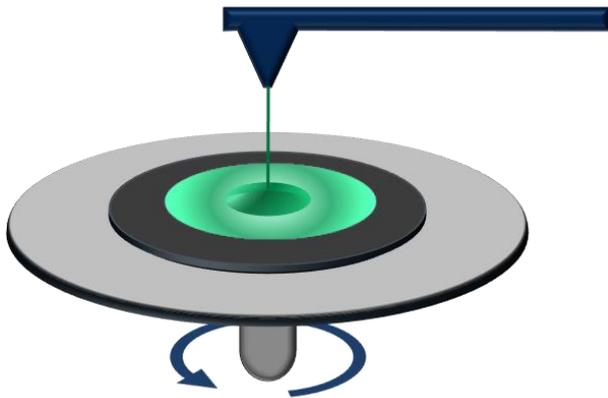


Abbildung 108 Prinzip Kleberauftrag für Wafer über Spin Verfahren

wird der Klebstoff über den Wafer verteilt. Überschüssiger Klebstoff wird am Rand des Wafers abgeschleudert. Durch ein solches Verfahren ist es möglich homogene Schichten vollflächig auf dem Wafer zu applizieren. Es ist auch möglich flache Strukturen auf dem Wafer zu beschichten, dies ist jedoch stark abhängig von der Tiefe dieser Strukturen und der Dicke der aufgetragenen Klebschicht (große Klebstoffdicken lassen tiefere Strukturen

zu). Bei solchen strukturierten Wafers ist die Schichtdickenhomogenität über den Wafer schlecht, da die Strukturen Staupunkte bei der Beschichtung erzeugen. Die bevorzugte Anwendung für ein Spin Verfahren ist eine vollflächige Beschichtung eines ebenen Wafers ohne oder mit geringer Topologie. Die Schichtdicke der aufgetragenen Beschichtung ist abhängig von der Beschleunigung, der Drehzahl, der Dosiermenge und den Materialeigenschaften. Hierbei sind vor allem die Viskosität und die Oberflächenspannung von Bedeutung. Die Viskosität kann auch während des Prozesses durch Heizen des Chucks (Waferaufnahme der Anlage) beeinflusst werden. Typischerweise erfolgt die Dosierung bei einer moderaten Drehzahl (z.B. ~500 U/min Materialabhängig), die beim Verteilen beschleunigt (auf z.B. ~1500-3000 U/min materialabhängig) wird, und beim Abschleudern noch einmal gesteigert (z.B. ~6000 U/min materialabhängig) werden kann.

7.7.5.4 *Spray-Verfahren*

Das Spray Verfahren ist ein Verfahren bei dem eine Flüssigkeit (niedriger Viskosität) in einem Gas zerstäubt wird. Durch diesen Vorgang liegt die Flüssigkeit in feinsten Tröpfchen in dem Gas vor. Dieser Zustand wird als Aerosol oder Nebel bezeichnet. Dieser Nebel legt sich beim Sprayverfahren ("spray coating") als dünner Flüssigkeitsfilm auf dem Wafer ab. Das Besprühen selbst kann in unterschiedlicher Art und Weise erfolgen, häufig wird ein

Rotationsverfahren (Abbildung 109) ähnlich dem Spinnverfahren (7.7.5.3) verwendet. Eine partielle Auftragung (Aufbringung einer Struktur bzw. Muster) ist bei diesem Verfahren durch

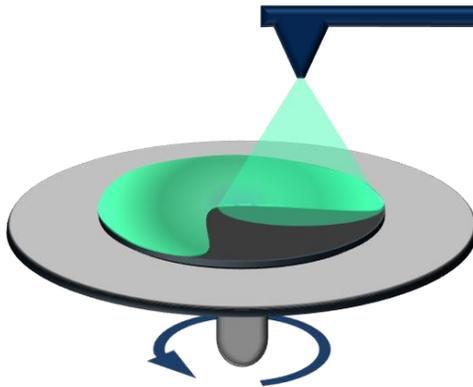


Abbildung 109 Prinzip Kleberauftrag für Wafer über Sprayverfahren

eine Maskierung ("shielding") möglich. Die Maske wird bei einer solchen Anwendung über dem Wafer positioniert und rotiert mit dem Wafer (Maske auf dem Drehteller fixiert). Eine zweite Möglichkeit besteht darin, dass nicht der Wafer bewegt wird sondern die Sprüheinheit (Wafer und Maske sind fix positioniert). Das Verfahren ist gut geeignet eine Schicht mit geringen Schichtdickenschwankungen auf Wafer mit Topologie zu applizieren, auch eine Beschichtung von planen Wafern ist möglich.

7.7.5.5 Siebdruckverfahren

Das Siebdruckverfahren ist das Verfahren der Wahl für die Applizierung von Glasloten, da diese im Vergleich zu den meisten Adhäsiven eine deutlich höhere Viskosität aufweisen und somit mit den vorher genannten Verfahren nur schlecht applizierbar sind. Das Siebdruckverfahren ist in der Industrie ein gebräuchliches Verfahren zum strukturierten Aufbringen von Pasten, es ist jedoch auch eine Applizierung einer ganzflächigen Schicht möglich. Eine Alternative zu dem Siebdruckverfahren in der industriellen Volumenfertigung wäre ein lithographisches Verfahren mit anschließender Rückätzung des angeglasten Glaslots (siehe Abbildung 106), um eine strukturierte Glaslotschicht für eine Verbindung zu erhalten. Die Vor- und Nachteile des Siebdruckes gegenüber dieser Möglichkeit sind in Tabelle 12-11 aufgelistet. Eine Abwägung dieser Vor- und Nachteile führt meist zu einer Entscheidung für den Siebdruck bei dicken Schichten eines hochviskosen Materials, das strukturiert aufgebracht werden soll. Beim Siebdruckprozess wird ein Sieb als Träger verwendet, auf dem eine strukturierte Schablonenschicht angebracht ist. Dies ist notwendig, um eine strukturierte Schicht auftragen zu können. Der Aufbau eines solchen Siebträgers mit Schablonenschicht ist in Abbildung 110 dargestellt.

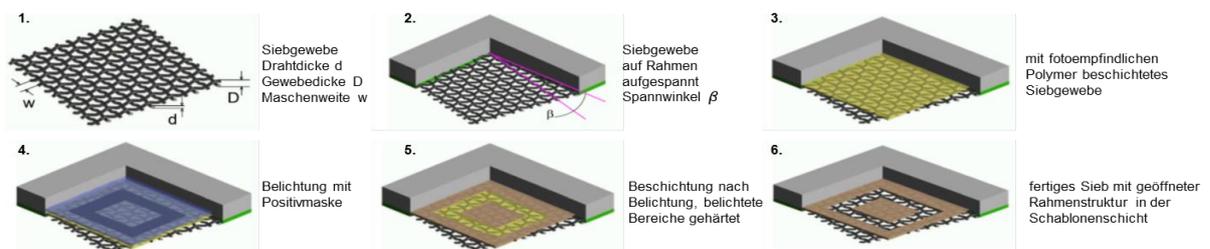


Abbildung 110 Aufbau strukturierter Siebträger für Siebdruck [48]

7.8.1 Reflowlöten

Das Reflowlöten ist ein Lötvorgang bei dem das Lot durch thermische Energie aufgeschmolzen wird und dann verfließt. Der Prozess kann in vier Schritte unterteilt werden:

- Aufbringen des Lotes
- Applizierung des Chips (aufsetzen)
- Aufschmelzen des Lotes
- Erstarren der Verbindung

Das Aufbringen des Lotes kann in verschiedenen Arten je nach Art des Lotes durchgeführt werden. Für pastenförmige Lote eignet sich beispielsweise eine Aufbringung durch einen Disperser (ähnlich einer Spritze bei der die Paste aus der Öffnung der Nadel gedrückt wird) oder ein Printverfahren (ähnlich dem Printverfahren bei der Aufbringung von Adhäsiven 7.7.5.5). Es ist aber auch möglich sogenannte preforms an der Lötstelle aufzulegen. Preforms sind Folien aus dem Lot die auf die gewünschte Form zugestanzt werden.

Die Applizierung des Chips wird meist maschinell durch so genannte Pick and Place Automaten vorgenommen, um eine hohe Wiederholgenauigkeit zu erhalten. Bei pastenförmigen Lotes ist keine spezielle Vorbehandlung der Oberflächen notwendig, da die pastöse Konsistenz meist ausreicht, um den Chip am applizierten Ort zu fixieren. Bei Preforms muss eine Art Verklebung des Untergrundes mit der Preform und der Preform mit dem Chip durchgeführt werden, damit es zu keinem Verrutschen kommt. Für diese Verklebung reicht aber meist schon das Auftragen eines Flussmittels aus. Diese Flussmittel sind ohnehin für den Lötvorgang wichtig, da Sie durch Reduktion mögliche Oxide an den Oberflächen auflösen. Diese Flussmittel sind auch in den Lötpasten vorhanden und müssen daher bei diesen nicht separat aufgebracht werden.

Das Aufschmelzen des Lotes wird durch den Eintrag thermischer Energie erreicht. Dieser thermische Energieeintrag wird beispielsweise über einen Ofen oder durch Infrarotstrahler erzeugt. Der thermische Eintrag, muss dabei so groß sein, dass das Lot über seine Liquidus-Temperatur erhitzt wird. Durch das Aufschmelzen benetzt das Lot die zu verbindenden Oberflächen, und die Flussmittel reduzieren die etwaig vorhandenen Oxide. Bestandteile des Lotes diffundieren dabei auch in die Oberfläche ein und erzeugen so eine eutektische Legierung zwischen der Oberfläche und dem Lot.

Beim Erstarren des Lotes durch eine Abkühlung (meist bei Raumtemperatur) nimmt das Lot bzw. die eutektische Legierung wieder den festen Aggregatzustand an, und es wurde somit eine stoffschlüssige Verbindung erzeugt.

7.8.2 Drahtbonden

Das Drahtbonden ist eine Methode zur elektrischen Kontaktierung von Chips, bei dem die Kontakte über Drähte mit den Gehäusekontakten verbunden werden. Durch das Drahtbonden werden so Höhenunterschiede ausgeglichen. Nach dem Drahtbonden werden die so verbundenen Chips und die Drähte meist in den Gehäusen mit sogenannten Moldcompounds eingegossen. Typische Verfahren für das Drahtbonden sind:

- Thermokompressionsbonden (Abbildung 112a)
- Ultraschallbonden (Abbildung 112b)
- Thermosonic-Drahtbonden

Bei dem Thermokompressionsbonden wird der Draht mit dem Pad durch Druck und thermische Energie verbunden. Der Draht reißt dabei die Oxidhaut auf, und durch intermetallische Diffusion entstehen atomare Bindungen. Dabei herrschen typischerweise Temperaturen bis ca. 300°C an der Fügestelle.

Das Ultraschallbonden ist ein Verfahren bei dem der Draht durch hochfrequente Ultraschallwellen unter leichtem Druck an der Oberfläche reibt. Wodurch wieder die Oxidschicht aufbricht, Druck und die Reibungswärme ermöglichen eine Annäherung der Oberflächen, bis eine metallische Verbindung entsteht. Der Vorteil dieser Verbindungsmethode ist, dass eine deutlich geringere thermische Belastung des Chips auftritt. Es werden typischerweise Temperaturen an der Fügestelle von ca. 80°C erreicht.

Das Thermosonic-Drahtbonden stellt eine Verfahrenskombination der beiden vorher beschriebenen Verfahren dar. Die Verbindung wird durch den Einsatz von thermischer Energie, Druck und hochfrequenten Ultraschallwellen erzeugt. Die dabei auftretenden typischen Temperaturen liegen bei ca. 120-200°C. [1]

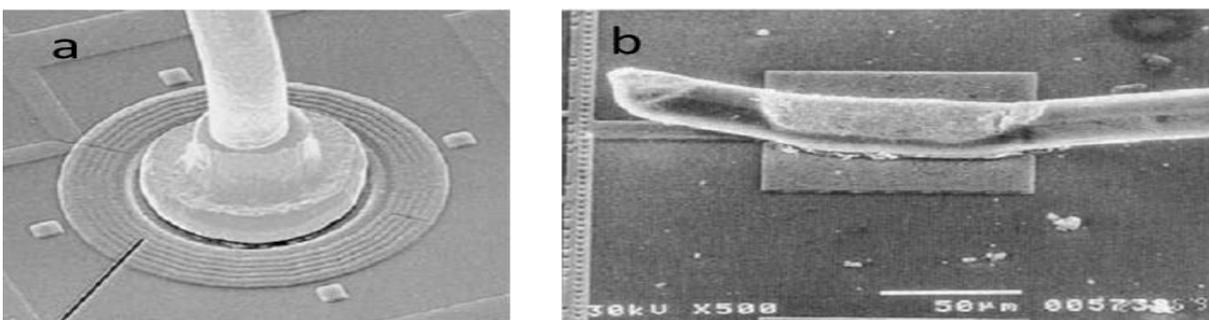


Abbildung 112 REM Aufnahmen von Drahtbondverfahren a) Nailheadbond durch Thermokompressionsbonden b) Ultraschall Wedge-Wedge Bond [1]

7.9 Vereinzlung

Als Vereinzeln werden Prozesse bezeichnet, bei denen Waferverbund der Chips aufgelöst wird. Nach dem Vereinzeln liegen keine Wafer mehr vor sondern nur mehr Einzelchips die

bei der Weiterprozessierung nur mehr einzeln gehandhabt werden können. Da so eine Einzelprozessierung der Chips im Vergleich zur Waferprozessierung sehr teuer ist, liegt das Vereinzeln möglichst weit am Ende der Prozesskette. Typische Vereinzelnprozesse sind:

- mechanisches Sägen
- Lasersägen
- Vereinzeln durch Schleifen
- Brechen

Das Vereinzeln durch mechanisches Sägen ist der derzeit am häufigsten eingesetzte Vereinzelnprozess. Der Prozessablauf ist dabei so gestaltet, dass der Wafer auf einen Sägeframe mit einer Sägefolie geklebt wird (Abbildung 113b). Über die Sägeframes und

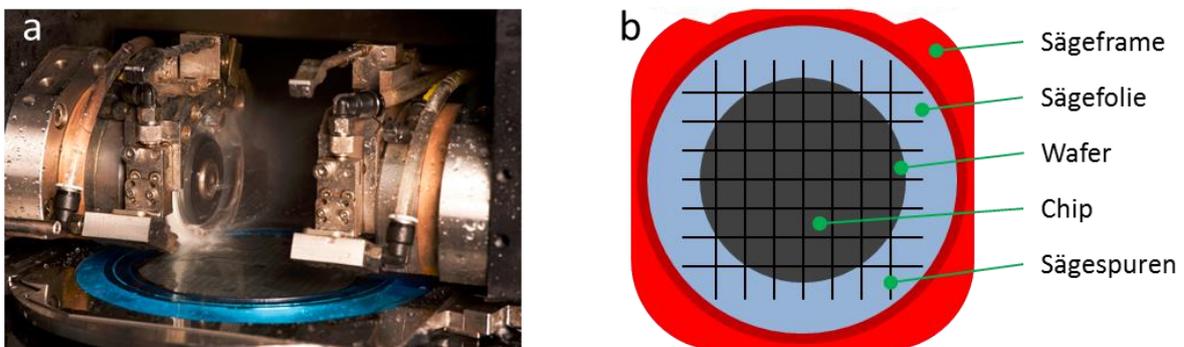


Abbildung 113 Sägen a) Bild während Sägevorgang [66], b) Prinzipskizze Sägeframe mit gemounteten Wafer und eingezeichneten Sägespuren

durch einen Chuck wird der Wafer in der Säge fixiert. Das Sägen selbst wird üblicherweise mit Diamantsägeblättern durchgeführt diese Sägeblätter haben üblicherweise eine Dicke von 50-200 μm . Durch hohe Drehzahlen zwischen 30000-50000 U/min stabilisiert das sehr dünne Sägeblatt seine Position (kein Verbiegen) während des Sägens (Abbildung 113a). Die Vorschubgeschwindigkeit der Säge liegt typischerweise bei 0,1-300 mm/s und der Sägevorgang wird von einer intensiven Wasserspülung begleitet. Die Wasserspülung dient einerseits zum Abtransport der durch das Sägen erzeugten Partikel andererseits zum Kühlen während des Prozesses. Die minimale Chip-Seitenkantenlänge für das Sägen liegt bei ca 500 μm , da sonst die Klebekraft auf der Folie nicht ausreicht und der Chip während des Sägens von der Folie geschleudert wird (flying dies). Nach dem Sägen wird die Folie belichtet wodurch die Klebekraft gesenkt wird, dadurch ist es möglich die Chips mittels Pick and Place Anlagen weiterzuprozessieren. Lasersägeprozesse und Vereinzeln durch Schleifen gewinnen zwar immer mehr an Bedeutung, da sie aber in dieser Arbeit nicht verwendet wurden, wird nicht näher darauf eingegangen. Das Brechen ist ein veralteter Prozess und wird eigentlich nur mehr bei Laboruntersuchungen angewendet. [1], [50]

8 Versuche

8.1 Versuche zur Glas-Strukturierung

Bei allen Versuchen zur Glas-Strukturierung wurde ein Borsilicatglas von Schott mit der Produktbezeichnung Borofloat33 verwendet. [20]

8.1.1 Nasschemisches Ätzen von Glas

Für die nasschemische Strukturierung von Glas ist eine genaue Kenntnis der Ätzrate notwendig, um die gewünschten Ätztiefe zu erreichen. Die Ätzung des Glases erfolgt mit einer Ätzlösung aus HF und Wasser. Die Ätzrate bei einer solchen Ätzung ist hauptsächlich von der Konzentration und der Prozesstemperatur abhängig. Dieser Zusammenhang (Ätzrate als Funktion von Konzentration und Temperatur) wurde in den folgenden Versuch ermittelt.

8.1.1.1 Versuchsaufbau

Für die Versuche zur Ätzratenbestimmung bei der nasschemischen Glasätzung wurde ein Glasgefäß (35*25*5cm) mit 4 Liter Wasser gefüllt und mit Magnetrührern bestückt. Das Gefäß wurde mit einer Folie verschlossen. In die Folie wurden zehn Löcher gleichmäßig verteilt geschnitten und mit Teflon-Bechern (a 30ml) bestückt. Die Becher hängen somit bis knapp unter die Oberkannte in einem Wasserbad. Dieser gesamte Aufbau (Abbildung 114) wurde auf eine Heizplatte mit Temperaturregelung über einen Temperaturfühler und über eine integrierte Vorrichtung zum Rühren mit Magnetrührern gestellt. Die Teflon Becher

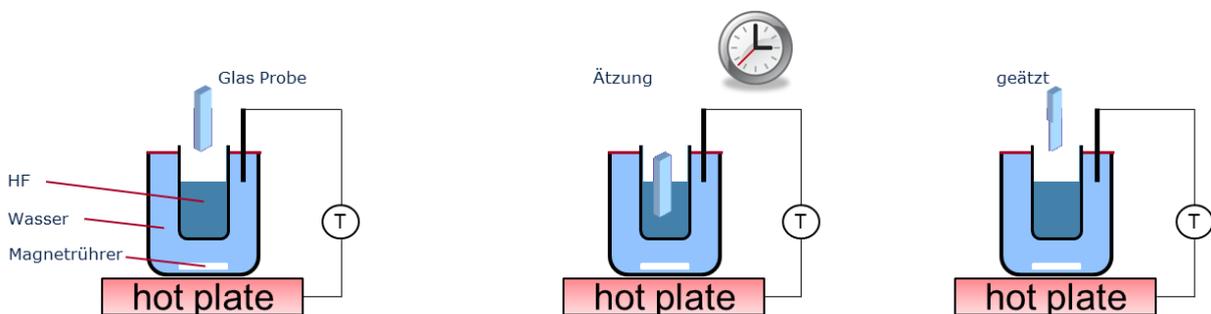


Abbildung 114 Versuchsaufbau zur Ätzratenbestimmung bei der Nasschemischen Glasätzung [23]

wurden jeweils mit 15 ml der gewünschten Ätzlösung gefüllt. Die Ätzproben wurden aus einem Glaswafer aus Borofloat 33 hergestellt, wobei jede Ätzprobe einen Glasquader mit den Abmessungen 10*30 mm und einer Dicke von 525 µm bildet. [27]

8.1.1.2 Versuchsdurchführung

Es wurden Ätzstaffeln durchgeführt, bei denen die Konzentration und die Temperatur variiert wurden. Die Ätzlösung war ein HF-Wasser Gemisch, dessen Konzentration in 5% Schritten in einem Bereich von 5 – 50 % variiert wurde. Die Temperatur wurde in einem Bereich von 25 – 50 °C in 5 °C Schritten verändert. Bei Versuchsbeginn wurde das Wasserbad über die Heizplatte auf die gewünschte Temperatur gebracht und abgewartet, bis die Ätzlösung erwärmt war. Die Ätzlösung in allen 10 Teflon Bechern hatte die gleiche Konzentration. Vor der Ätzung wurde die Ausgangsdicke der Ätzproben mittels einer Mikrometerschraube vermessen und protokolliert

Die eigentliche Ätzung startet durch gleichzeitiges Eintauchen aller 10 Ätzproben in die Ätzlösung, wobei die Ätzproben ca. bis zur Hälfte (15 mm) in die Ätzlösung eingetaucht wurden. Die Ätzung endete mit dem Entfernen der Ätzproben aus der Ätzlösung und einer sorgfältigen Wasserspülung zu unterschiedlichen Zeitpunkten.

Die Zeit zwischen Start und Ende der Ätzung wurde für jede Ätzprobe protokolliert. Im Anschluss an die Ätzung wurde von jeder Ätzprobe die Enddicke vermessen und protokolliert.

So konnte für jede Ätzprobe über die Dickenabnahme (bzw. die halbe Dickenabnahme) und die dafür benötigte Zeit eine Ätzrate bestimmt werden. Dies wurde für alle Konzentrationsschritte bei jedem Temperaturschritt durchgeführt. Der Versuchsumfang umfasste 600 Ätzproben. Die Ätzrate wurde für jeden Konzentrationspunkt bei jedem Temperaturpunkt über die 10 Ätzproben gemittelt. Somit wurden 60 Versuchspunkte im Konzentrations- und Temperaturbereich untersucht.

8.1.1.3 Ergebnisse und Ergebnisinterpretation

Die Ätzung erfolgte für jede Temperatur/Konzentrations-Kombination mit 10 Ätzungen. Die Ergebnisse dieser Ätzungen werden für eine Konzentration von 5% HF bei einer Temperatur von 25°C in Tabelle 12-12 dargestellt. Aus diesen Daten wurde eine mittlere Ätzrate für den Punkt 25°C und 5% mit 132,2 nm/min ermittelt. Diese Vorgehensweise ist nur zulässig, da die Ätzrate keine zeitliche Abhängigkeit aufweist. Die mittlere Ätzrate entspricht somit der Steigung der Geraden für die jeweilige Temperatur in dem für 5% HF dargestellten Diagramm (Abbildung 115).

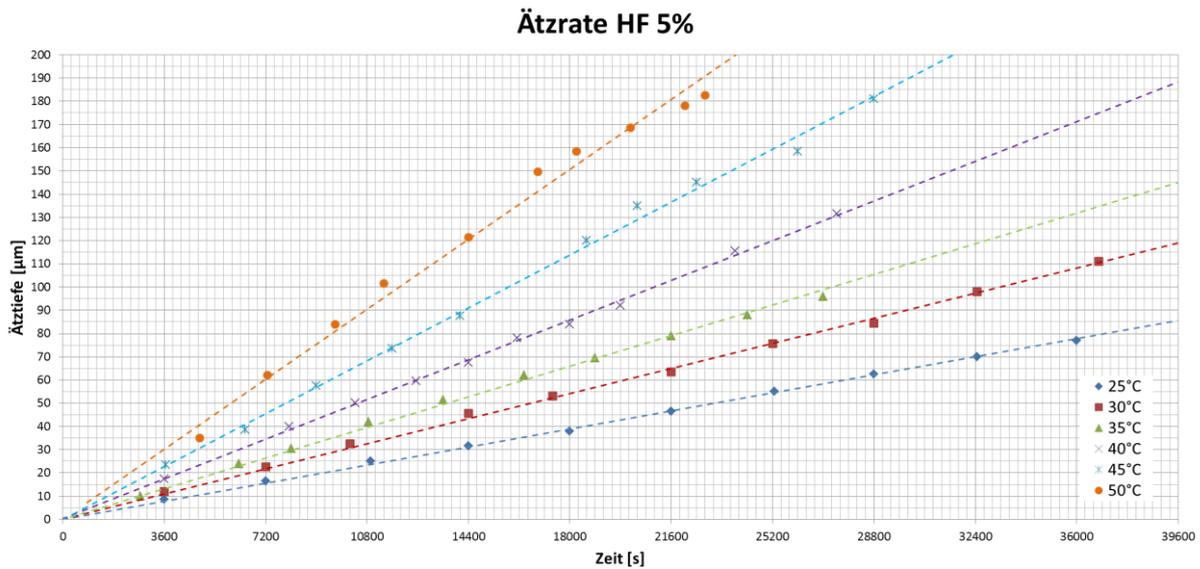


Abbildung 115 Ätzraten für 5% HF bei Temperaturen 25-50°C

Die Daten der Ätzungen bei den jeweiligen Temperaturen wurden zusammengefasst, und ein Diagramm für die Abhängigkeit der mittleren Ätzrate von der Temperatur erstellt. Zusätzlich wurden die Maximal- und Minimalwerte der Ätzraten jeder Temperaturgruppe in das Diagramm eingetragen (Abbildung 116).

Aus dem Diagramm ist ersichtlich, dass die Streuung der Ätzrate bei steigender Temperatur leicht zunimmt, jedoch beträgt die Differenz zwischen der maximalen und der minimalen Ätzrate im Diagramm bei 50°C lediglich 2 nm/s und ist damit sehr gering. Aus dem Diagramm ist ein exponentieller Verlauf der Ätzrate über die Temperatur erkennbar.

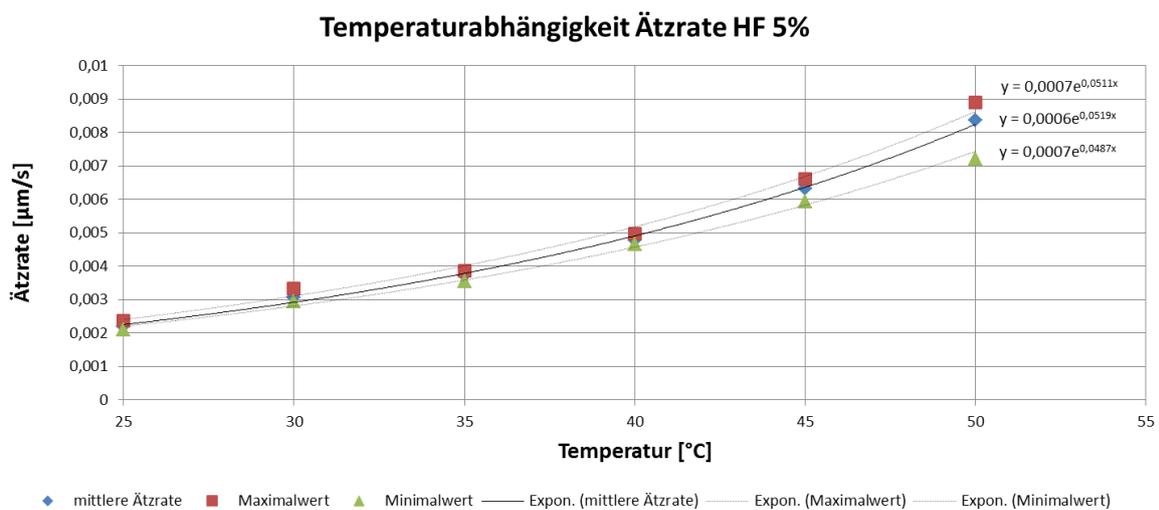


Abbildung 116 Temperaturabhängigkeit der Ätzrate bei 5% HF

Mit den weiteren Daten aus den Versuchsätzen wurde analog verfahren und in ein Diagramm zur Abbildung der Ätzrate über den gesamten Temperaturbereich (25-50°C) zusammengefasst (Abbildung 117). Für die weiteren Konzentrationen bzw. Temperaturen wurde analog vorgegangen. Diese Daten zu den mittleren Ätzraten über den gesamten Konzentrationsbereich (5 – 50 %HF) bzw. den gesamten Temperaturbereich wurden in Tabelle 12-13 zusammengefasst. Im Anschluss wurde ein Diagramm erstellt in dem die Ätzrate über den gesamten Konzentrationsbereich aufgetragen wurde (Abbildung 118).

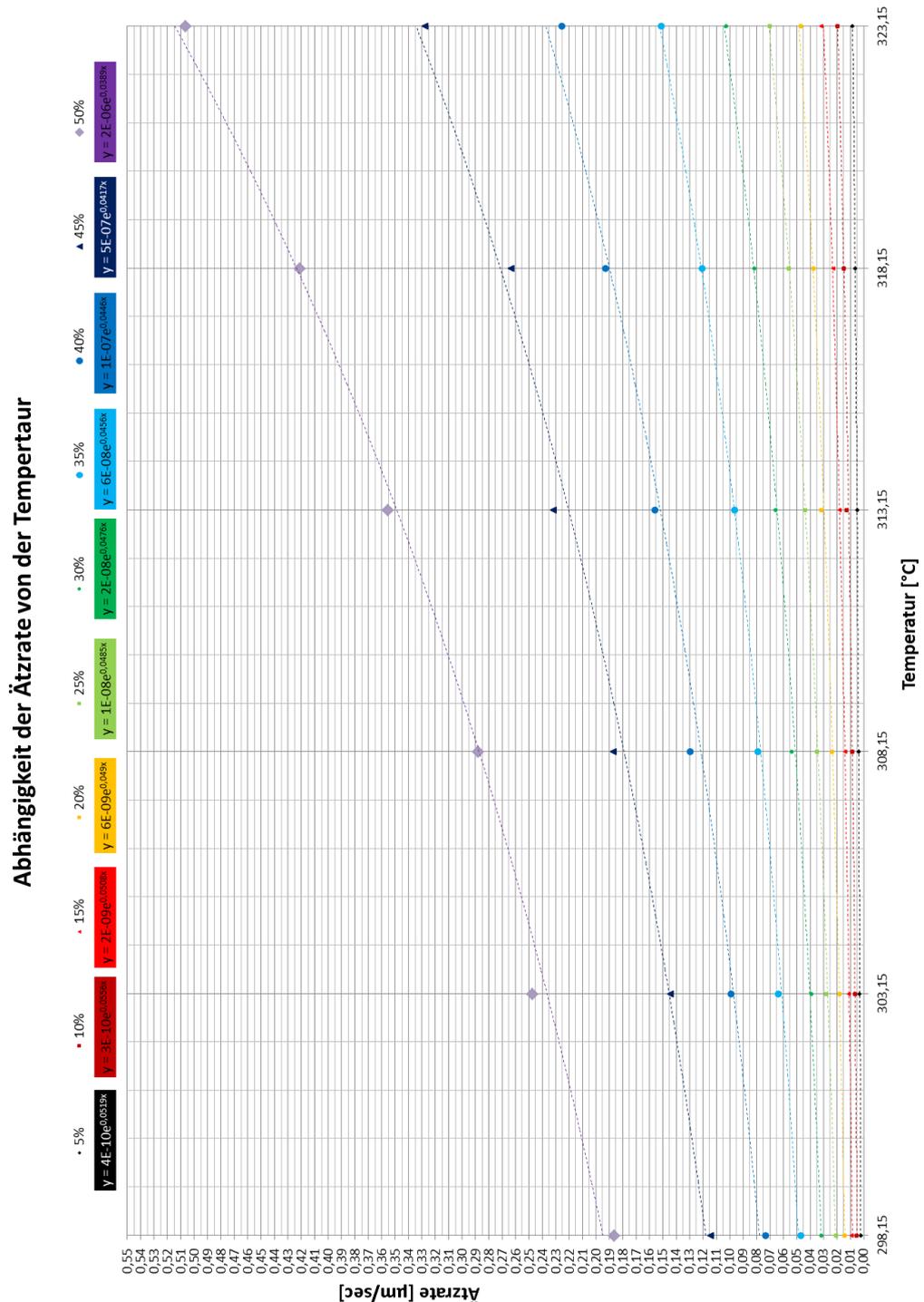


Abbildung 117 Temperaturabhängigkeit der Ätzrate bei Konzentrationen 5 - 50% HF

Abhängigkeit der Ättrate von der Konzentration

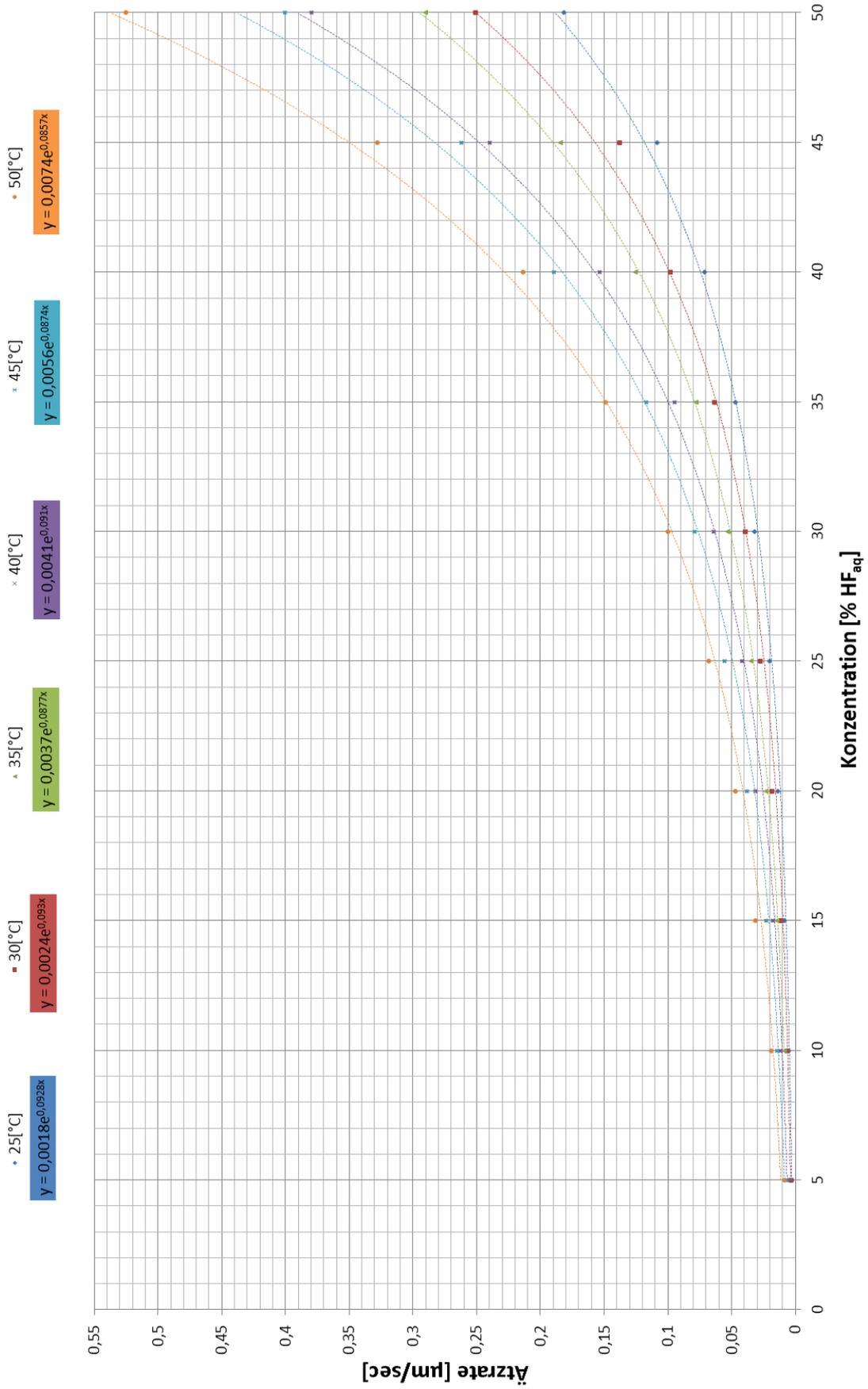


Abbildung 118 Konzentrationsabhängigkeit der Ättrate bei Temperaturen 25 - 50 °C

Die Konzentrationsabhängigkeit folgt dabei keinem Potenzgesetz sondern ist wie schon die Temperaturabhängigkeit von exponentieller Natur. Um dies zu verdeutlichen wurde ein weiteres Diagramm erstellt in dem die Ätzrate bei 25°C über den Konzentrationsbereich (5-50 %HF) einmal mit einer Exponentiellen-Trendlinie und einmal mit einer Potenz-Trendlinie gefittet wurde (Abbildung 119). Es ist deutlich ersichtlich, dass die Potenzfunktion dem

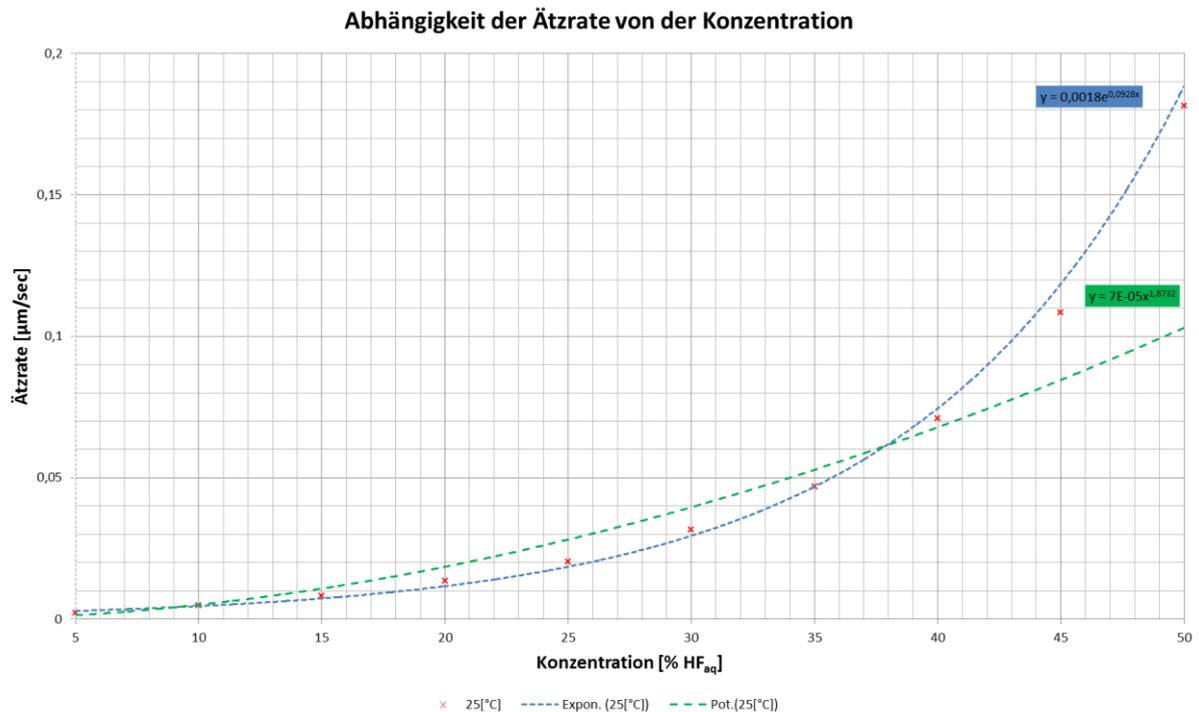


Abbildung 119 Ätzraten-Fit über Konzentrationsbereich bei 25 °C Exponentielle Funktion und Potenz Funktion

Verlauf der Messpunkte nicht gerecht wird. Um dieses Verhalten erklären zu können wurden zwei Annahmen betrachtet.

Annahme 1:

Der geschwindigkeitsbestimmende Teilschritt der Reaktion ist nicht ein chemischer Reaktionsschritt, sondern ein Transportschritt. Die Reaktionsgeschwindigkeit ist also abhängig von dem Transport der Edukte an die zu ätzende Oberfläche.

In den Versuchen zur nasschemischen Ätzung von Glas wurden zu jedem Temperaturpunkt und jedem Konzentrationspunkt jeweils 10 Versuchsätzungen durchgeführt. Diese 10 Ätzungen wurden so durchgeführt, dass die gesamt Ätzzeit bei jeder Ätzung ansteigt. Diese so erhaltenen Punkte wurden für jedes Konzentrations/Temperatur Paar in ein Diagramm eingetragen. Über dieses Diagramm wurde die Ätzrate ermittelt, da die Ätzrate die Steigung dieses Verlaufes darstellt. Dieser Verlauf war eindeutig linear, daher konnte eine konstante Ätzrate angenommen werden (Abbildung 120). Würde nun eine Transportbeschränkung der

Reaktion vorliegen, müsste diese die Reaktionsgeschwindigkeit, also die Steigung beeinflussen. Solche Beeinflussungen könnten beispielsweise ein starker Anstieg zu Beginn des Versuches (rot in Abbildung 120) oder eine schleichende Abweichung von der Graden (grün in Abbildung 120) sein. Im roten Fall würde die Anfangssteigung die Reaktionsgeschwindigkeit der rein chemischen Reaktion darstellen, da anfangs noch keine Edukte zur Oberfläche transportiert werden müssen und im weiteren Bereich stellt die Steigung die Reaktionsgeschwindigkeit mit Transportlimitierung dar. Im grünen Fall könnte für dieses Verhalten z.B. der Aufbau einer Passivierungsschicht verantwortlich sein, die mit fortlaufender Zeit immer dicker wird, wodurch sich der Diffusionsweg der Edukte durch die Schicht verlängert. Da in den 60 Versuchsdiagrammen keine Abweichungen von einem linearen Verhalten, bei dem die Fitgerade den 0 Punkt schneidet, erkennbar sind, wird eine Transportlimitierung für unwahrscheinlich erachtet.

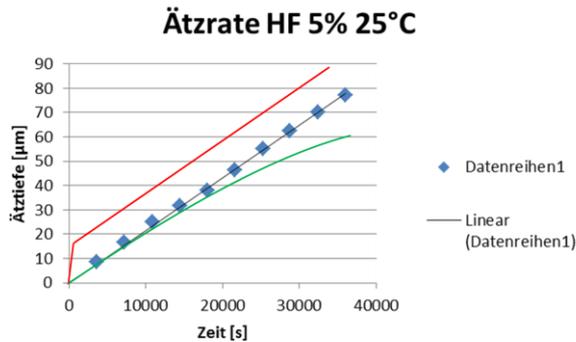


Abbildung 120 Linearer Verlauf der Äztiefe über die Zeit bei 5%HF und 25°C mit möglichen Abweichungen durch Transportlimitierung

Reaktionsgeschwindigkeit der rein chemischen Reaktion darstellen, da anfangs noch keine Edukte zur Oberfläche transportiert werden müssen und im weiteren Bereich stellt die Steigung die Reaktionsgeschwindigkeit mit Transportlimitierung dar. Im grünen Fall könnte für dieses Verhalten z.B. der Aufbau einer Passivierungsschicht verantwortlich sein, die mit fortlaufender Zeit immer dicker wird, wodurch sich der Diffusionsweg der Edukte durch die Schicht verlängert. Da in den 60 Versuchsdiagrammen keine Abweichungen von einem linearen Verhalten, bei dem die Fitgerade den 0 Punkt schneidet, erkennbar sind, wird eine Transportlimitierung für unwahrscheinlich erachtet.

Annahme 2:

Annahme 2:

Der Ätzangriff erfolgt nicht nur durch Flusssäure allein, sondern in Parallelreaktionen auch über die Protolyse und Polymerisationsprodukte der Flusssäure. Die Reaktionsgeschwindigkeit stellt daher eine Superposition der Parallelreaktionen dar. Die einzelnen Parallelreaktionen weisen dabei das Verhalten einer Potenzfunktion auf. Durch die Superposition zeigt sich jedoch ein annähernd exponentielles Verhalten.

Die Bruttogesamtreaktion der Siliziumdioxid Ätzung mittels Flusssäure wird im Allgemeinen mit der Reaktionsgleichung (Gl. 8.1) angegeben.



[51]

Die Annahme sagt jedoch aus, dass der Ätzangriff nicht nur über die Flusssäure allein erfolgt. Daher stellt sich die Frage, welche Spezies noch in der Ätzlösung sind. Die laut Literatur bekannten Spezies sind in den folgenden Reaktionsgleichungen (Gl. 8.2) - (Gl. 8.6) anhand ihrer Entstehung angegeben.



[51]



[51]



[52]



[51]



[52]

Über die Gleichgewichtskonstanten $K_1=6,85 \cdot 10^{-4}$ mol/liter für (Gl. 8.2), $K_2=3,963$ liter/mol für (Gl. 8.3) und $K_3=2,7$ liter/mol für (Gl. 8.5) können die Gleichgewichtszusammensetzungen wie in Abbildung 121 dargestellt berechnet werden.

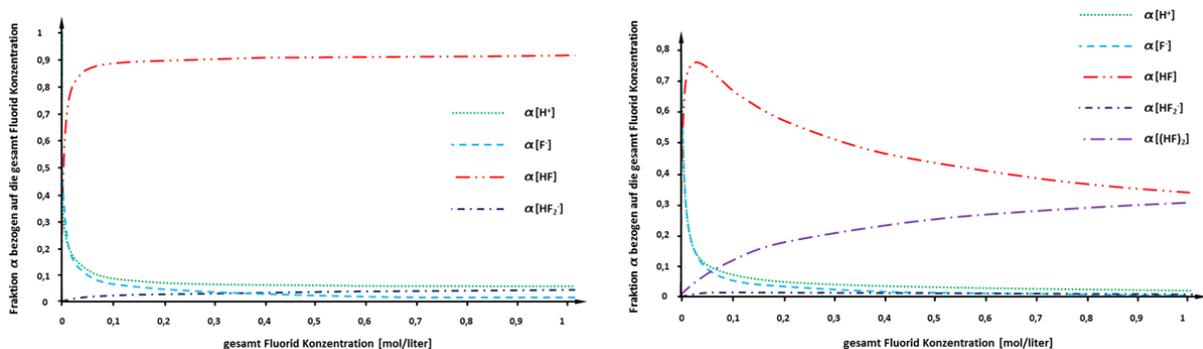


Abbildung 121 Berechnete Fraktionen α der Komponenten als eine Funktion der Fluorid Konzentration ohne und mit der Dimerisationsreaktion (Gl. 8.5) [52]

Aus Abbildung 121 ist ersichtlich, dass sich die Zusammensetzung durch Berücksichtigung einer weiteren Spezies sehr stark verändert. Es wird davon ausgegangen, dass die unterschiedlichen Spezies mit unterschiedlichen Ätzraten zur gesamt Ätzrate beitragen. Durch die Superposition der einzelnen Ätzraten entsteht der annähernd exponentielle Zusammenhang zwischen der gesamt Ätzrate und der Konzentration. Diese Annahme kann den exponentiellen Zusammenhang zwischen Ätzrate und Konzentration erklären und wird auch von der Literatur [51] als zutreffend erachtet.

Für die gesamt Ätzrate ist die genaue Kenntnis der Ätzraten der einzelnen Reaktionen hinter dem Ätzangriff nicht zwingend erforderlich, daher wurde ein empirischer Ansatz zur Berechnung der Ätzrate in Abhängigkeit von Temperatur und Konzentration gewählt. Hierzu wurden die Messdaten aus den 600 Versuchsätzungen herangezogen und ein 3D-Diagramm (Abbildung 122) erstellt. Mit den Messdaten wurde auch eine Gleichung (Gl. 8.7) mittels des LMA (Levenberg - Marquardt Algorithmus) bestimmt.

$$r = A_1 * e^{(k*T+d)*C+b_1*T} \tag{Gl. 8.7}$$

			[27]
A_1$	.....	6,93327*10^{-12}$	(Empirischer Faktor mittels LMA)
b_1	.....	0,0650479	(Empirischer Faktor mittels LMA)
k	.....	- 0,00055894	(Empirischer Faktor mittels LMA)
d	.....	0,260397	(Empirischer Faktor mittels LMA)

Die maximalen Abweichungen der Daten aus den Ätzraten der Versuchsätzungen zu der entwickelten Fitfunktion betragen ca. $\pm 0,01$ [$\mu\text{m}/\text{sec}$] und der mittlere Fehler beträgt ca. $0,00025$ [$\mu\text{m}/\text{sec}$], die Gleichung wird als hinreichend genau betrachtet. Die berechneten Ätzraten konnten auch mit Erfahrungswerten aus der Fertigung mit einer SAT abgeglichen werden und stimmten mit diesen gut überein. [27], [51], [53], [38]

Abhängigkeit der Ättrate von Konzentration und Temperatur von HF bei Borofloat-Glas

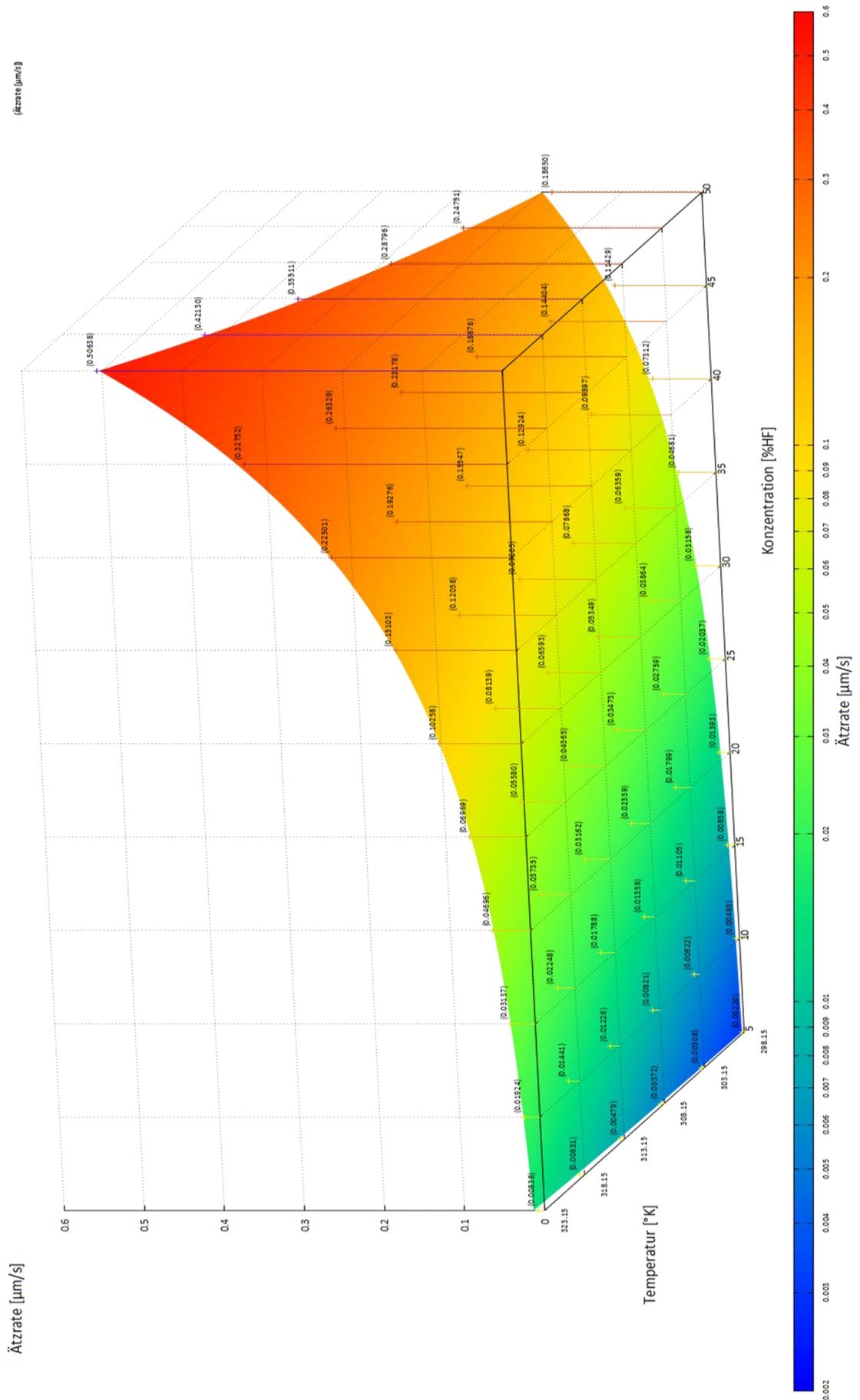


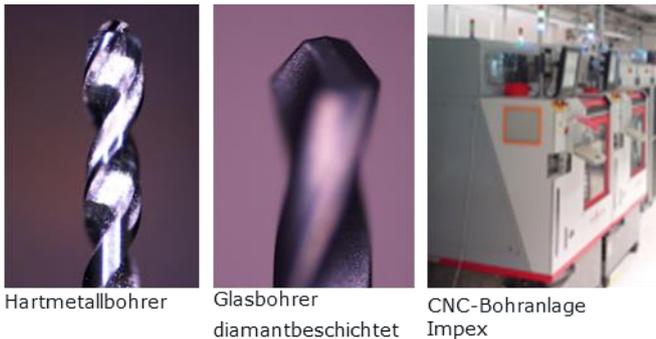
Abbildung 122 Ättrate in Abhängigkeit von Temperatur und Konzentration [23]

8.1.2 Versuche zum mechanischen Bohren und Laserablation von Glas

Die Versuchsproben für das mechanische Bohren von Glas sowie die Versuchsproben für die Laserablation wurden von Infineon bereitgestellt und die Strukturierungen wurden von der Impex Leiterplatten GmbH durchgeführt.

8.1.2.1 Mechanisches Bohren von Glas

Die Proben für das mechanische Bohren wurden als Standardglaswafer 6" aus Borofloat 33 bereitgestellt. Die verwendete Bohranlage war eine vollautomatische CNC-Anlage, als



Bohrwerkzeuge (Abbildung 123) wurden ein Hartmetallbohrer mit einem Durchmesser von 1000µm und ein diamantbeschichteter Glasbohrer mit einem Durchmesser von 350µm eingesetzt. Die Bohrungen wurden als Bohren in ein Vollmaterial mit ausreichender Kühlung (Wasser) ausgeführt.

Abbildung 123 Bohrer und CNC Bohranlage für Glasbohrungen

8.1.2.2 Laserablation von Glas

Die Proben für die Laserablationsversuche wurden wie schon beim mechanischen Bohren in Form von Standardglaswafer 6" aus Borofloat 33 bereitgestellt. Die Bohrungen wurden bei Impex mit einem Laserbearbeitungszentrum Picodrill von der Fa. Schmoll Maschinen GmbH durchgeführt. Picodrill ist ein Laserbearbeitungszentrum mit einem Picosekundenlaser dessen Laserleistung ca. 50 W und einer Pulsspitzenleistung von max. 70 MW liegt. Die Laserbohrungen werden als Array 9*9 Bohrungen ausgeführt. Die Analyse der erzeugten Bohrungen wurde bei Infineon mit Hilfe von Lichtmikroskopie und Rasterelektronenmikroskopie durchgeführt.

8.1.2.3 Ergebnisse und Ergebnisinterpretation

Das mechanische Bohren konnte die Erwartungen hinsichtlich Qualität der Bohrungen nicht erfüllen. Auch durch Anpassung der Prozessparameter konnte kein Prozessfenster gefunden werden in dem die Ausbrüche an den Bohrungskanten oder speziell beim Austritt des Bohrers aus dem Vollmaterial unterbunden werden konnten. Die Haltbarkeit der verwendeten Bohrwerkzeuge konnte ebenfalls die Erwartungen nicht erfüllen. So wurden beide Varianten, also der Hartmetall Bohrer und der diamantbeschichtete Glasbohrer, nach 5 Bohrungen begutachtet. Aus dem Vergleich mit neuen Bohrern, dargestellt in Abbildung 124, ist zu erkennen, dass der Hartmetallbohrer nach bereits 5 Bohrungen unbrauchbar war und der diamantbeschichtete Bohrer bereits Abnützungserscheinungen aufweist.



Abbildung 124 Verschleiß Bohrwerkzeuge nach 5 Glasbohrungen

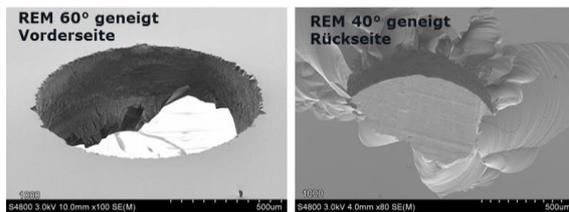


Abbildung 125 REM Bilder mechanisches Bohren mit Hartmetallbohrer

Rasterelektronenmikroskopaufnahmen der mit dem Hartmetallbohrer hergestellten Bohrungen sind in Abbildung 125 dargestellt. Die Qualität der Bohrungen entspricht aufgrund der großflächigen Ausbrüche jedoch nicht den Anforderungen.

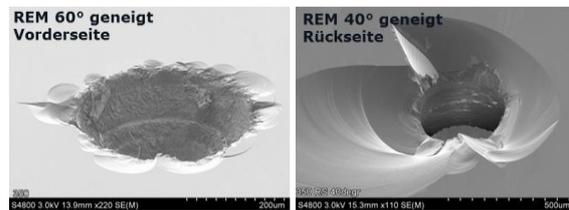


Abbildung 126 REM Bilder mechanisches Bohren mit diamantbeschichtetem Glasbohrer

Die Rasterelektronenmikroskopaufnahmen der mit dem diamantbeschichteten Glasbohrer hergestellten Bohrungen sind in Abbildung 126 dargestellt. Auch hier entspricht die Qualität der Bohrungen, aufgrund der Ausbrüche, nicht den Anforderungen, wobei die Ausbrüche auf der Glasvorderseite deutlich geringer als bei dem Hartmetall-Bohrer waren.

Da die Anforderungen für das Bohren der Anschlusslöcher durch mechanisches Bohren nicht erfüllt werden konnten wurde dieser Ansatz verworfen.

Das Laserbohren von Glas wurde, wie schon beim mechanischen Bohren durch Rasterelektronenmikroskopie hinsichtlich Qualität beurteilt (dargestellt in Abbildung 127). In den Bildern ist zu erkennen, dass die Beschädigung des Grundmaterials deutlich geringer ist als beim mechanischen Bohren. An der Vorderseite sind leichte Aufschmelzungen im Bereich der Kante vorhanden an der Rückseite sind ebenfalls leichte Beschädigungen der Kante erkennbar. Wobei im Gegensatz zu dem mechanischen Bohren die Kante an der Vorderseite tendenziell stärker beschädigt ist als die Kante der Rückseite (beim mechanischen Bohren genau umgekehrt). Die Qualität der Laserbohrungen kann als sehr gut bezeichnet werden, da nur sehr geringe Schädigungen an den Kanten von Ein- bzw. Austritt vorhanden waren und auch keine (Mikro-) Risse des Grundmaterials

aufgetreten sind. Aus diesen Gründen stellt das Laserbohren die Methode der Wahl dar bei Fertigung der Anschlusslöcher bei Variante 1 dar.

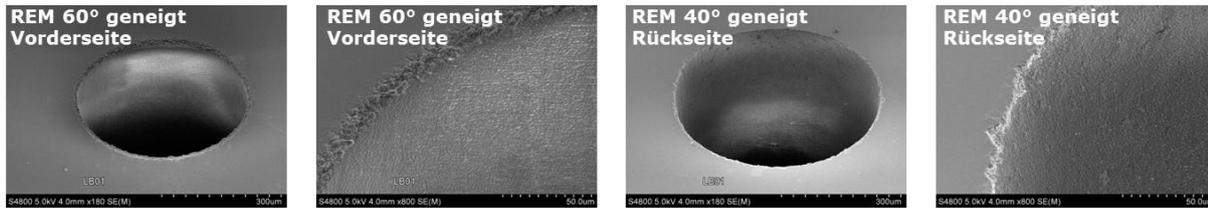


Abbildung 127 Auflichtmikroskopie und REM Bilder Laserbohren mit Picosekundenlaser

Aufgrund der guten Ergebnisse beim Laserbohren wurden noch Versuche für zwei Spezialfälle durchgeführt.

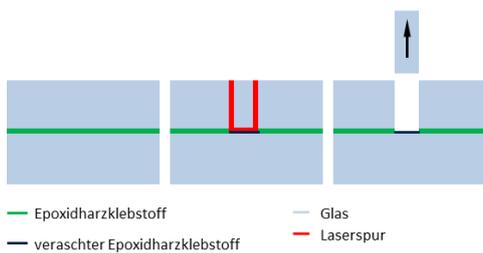


Abbildung 128 Versuch
Laserablation Spezialfall 1

Spezialfall 1: Es wurden 2 Glaswafer mit einem Epoxidharzklebstoff verklebt und im Bereich der Bohrung mit dem Laser wieder gelöst (Veraschung) ohne den unteren Glaswafer zu beschädigen. In Folge wurde dann im Bereich der Veraschung ein Ring mit dem Laser in den oberen Glaswafer geschnitten und der so entstandene Stöpsel entfernt. Die Versuche konnten die Erwartungen erfüllen, da keinerlei Beschädigungen des unteren Glaswafers gefunden werden konnten.

Spezialfall 2: Es wurden 2 Glaswafer, wobei ein Glaswafer mit 10 µm Kupfer beschichtet wurde, mit Epoxidharz verklebt, sodass die Metallschicht zwischen den beiden Wafern war. Der gesamte Schichtaufbau mit den Verbindungsschichten, die für die Haftung des Kupfers am Glas notwendig sind, ist in Abbildung 129 dargestellt.

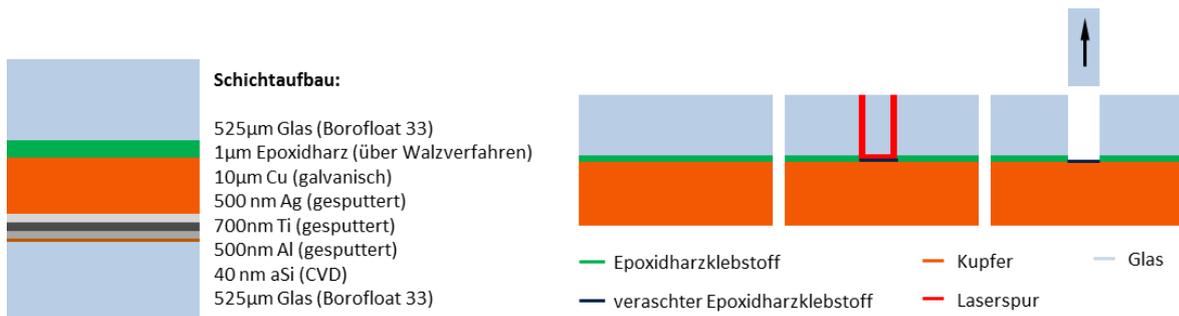


Abbildung 129 Versuch Laserablation Spezialfall 2

Die Versuchsdurchführung war analog zu Spezialfall 1 und das Augenmerk wurde auf eine mögliche Beschädigung der Metallschicht durch die Veraschung des Epoxidharzes bzw. durch das Ringschneiden gelegt. Die Versuchsergebnisse zeigten nur eine geringe Schädigung der Kupferschicht bis zu einer Tiefe von <math><1\mu\text{m}</math>, was als akzeptabel bewertet wurde.

8.2 Versuche zu Waferverbindungstechniken

Die Versuche wurden in Zusammenarbeit mit Frau B.Sc. Julia Hassler im Rahmen ihrer Bachelorarbeit bei Infineon durchgeführt. [49]

8.2.1 Probenherstellung für die Untersuchungen

Die Proben bestehen bei allen untersuchten Verbindungsmethoden aus 2 Glasplättchen, die miteinander je nach Verbindungstechnik nach Herstellerangaben verbunden wurden. Die Daten für Epoxidharz (Epo-Tek 353ND) und den anodischen Bond stammen aus Datenblättern der Hersteller und Erfahrungswerten bei Infineon. Die verwendeten Glasplättchen hatten eine Größe von 5x5 mm

8.2.1.1 *Keramische Adhäsive*

Die Auswahl der Untersuchungen viel aufgrund der Randbedingungen auf 3 keramische Adhäsive der Firma Newport. Die ausgewählten Adhäsive waren Omegabond 600, Omegabond 700 und Omegabond CC. Aufgrund der schlechten Verarbeitbarkeit von Omegabond 600, die bei der Probenherstellung augenscheinlich wurde, wurde der Omegabond 600 von den Untersuchungen ausgeschlossen.

Verbindungsherrstellung Omegabond 700:

Omegabond 700 besteht aus einem Pulver das nach der Gebrauchsanweisung im Datenblatt mit Wasser gemischt wird. Das Mischungsverhältnis war 80 Gew% der Pulverkomponente und 20 Gew% Wasser, um das pastenförmige keramische Adhäsiv herzustellen. Die Paste wurde manuell auf den unteren Probenkörper aufgetragen (siehe 7.7.5.1), und der obere Probenkörper aufgesetzt. So wurden 5 Probensamples aufgebaut und mit einer Metallplatte beschwert (Druck ca. 30 kPa). Die Aushärtung bei Omegabond 700 ist eine Härtung durch eine chemische Reaktion der Komponenten, die bei ca. 82°C für 4h in einem Ofen durchgeführt wurde. Die Bestimmung der Dicke der Klebeschicht wurde an den fertigen Probesamples im Zuge der REM-Untersuchung durchgeführt.

Verbindungsherrstellung Omegabond CC:

Omegabond CC besteht aus einem Pulver (Filler) und einem Bindemittel (Binder), das nach Datenblatt mit Wasser gemischt wird. Das Mischungsverhältnis war 75 gew% der Pulverkomponente (Filler) und 25 gew% des Bindemittels (Binder) um das pasten- förmige keramische Adhäsiv herzustellen. Die Paste wurde manuell auf den unteren Probenkörper

aufgetragen (siehe 7.7.5.1) und der obere Probenkörper aufgesetzt. So wurden 5 Probensamples aufgebaut und mit einer Metallplatte beschwert (Druck ca. 30 kPa). Die Aushärtung bei Omegabond CC ist eine Härtung durch eine chemische Reaktion der Komponenten die bei ca. 105°C für 3h in einem Ofen durchgeführt wurde. Die Bestimmung der Dicke der Klebeschicht wurde an den fertigen Probesamples im Zuge der REM-Untersuchung durchgeführt.

8.2.1.2 Glaslote

Die Auswahl der verwendeten Glaslote wurde mit 2 bleihaltigen (Ferro 11-036, Ferro 11-155) und 2 bleifreien Glasloten (DieMat J203, Ferro 11-205) getroffen.

Verbindungsherstellung Ferro 11-036 (bleihaltig):

Ferro 11-036 besteht aus einer Paste die mittels eines Siebdruckverfahrens auf den unteren Probenkörper aufgetragen wurde. Die Härtung erfolgt über einen Temperaturprozess beginnend mit der Trocknungszyklus bei 100-120°C für 7-10min. Gefolgt von dem Binder-Burnout bei 295°C für 20-30min und dem Glazing bei 400-425°C für 5-15min. Im Anschluss wird der obere Probenkörper aufgelegt und mit einer Metallplatte beschwert (Druck ca. 30 kPa). Dieser Aufbau wird noch dem Sealing unterzogen, einem Temperaturzyklus 425-450°C für 15-30min.

Verbindungsherstellung Ferro 11-155 (bleihaltig):

Ferro 11-155 besteht aus einer Paste die mittels eines Siebdruckverfahrens auf den unteren Probenkörper aufgetragen wurde. Die Härtung erfolgt über einen Temperaturprozess beginnend mit der Trocknungszyklus bei 100-120°C für 10-15min. Gefolgt von dem Binder-Burnout bei 360°C für 20-30min und dem Glazing bei 425-450°C für 5-15min. Im Anschluss wird der obere Probenkörper aufgelegt und mit einer Metallplatte beschwert (Druck ca. 30 kPa). Dieser Aufbau wird noch dem Sealing unterzogen, einem Temperaturzyklus 475-550°C für 15-30min.

Verbindungsherstellung DieMat J203 (bleifrei):

DieMat J203 besteht aus einer Paste die mittels eines Siebdruckverfahrens auf den unteren Probenkörper aufgetragen wurde. Die Härtung erfolgt über einen Temperaturprozess beginnend mit der Trocknungszyklus bei 100°C für 10-15min. Gefolgt von dem Binder-Burnout bei 250°C für 30-60min und dem Glazing bei 500°C für 1min. Im Anschluss wird der obere Probenkörper aufgelegt und mit einer Metallplatte beschwert (Druck ca. 30 kPa). Dieser Aufbau wird noch dem Sealing unterzogen, einem Temperaturzyklus 480-520°C für 2-10min.

Verbindungsherstellung Ferro 11-205 (bleifrei):

Ferro 11-205 besteht aus einer Paste die mittels eines Siebdruckverfahrens auf den unteren Probenkörper aufgetragen wurde. Die Härtung erfolgt über einen Temperaturprozess beginnend dem Binder-Burnout bei 295°C für 20-30min und dem Glazing bei 410-425°C für 5-15min. Im Anschluss wird der obere Probenkörper aufgelegt und mit einer Metallplatte beschwert (Druck ca. 30 kPa). Dieser Aufbau wird noch dem Sealing unterzogen, einem Temperaturzyklus 430-460°C für 15-30min.

8.2.2 REM/EDX Untersuchungen der Glaslote und der keramischen Adhäsive

Es wurden Schlitze von den Proben erzeugt und Bilder mittels Rasterelektronenmikroskopie erzeugt. Auf diesen Bildern wurde die Dicke der Klebeschicht bestimmt und die Qualität der Verbindung im Hinblick auf Lunker, Verteilung von Körnern und Rissen der Schicht beurteilt.

Mittels der energiedispersiven Röntgenspektroskopie (EDX) wurden die Inhaltsstoffe der Glaslote und der keramischen Klebstoffe untersucht, da die Herstellerangaben zu den Inhaltsstoffen sehr vage bis nicht vorhanden waren. Da aber in der Halbleiterindustrie die Kontamination und die Querverschleppung immer große Probleme darstellen wurden diese Untersuchungen durchgeführt.

8.2.3 Untersuchungen zur mechanischen Festigkeit (Scherversuche)

Die Scherkraftuntersuchungen wurden durchgeführt, um die mechanische Festigkeit der

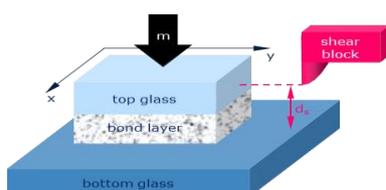


Abbildung 130 Prinzipieller Aufbau der Scherkraftuntersuchung

Verbindungen zu überprüfen. Die Überprüfung wurde wie in Abbildung 130 dargestellt durchgeführt. Der Schermeißel wird am Deckglas im Abstand d_s (ca. 200 μm bzw. bei Omegabond CC bei ca. 350 μm) angesetzt. Die Kraft F wird kontinuierlich gesteigert, bis die Verbindung schlagartig bricht. Der Probenumfang jeder untersuchten Verbindungsmethode waren 5 Scherungen, aus diesen 5 Scherungen wurde jeweils

ein Mittelwert als Ergebnis der mittleren Schubspannung gebildet. Der anodische Bond kann als Referenz angesehen werden, da aufgrund der direkten chemischen Verbindung die maximal mögliche Scherkraft, für eine solche Verbindung, auftreten sollte. [30]

8.2.4 Ergebnisse und Ergebnisinterpretation

REM Untersuchungen keramische Adhäsive:

Aufgrund der schlechten Verarbeitbarkeit wurde, wie bereits erwähnt, der Omegabond 600 von den weiteren Untersuchungen ausgeschlossen. In Abbildung 131 ist zu

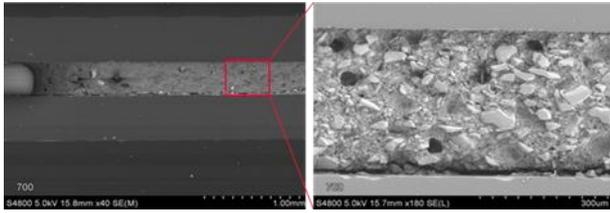


Abbildung 131 REM Aufnahmen Omegabond 700 [33]

sehen, dass der Omegabond 700 eine körnige Struktur mit einer maximalen Partikelgröße von ca. 90 µm und einer inhomogener Verteilung aufweist. Die Gesamtdicke der Verbindungsschicht war ca. 310 µm. Auffällig sind Lunker die bei Folgeprozessen zu Problemen führen

könnten. An der oberen Grenzfläche waren keine Auffälligkeiten am REM-Bild (Abbildung 131) zu erkennen. Der Riss am unteren Glas stammt von der Präparation. [30]

Im Vergleich dazu weist der Omegabond CC ebenfalls eine körnige Struktur mit Partikeln,

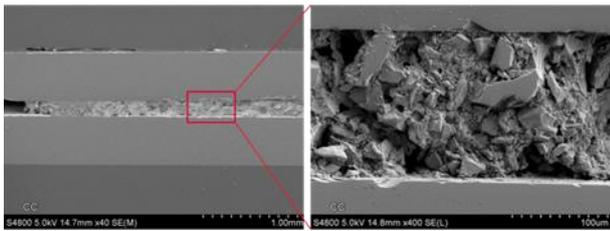


Abbildung 132 REM Aufnahmen Omegabond CC [33]

die in etwa derselben Größe entsprechen jedoch eine gröbere Verteilung aufweisen und somit noch inhomogener sind als beim Omegabond 700, auf. Auch der Omegabond CC (Abbildung 132) weist eine große Zahl an Lunkern auf die für Folgeprozesse als problematisch angesehen werden müssen. Der bei der Präparation stärker ausgeprägte Verlust an Bindesubstanz lässt eine

schlechtere intrinsische Kohäsion vermuten. Jedoch ist nicht abzuschätzen in wie fern sich dies auf die übertragbaren Scherkräfte auswirkt, da der Bruch, in der Zwischenschicht (Verlust der Kohäsion), an der Grenzfläche (Verlust der Adhäsion) oder als Mischform auftreten kann. Die Gesamtdicke der Verbindungsschicht wurde mit ca. 150 µm bestimmt. [30]

REM Untersuchungen Glaslotverbindungen:

Die Glaslote können in die Glaslote mit Blei (Abbildung 133) und in die bleifreien Glaslote (Abbildung 134) unterteilt werden. Bei den Glasloten mit Blei ist eine sehr homogene

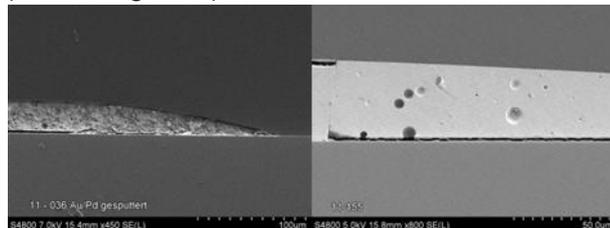


Abbildung 133 REM Aufnahmen Glaslote mit Blei Ferro 11-036 und Ferro 11-155 [30]

Verteilung ersichtlich. Die Struktur ist somit im Gegensatz zu den bereits beschriebenen keramischen Adhäsiven nicht mehr körnig, allerdings treten auch hier Lunker auf die jedoch sehr klein sind und somit auch weniger kritisch sind, wobei das Glaslot 11-036 deutlich weniger Lunker aufweist. Die Risse sind wieder wie schon bei den keramischen Adhäsiven auf die Präparation

zurückzuführen. Wie in Abbildung 6 zu erkennen ist, ist bei dem Glaslot 11-155 die Kohäsion

besser als bei Glaslot 11-036, da der Substanzverlust durch das Präparieren nahezu nicht vorhanden ist. Die Gesamtdicke der Verbindungsschicht wurde bei Ferro 11-036 mit ca. 30 µm und bei Ferro 11-150 mit ca. 40 µm bestimmt.

Die Bleifreien Glaslote Ferro 11-205 und DieMat J203 haben ebenfalls eine homogene

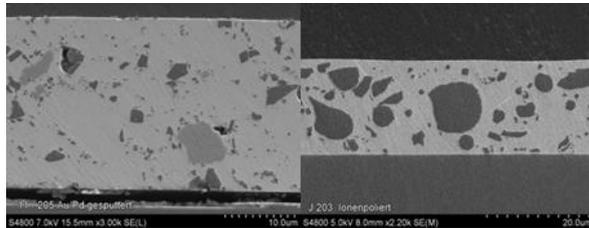


Abbildung 134 REM Aufnahmen Glaslote Bleifrei Ferro 11-205 und DieMat J203 [30]

Struktur, allerdings sind in den REM Bildern (Abbildung 134) im Vergleich mit den Glasloten mit Blei (Abbildung 133) Ausscheidungen auffällig. In diesen Ausscheidungen konnten in weiteren Untersuchungen (EDX Untersuchungen keramische Adhäsive) die Elemente bestimmt werden.

Bei dem Ferro 11-036 Glaslot bestehen die helleren Ausscheidungen aus Kohlenstoff, Silizium und Sauerstoff die dunkleren Ausscheidungen aus Bismut, Silizium, Aluminium, Magnesium, Zink, Sauerstoff und Kohlenstoff. Das Glaslot bei DieMat J203 beinhaltet in den Ausscheidungen die Elemente Silizium, Aluminium, Magnesium, Zink, Sauerstoff und Kohlenstoff. Bismut ist im Unterschied zu Ferro 11-205 aber nur in der umgebenden Matrix zu finden. Bismut dient als Bleiersatz zur Schmelzpunktserniedrigung.

Besonders auffällig ist, dass bei den bleifreien Glasloten nahezu keine Lunker vorhanden sind, im Speziellen bei dem Glaslot vom DieMat waren keine Lunker zu finden. Die Gesamtdicke der Verbindungsschicht wurde bei Ferro 11-205 mit ca. 25 µm und bei DieMat J203 mit ca. 20 µm bestimmt [30]

EDX Untersuchungen keramische Adhäsive:

Es wurden EDX und 2D-EDX Untersuchungen durchgeführt. Über die EDX Versuchsdaten wurden die Hauptbestandteile der in der Verbindung enthaltenen Elemente bestimmt (siehe Tabelle 8-1) und über das 2D-EDX konnten noch Aussagen über die Verteilung der Elemente in der Verbindungsschicht getroffen werden. Aus den Herstellerangaben war vor den Versuchen nur die Silikatbasis der der untersuchten keramischen Adhäsive bekannt.

Tabelle 8-1 Ergebnisse EDX Hauptbestandteile der keramischen Adhäsive [49]

keramisches Adhäsiv	Basis laut Hersteller	Hauptbestandteile aus EDX
Omegabond 700	Natriumsilikatbasis	Na, Si, Pt, O
Omegabond CC	Zirkonsilikatbasis	Zr, Al, Si, Zn, O

Die Ergebnisse der 2D-EDX Analyse sind in Abbildung 135 dargestellt. Wobei der Farbübergang von schwarz nach weiß ein Ansteigen der Konzentration darstellt. Über die Position der hellen Bereiche in den Bildern kann somit auf die Verteilung geschlossen werden. Die Verteilung der Elemente kann bei beiden untersuchten keramischen Adhäsiven als sehr inhomogen gedeutet werden

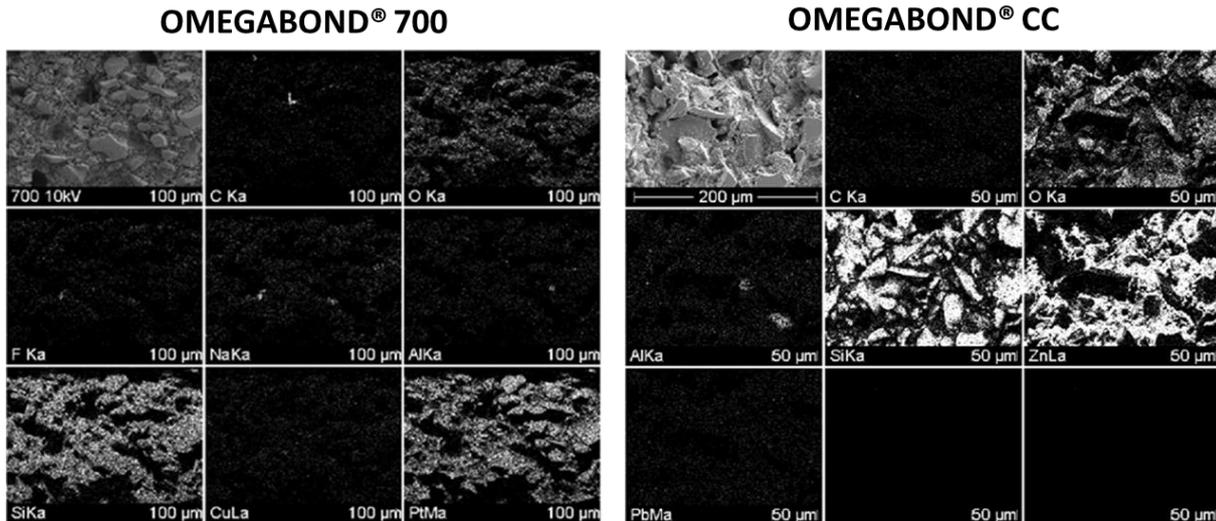


Abbildung 135 2D-EDX-Analyse der keramischen Adhäsive Omegabond 700 und Omegabond CC [34]

Die Risikoelemente aus den EDX und 2D-EDX Untersuchungen sind Platin und Kalium. [49]

EDX Untersuchungen Glaslotverbindungen:

Bei den Untersuchungen der Glaslote wurden diese wieder in die bleihaltigen Glaslote (Ferro 11-036 und Ferro 11-155) und die bleifreien Glaslote (Ferro 11-205 und DieMat J203) unterteilt.

Tabelle 8-2 Ergebnisse EDX Hauptbestandteile der Glaslote [49]

Glaslot	Basis laut Hersteller	Hauptbestandteile aus EDX
Ferro 11-036 (bleihaltig)	SiO ₂	O, Mg, Al, Si, Cu, Zn, Pb
Ferro 11-155 (bleihaltig)	SiO ₂	C, O, Al, Si, Zn, Pb
Ferro 11-205 (bleifrei)	SiO ₂	O, Mg, Al, Si, K, Cu, Zn, Bi
DieMat J203 (bleifrei)	SiO ₂	C, O, Mg, Al, Si, Zn, Bi

Es ist augenscheinlich, dass sich die Zusammensetzungen der Glaslote von den Elementen sehr ähnlich sind. Bei den bleihaltigen Glasloten dient Blei zur Herabsetzung der Schmelztemperatur wohingegen bei den bleifreien Glasloten Bismut das Blei ersetzt, und aufgrund der dem Blei ähnlichen Eigenschaften (Bismut (Ordnungszahl 83) befindet sich im Periodensystem der Elemente direkt neben Blei (Ordnungszahl 82)) denselben Zweck erfüllt.

Die Ergebnisse der 2D-EDX Analysen der bleihaltigen Glaslote, dargestellt in Abbildung 136, zeigen im Vergleich zu den keramischen Adhäsiven eine gleichmäßigere Verteilung und können annähernd als homogen (speziell Ferro 11-155) bezeichnet werden.

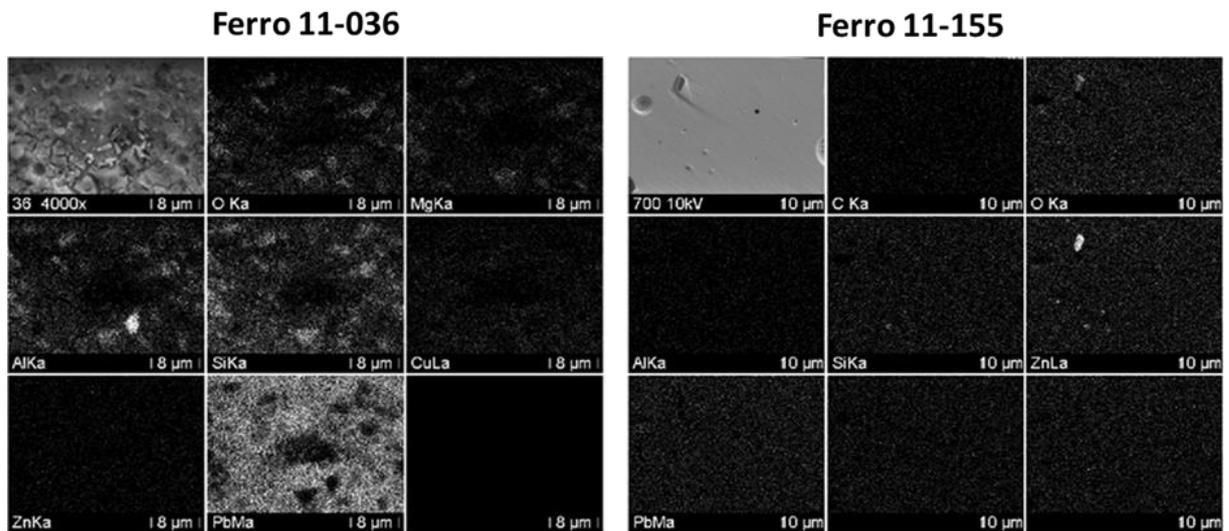


Abbildung 136 2D-EDX-Analyse der bleihaltigen Glaslote Ferro 11-036 und 11-155 [34]

Die bleifreien Glaslote haben im Vergleich zu den bleihaltigen Glasloten wieder eine deutlich inhomogenere Verteilung. Die Ergebnisse der 2D-EDX der bleifreien Glaslote ist in Abbildung 137 dargestellt.

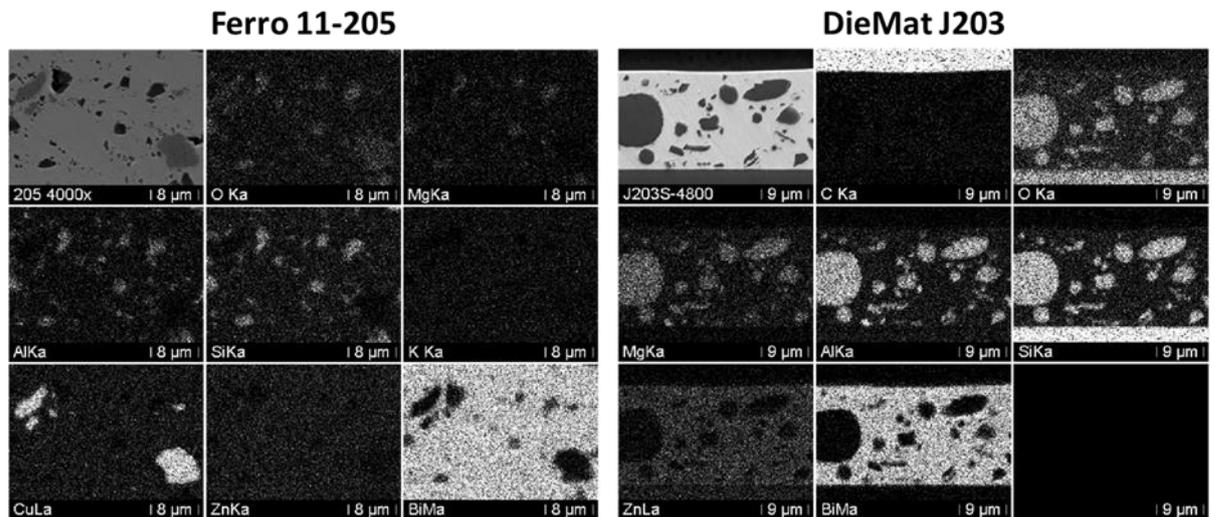


Abbildung 137 2D-EDX-Analyse der bleifreien Glaslote Ferro 11-205 und DieMat J203 [34]

Die Hauptelemente sind die gleichen Elemente wie bei den bleihaltigen Loten mit der Ausnahme, dass für die Schmelzpunktserniedrigung Bismut anstatt Blei verwendet wurde. [49]

Untersuchungen zur mechanischen Festigkeit der Verbindungstechniken:

Für eine sinnvolle mechanische Festigkeit für eine Waferverbindung wurde eine Grenze der mittleren Schubspannung von 10 N/mm^2 festgelegt. Die Versuche ergaben ein deutlich besseres Ergebnis der Glaslote im Vergleich zu den keramischen Adhäsiven dargestellt in Abbildung 138.

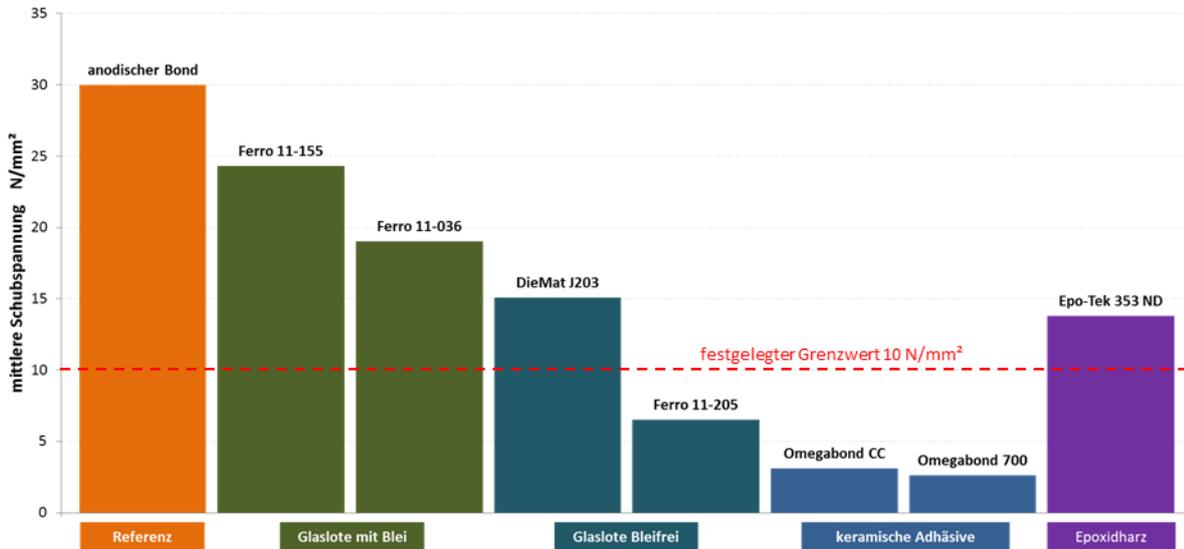


Abbildung 138 Vergleich der mittleren Schubspannungen von Glasloten, keramischen Adhäsiven und dem Epoxidharz mit der Referenz Anodischer Bond [33]

Im Vergleich der Glaslote schnitten die Glaslote mit Blei besser ab als die bleifreien Glaslote. Das beste Ergebnis erzielte das Glaslot Ferro 11-155 mit ca. 80% der Scherspannung der Referenz gefolgt von Ferro 11-036 mit ca. 60%, aber auch das bleifreie Glaslot von Diemat J203 erzielte mit ca. 50% einen ausreichenden Wert. Die keramischen Adhäsive und das Glaslot Ferro 11-205 erreichten den festgesetzten Grenzwert nicht und werden daher nicht als sinnvolle Waferverbindungstechnik für die Kühlung betrachtet. Das Epoxidharz Epo-Tek 353 ND liegt mit 46% der Referenzscherspannung auch deutlich über den Grenzwert, aufgrund der maximalen Temperaturbeanspruchung dieses Adhäsives muss die Metallisierung jedoch vor der Waferverbindung erfolgen, um eine Zerstörung der Verbindung zu verhindern. [30]

8.3 Versuche zur Haftung von Metallisierungen auf einem Glassubstrat

Die Versuche zur Haftung von Metallschichten bzw. mit einer Haftvermittlungsschicht auf Glas wurden durchgeführt, um einen geeigneten Schichtaufbau für den Seedlayer zu finden. Bei einer unzureichenden Haftung würde die Gefahr bestehen, dass bei der Strukturierung des Seedlayers eine teilweise oder vollständige Ablösung des Seedlayers stattfindet. Dadurch wäre ein galvanisches Aufwachsen der Wärmesenke nicht oder nur mehr eingeschränkt möglich.

8.3.1 Versuchsaufbau

Es wird ein Dolly mittels eines Epoxidharzes auf den metallisierten Wafer geklebt. Auf den Dolly wird, wie in Abbildung 139 dargestellt, eine Kraft mittels einer pneumatischen

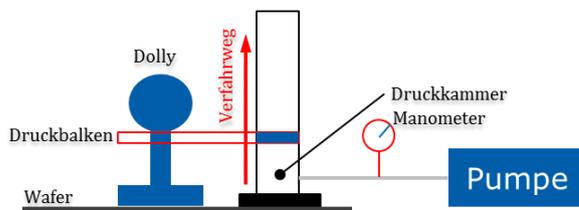


Abbildung 139 Prinzip Haftungsuntersuchung

Vorrichtung in senkrechter Richtung zum Wafer aufgebracht die den Dolly von dem Wafer abziehen soll. Der Druck, der in der Druckkammer vorherrscht, wird mittels eines Manometers aufgenommen und der maximal Druck (entspricht dem Druck bei Bruch der Verbindung) wird aufgezeichnet.

Der Druck bzw. der Art/Ort des Bruches gibt Aufschluss über die Haftung der Metallisierung am Wafer.

8.3.2 Versuchsdurchführung



Abbildung 140 pneumatische Prüfvorrichtung zur Haftungsuntersuchung

Der Dolly wurde aufgeklebt und die Verbindung ausgehärtet (ca. 24h bei Raumtemperatur). Der Dolly wurde so in die pneumatische Prüfvorrichtung (dargestellt in Abbildung 140) eingespannt, dass der Druckbalken die benötigte Abzugskraft auf den Wafer ausüben konnte. Die Daten für die Abzugskräfte und der Ort bzw Art des Bruches wurde zu jeder der durchgeführten Abzugsprüfungen dokumentiert. Es wurden für jede der untersuchten Metallisierungen 6 bzw. 9 Abzugsprüfungen durchgeführt.

8.3.3 Ergebnisse und Ergebnisinterpretation

Es wurden 3 unterschiedliche Seedlayer Metallisierungen bzw. Seedlayerstacks untersucht

- Seedlayer 1: 100nm AG
- Seedlayer 2: 100nm Ti / 200nm Pt / 200nm Au
- Seedlayer 3: 80nm aSi / 500nm Al / 700nm Ti / 500nm Ag

Seedlayer 1 wurde ausgewählt, da Verspiegelungen bei Gläsern oft so hergestellt werden und aus diesem Grund eine gute Haftung vermutet wurde. Seedlayer 2 und 3 wurden aus Erfahrungswerten in der Fertigung abgeleitet. Die Ergebnisse der Versuche wurden in Tabelle 12-14 dargestellt.

Die Kriterien für die Haftungsversuche waren:

- Metallschicht abgelöst keine ausreichende Metallisierungshaftung
- Kleberschicht abgelöst und maximal Druck > 2 MPa, Metallisierungshaftung ist ausreichend
- Kleberschicht abgelöst und maximal Druck < 2 MPa, Kleberhaftung zu gering um Aussage über Metallisierungshaftung zu treffen
- Glas gebrochen Metallisierungshaftung ist ausreichend auch wenn eine teilweise Ablösung der Metallisierung oder der Kleberschicht aufgetreten ist

Die Ergebnisse der Haftungsversuche wurden nach den genannten Kriterien qualitativ bewertet und in der Tabelle 12-14 farblich gekennzeichnet (im Feld Abzugsversuche). Die farbliche Kennzeichnung wurde mit rot für keine ausreichende Metallisierungshaftung, orange keine Aussage über die Metallisierungshaftung möglich und grün für eine ausreichende Metallisierungshaftung bewertet. Als abschließendes Ergebnis war demnach die Seedlayer 1 Metallisierung völlig unzureichend. Die Seedlayer 2 Metallisierung wurde durch das Versagen von 33% der Abzugsversuche ebenfalls mit unzureichend bewertet. Die Seedlayer 3 Metallisierung wurde als gut bewertet, da bei 9 Zugversuchen keine unzureichende Bewertung aufgetreten ist und nur bei einem Versuch keine Aussage über die Metallisierungshaftung getroffen werden konnte. Der Grund für die mangelnde Aussagefähigkeit lag aber nicht an der mangelnden Haftung der Metallisierung, sondern an einer mangelnden Verklebung des Dolly's auf der Metallisierungsschicht.

Aus diesen Gründen wurde für die Seedlayermetallisierung, das System Seedlayer 3 mit dem Aufbau 80nm amorphes Silizium, 500nm Aluminium, 700nm Titan und 500nm Silber ausgewählt.

8.4 Versuch zur Void-Minimierung beim Reflowlöten

Es wurde bei diesen Versuchen davon ausgegangen, dass die Masse der aufgetragenen Solderpaste (ISO-Cream EL3103 bleifrei) und das Layout der Auftragung einen Einfluss auf die Voidbildung beim Reflowprozess haben.

8.4.1 Versuchsaufbau

Es wurde ein Basiswafer mit Wärmesenke (100 µm) und Silberdecklayer (1 µm) als Grundstruktur verwendet. Die aufgelöteten Chips waren die IGBT's und die Dioden des Testsystems und die verwendete Solderpaste war eine ISO-Cream EL3103 bleifrei, deren Hauptbestandteil eine Silber Zinn Kupfer Legierung (S-Sn95,5Ag4Cu0,5) ist.

8.4.2 Versuchsdurchführung

Es wurden mit der Solderpaste für die Lötung der IGBT's und der Dioden unterschiedliche Layouts und über die Dispenserzeit unterschiedliche Masse auf die Wärmesenken aufgetragen. Die Applizierung der Chips erfolgte manuell und der Reflowprozess wurde in einem Infrarotofen durchgeführt. Nach der Erstarrung der Lötverbindung wurden die so gelöteten Chips mit einer Röntgenanalyse untersucht, um einen Zielprozess für die Fertigung der Lötung zu finden, bei der möglichst wenige Voids entstehen.

8.4.3 Ergebnisse und Ergebnisinterpretation

Die Ergebnisse der Röntgenanalyse der beschriebenen Versuche ergab für die IGBT's die in Abbildung 141 dargestellten Ergebnisse. Die beiden Versuche g und h in der Abbildung zeigten die besten Ergebnisse.

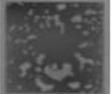
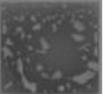
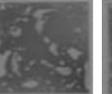
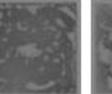
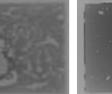
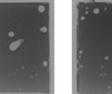
	a	b	c	d	e	f	g	h
Dispenser Zeit [sec]	14	12	10	10	8	6	25	15
Dispenser Layout								
Röntgen Analyse Lötung								

Abbildung 141 Ergebnisse der Röntgenanalyse zur Void-Minimierung beim Reflowlöten für die IGBT's

Aufgrund der zu langen Dispenserzeit und der damit zu großen Lotmenge bei g ist das Lot beim Reflowprozess an der Seitenwand des Chips hochgekrochen und erzeugte einen

Versuche

Kurzschluss zwischen Chip Vorder- und Rückseite. Aus diesem Grund wurde als Zielprozess für die IGBT's der Versuch h mit einer Dispenserzeit von 15 sec. und dem in der Abbildung dargestelltem Layout gewählt.

Die Ergebnisse der Röntgenanalyse bei den Versuchen an den Dioden sind in Abbildung 142 dargestellt. Die Ergebnisse zeigen klar, dass die auftretenden Voids bei Versuch h am geringsten sind, weshalb dieser als Zielprozess für das Reflowlöten der Dioden gewählt wurde. Der Versuch h wurde mit einer Dispenserzeit von 10 sec. und dem in der Abbildung dargestelltem Layout durchgeführt.

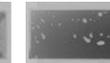
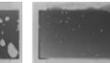
	a	b	c	d	e	f	g	h
Dispenser Zeit [sec]	4	4	6	8	6	8	15	10
Dispenser Layout								
Röntgen Analyse Lötung								

Abbildung 142 Ergebnisse der Röntgenanalyse zur Void-Minimierung beim Reflowlöten für die Dioden

8.5 Versuche zur Kühlung im Labormaßstab, bei der einseitigen in Glas gefassten Flüssigkeitskühlung

Die Versuche zur Kühlung konnten nicht unter der vollen für die Chips vorgesehenen Belastung durchgeführt werden, da die Anlagen für die Abnahme einer solchen Leistung nicht zur Verfügung stehen. Die Überprüfung der Chips erfolgt typischerweise nur über Kondensatoren über die sehr kurze Impulse der Nennbelastung aufgeprägt werden. Diese kurzen Impulse reichen allerdings für eine Charakterisierung der Kühlung nicht aus, da bei so kurzen Impulsen zu wenig Wärme frei wird, um einen deutlichen Temperaturanstieg an den Chips zu erzeugen der über die Kühlung abgeführt werden könnte. Aus diesem Grund wurden Versuche im Labor durchgeführt, bei denen die Chips absichtlich kurzgeschlossen wurden, um eine möglichst hohe thermische Leistung einzuprägen und das Verhalten der Oberflächentemperatur zwischen einem gekühlten Chip mit dem Verhalten der Oberflächentemperatur eines ungekühlten Chips verglichen wurden.

8.5.1 Versuchsaufbau

Der Kühlkreislauf mit dem Kühlelement wurde wie in Kapitel 6.2.10 beschrieben aufgebaut. Bei diesem Versuch wurde noch Variante 1 des Anschlusses verwendet. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 143 dargestellt. Die Überprüfung der

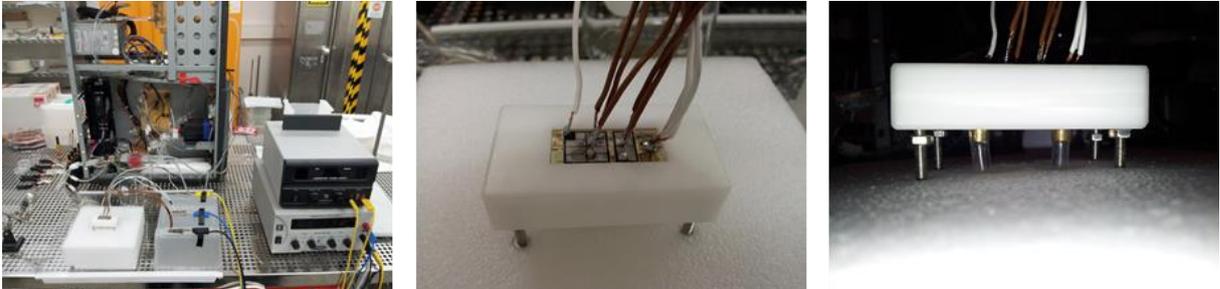


Abbildung 143 Versuchsaufbau zur Kühlung im Labormaßstab bei der einseitigen in Glas gefassten Flüssigkeitskühlung des Testsystems

Oberflächentemperatur wurde durch Aufnahmen mit einer Wärmebildkamera realisiert. Vor- und Rücklauftemperaturen wurden über die in den Kühlkreislauf 1 integrierten Temperaturfühler dokumentiert. Die Bestimmung der Durchflussmenge wurde im Vorfeld durch eine Kalibrierung der Pumpe durchgeführt.

8.5.2 Versuchsdurchführung

Im Vorfeld des eigentlichen Versuchs wurde die Durchflussmenge der Pumpe bei verschiedenen Versorgungsspannungen im Versuchsaufbau durch Erfassung der Fördermenge in einem Zeitintervall bestimmt. Hierfür wurden bei 4 unterschiedlichen Versorgungsspannungen jeweils 6 Datenpunkte in einem Abstand von 10 sek. aufgenommen bei denen das geförderte Volumen bestimmt wurde. Aus diesen Daten wurde eine Fitgleichung erarbeitet mit der die Durchflussmenge in Abhängigkeit der Versorgungsspannung bestimmt werden konnte.

Der Kurzschluss wurde durch die manuelle Lötung der Drähte an den Vorderseiten Kontakte zu den Kontaktpads, anstelle des Drahtbondverfahrens erreicht. Durch die große lokale Temperatureinbringung wurden Passivierungsschichten in dem Bauelement zerstört und dadurch Kurzschlüsse im Bauelement hervorgerufen. Ohne diese Kurzschlüsse wären die Temperaturen, die bei der Belastung mit den Labornetzgeräten entsteht, zu gering, um die Kühlung zu testen.

Der Versuch wurde durchgeführt in dem ein Wärmebild bei gefülltem Kühlkreislauf aber ohne Durchfluss erstellt wurde, dieses Bild spiegelt die Anfangsbedingungen wieder. Die Kühlung wurde aktiviert, indem eine Spannung von 4V an die Pumpe angelegt wurde. Im Anschluss

wurde Strom und Spannung an das Bauteil angelegt, wodurch sich das Bauteil aufheizt. Die Entwicklung der Oberflächentemperatur wurde über einen Zeitraum von ca. 32 min beobachtet und dokumentiert (schriftlich und über Wärmebilder). Dann wurde die Belastung durch Abschalten der elektrischen Bauteilversorgung bei laufender Kühlung deaktiviert. Das Abkühlverhalten wurde wieder beobachtet und dokumentiert.

Im Vergleich zu der durchgeführten Untersuchung wurde dann ein Versuch durchgeführt, in dem die Kühlung deaktiviert wurde indem der Kühlkreislauf von der einseitigen in Glas gefassten Flüssigkeitskühlung des Testsystems entfernt wurde und das restliche Wasser aus der Kühlkavität ausgeblasen wurde. Im Anschluss wurden wieder Strom und Spannung an das Bauteil angelegt und die Entwicklung beobachtet und dokumentiert.

8.5.3 Ergebnisse und Ergebnisinterpretation

Das Ergebnis der Pumpenkalibrierung (Mikropumpe RS Zentrifugalpumpe) wurde in Abbildung 144a dargestellt. Aus den mittleren Fördermengen wurde ein Diagramm der Fördermenge in Abhängigkeit der Pumpenspannung (dargestellt in Abbildung 144b) und dafür Fitfunktion (Gl. 8.8) erstellt.

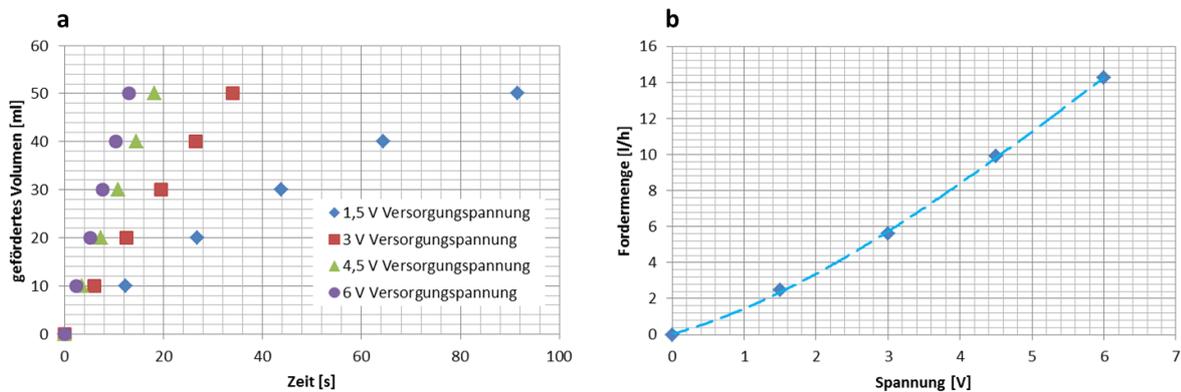


Abbildung 144 Pumpenkalibrierung a) gefördertes Volumen pro Zeiteinheit b) Fördermenge in Abhängigkeit der Pumpenspannung

$$\dot{V} = -0,0169 * U^3 + 0,309 * U^2 + 1,1276 * U + 0,025 \quad (\text{Gl. 8.8})$$

\dot{V} Volumenstrom [l/h]

U Pumpenspannung [V]

Über die Fitfunktion wurde der geförderte Kühlwasservolumenstrom mit ca. 8,4 l/h bei einer Pumpenspannung von 4 V bestimmt.

Der Vergleich der Oberflächentemperatur wurde durchgeführt und die dabei aus den Wärmebildern erhaltenen maximalen Oberflächentemperaturen in einem Diagramm (Abbildung 145) zusammengefasst. Dabei zeigte sich, dass die Kühlung trotz der Belastung durch den vorhandenen Kurzschluss genug Wärme abführen konnte. Der Kühlwasserstrom erwärmte sich dabei maximal um 3,3 °C, dies entspricht einer maximal abgeführten Wärme über das Kühlwasser von ca. 32 W bei einer aufgeprägten Leistung von ca. 39 W. Die restliche Energie wurde über Abstrahlung und Konvektion an die Umgebungsluft abgeführt.

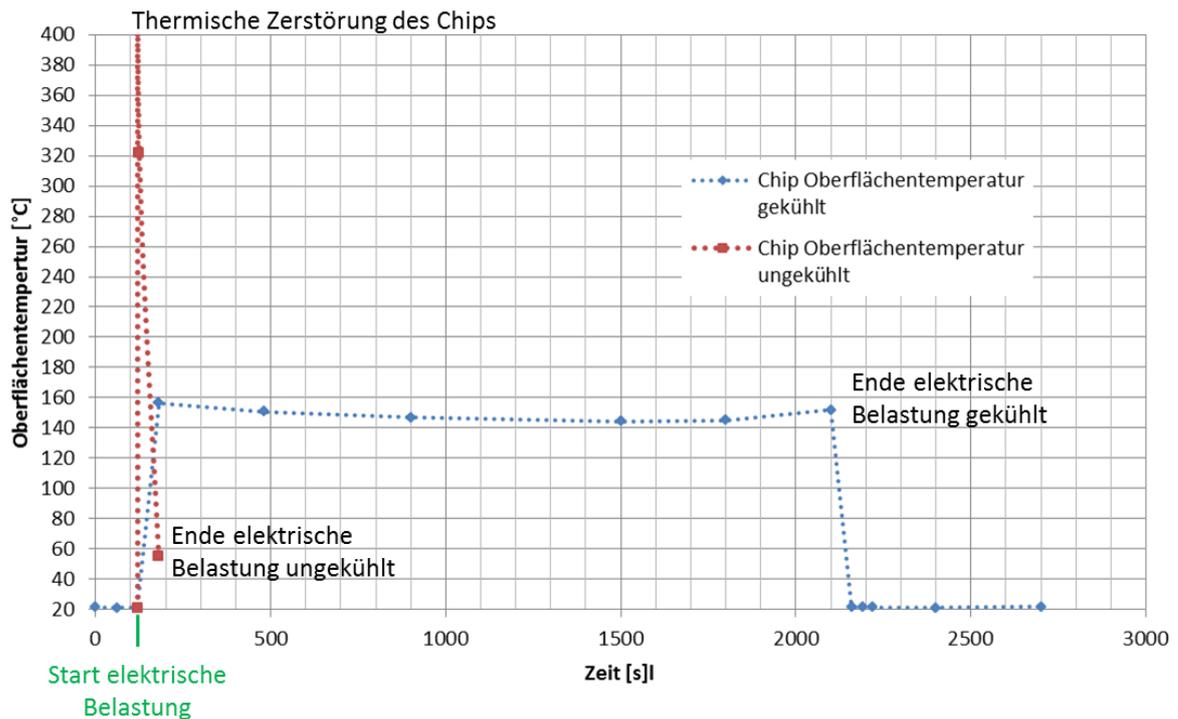


Abbildung 145 Vergleich der Oberflächentemperatur bei Kurzschlussbelastung gekühlt bzw. ungekühlt

Bei dem Anschluss Versuch unter gleichen Randbedingungen, jedoch ohne Kühlung zeigte sich, dass der Kurzschluss eine fast augenblickliche Zerstörung des Chips zur Folge hatte. Die elektrische Belastung wurde sofort wieder von dem Bauteil genommen. Um dies mit dem ersten Versuch vergleichen zu können, wurde die Temperatur bei der Zerstörung mit 650°C (Schmelztemperatur Al) und zu einem Zeitpunkt 0,1 sek nach dem Einsetzen der elektrischen Belastung angenommen. In der Beobachtung der weiteren Abkühlung durch die



Abbildung 146 Wärmebilder Versuch ungekühlt

Versuche

Wärmebilder fiel auf, dass die Wärmesenke die Wärme gleichmäßig über das Bauelement verteilte. Die Wärmebilder zum ungekühlten Versuch sind in Abbildung 146 dargestellt und wurden chronologisch zu den Versuchsdatenpunkten in Abbildung 145 nummeriert.

Die Wärmebilder zum Versuch mit gekühltem Testelement sind in Abbildung 147 dargestellt und wurden wieder chronologisch nach den Datenpunkten im Diagramm (Abbildung 145) nummeriert. Bei der Betrachtung der Wärmebilder ist zu beachten, dass die Farbskala sich automatisch an die maximal und minimal auftretenden Temperaturen anpasst.

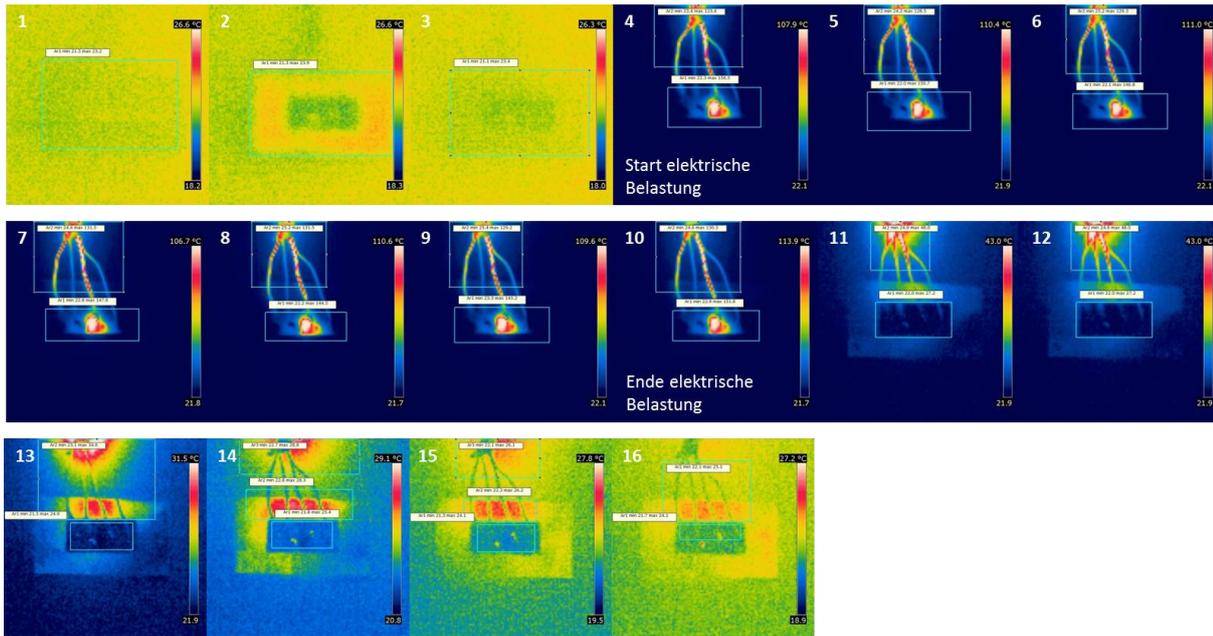


Abbildung 147 Wärmebilder Versuch gekühlt

Als Ergebnis dieser Versuche kann zusammengefasst werden, dass durch die Kühlung ein in Glas gefasstes Testsystem mit einem absichtlich erzeugten Kurzschluss vor der thermischen Zerstörung (Abbrand) bewahrt werden konnte, während derselbe Aufbau in ungekühltem Zustand sofort zerstört wurde. Es wurde gezeigt, dass die Kühlung bei der aufgeprägten Leistung von ca. 39 W nicht „ausgereizt“ ist (maximale Erwärmung des Kühlmediums um 3,3°C).

9 Berechnungen

9.1 Thermische Berechnungen zur Kühlung von Leistungshalbleitern

Für die Verlustleistung des Leistungshalbleiters wird in den Berechnungen ein Wert von 200 W angenommen. Die Verlustleistung ist sehr stark vom elektrischen Belastungsfall abhängig, und 200 W sind ein Erfahrungswert der bereits einer sehr hohen Verlustleistung des Testsystems entspricht.

9.1.1 Berechnungen erzwungene Konvektion bei der einseitige Kühlung

Die Berechnungen zur erzwungenen Konvektion stellen den Wärmeübergang zwischen Kühlkavität und dem kühlenden Fluid dar. Der Berechnung wurde als Kühlmedium Wasser zu Grunde gelegt. Die benötigten Stoffwerte von Wasser wurden dem VDI Wärmeatlas [54] entnommen und in Tabelle 12-15 zusammengefasst. Die Geometrie der Kühlkavität ist in Abbildung 148 dargestellt. Die Kühlkavität stellt den vom Kühlmedium durchflossenen Kanal dar.

$$b=10 \cdot 10^{-3} \text{ [m]}$$

$$h=0,5 \cdot 10^{-3} \text{ [m]}$$

$$l=28 \cdot 10^{-3} \text{ [m]}$$

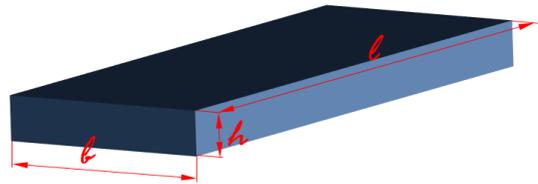


Abbildung 148 Geometrie der Kühlkavität

Bestimmung der Strömungsform (laminar,turbulent):

Die Strömungsform wird durch die Reynolds-Zahl (Gl. 9.1) bestimmt. Ist die Reynolds-Zahl der Strömung kleiner als die kritische Reynolds-Zahl, wird von einer laminaren Strömung gesprochen, ist die Reynolds-Zahl größer, wird von einer turbulenten Strömung gesprochen.

$$Re = \frac{v * d_{hyd}}{\nu} \quad (\text{Gl. 9.1})$$

Die Strömungsgeschwindigkeit (Gl. 9.2) wird aus dem Volumenstrom und der durchflossenen Querschnittsfläche berechnet.

$$v = \frac{\dot{V}}{A_{quer}} \quad (\text{Gl. 9.2})$$

Berechnungen

Der Volumenstrom wird mit (Gl. 8.8) aus der Pumpenkalibration bestimmt, bei einer Spannung von 6 V (maximale Betriebsspannung der Pumpe).

$$\dot{V} = -0,0169 * U^3 + 0,309 * U^2 + 1,1276 * U + 0,025 = 14,3 \left[\frac{l}{h} \right] = 4,0 * 10^{-6} \left[\frac{m^3}{s} \right]$$

Die Querschnittsfläche wird aus den geometrischen Abmessungen der Kühlkavitäten (dargestellt in Abbildung 148) berechnet.

$$A_{quer} = b * h = 5 * 10^{-6} [m^2]$$

Die Strömungsgeschwindigkeit im Kanal wird mit (Gl. 9.2) aus dem Volumenstrom und der Kanalquerschnittsfläche berechnet.

$$v = \frac{\dot{V}}{A_{quer}} = 0,79 \left[\frac{m}{s} \right]$$

Die Berechnung des hydraulischen Durchmessers erfolgt über (Gl. 9.3). Der hydraulische Durchmesser dient zur Berechnung der Reynolds-Zahl für nicht kreisrunde Querschnitte und wird aus der Kanalquerschnittsfläche und dem Umfang des Kanals ermittelt.

$$d_{hyd} = \frac{4 * A_{quer}}{U} \tag{Gl. 9.3}$$

$$d_{hyd} = \frac{4 * A_{quer}}{2 * (b + h)} = 9,5 * 10^{-4} [m]$$

Für die Berechnung der Reynolds-Zahl wird die kinematische Viskosität benötigt, diese ist temperaturabhängig. Daher wird die kinematische Viskosität mit den Stoffwerten aus Tabelle 12-15 mittels linearer Interpolation bei einer mittleren Temperatur zwischen Eintritt und Austritt (Gl. 9.4) berechnet.

$$T_m = \frac{T_A + T_E}{2} \tag{Gl. 9.4}$$

Die Temperatur am Eintritt ist mit 25°C festgelegt und die Temperatur am Austritt wird über die durch das Kühlmedium abgeführte Wärmeleistung (Gl. 9.5), die der Verlustleistung entspricht, berechnet.

$$\dot{Q} = \dot{m} * c_p * (T_A - T_E) = \dot{V} * \rho * c_p * (T_A - T_E) \quad (\text{Gl. 9.5})$$

daraus folgt

$$T_A = \frac{\dot{Q}}{\dot{V} * \rho * c_p} + T_E \quad (\text{Gl. 9.6})$$

Da die Dichte und die Wärmekapazität temperaturabhängige Stoffwerte sind erfolgt die Berechnung iterativ. Die benötigten Stoffwerte sind Tabelle 12-15 zu entnehmen.

Start der Iteration zur Bestimmung der mittleren Temperatur:

Iterationschritt 1 Annahme $T_A=45$ [°C]

$$T_m = \frac{T_A + T_E}{2} = 35 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$\rho_{35^\circ\text{C}} = 994,04 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$$

$$c_{p35^\circ\text{C}} = 4179 \left[\frac{\text{J}}{\text{kg} * \text{K}} \right]$$

$$T_A = \frac{\dot{Q}}{\dot{V} * \rho * c_p} + T_E = 37,2 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

Iterationschritt 2 neue Annahme $T_A=37,2$ [°C]

$$T_m = \frac{T_A + T_E}{2} = 31,1 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$\rho_{35^\circ\text{C}} = 994,04 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$$

$$c_{p35^\circ\text{C}} = 4179 \left[\frac{\text{J}}{\text{kg} * \text{K}} \right]$$

$$\rho_{30^\circ\text{C}} = 995,65 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$$

$$c_{p30^\circ\text{C}} = 4180 \left[\frac{\text{J}}{\text{kg} * \text{K}} \right]$$

Berechnungen

Lineare Interpolation aus den nächstgelegenen Tabellenwerte der Stoffdaten bei $T_m=31,0754$ mit (Gl. 9.7). für $y_1 < y < y_2$; $t_1 < t < t_2$

$$y = y_1 + \frac{y_2 - y_1}{t_2 - t_1} * (t - t_1) \quad (\text{Gl. 9.7})$$

$$\rho_{T_m} = \rho_{30^\circ\text{C}} + \frac{\rho_{35^\circ\text{C}} - \rho_{30^\circ\text{C}}}{T_2 - T_1} * (T_m - T_1) \quad c_{pT_m} = c_{p30^\circ\text{C}} + \frac{c_{p35^\circ\text{C}} - c_{p30^\circ\text{C}}}{T_2 - T_1} * (T_m - T_1)$$

$$\rho_{T_m} = 995,304 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \quad c_{pT_m} = 4179,78 \left[\frac{\text{J}}{\text{kg} * \text{K}} \right]$$

$$T_A = \frac{\dot{Q}}{\dot{V} * \rho * c_p} + T_E = 37,1 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$T_m = \frac{T_A + T_E}{2} = 31,1 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

Das Abbruchkriterium für die Iterationsschleife wurde mit einer Temperaturdifferenz, der in den Iterationsschritten berechneten mittleren Temperaturen, $\Delta T < 0,5 \text{ }^\circ\text{C}$ festgelegt.

$$\Delta T = T_{\text{malt}} - T_{\text{mneu}} = 0,0087 \text{ [}^\circ\text{C]} < 0,5 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

Das Abbruchkriterium ist erfüllt, wodurch die Iteration endet.

Die kinematische Viskosität wird, bei der Temperatur $T_m = 31,1 \text{ }^\circ\text{C}$, mit den Stoffwerten aus Tabelle 12-15 interpoliert.

$$\nu_{35^\circ\text{C}} = 0,724 * 10^{-6} \left[\frac{\text{m}^2}{\text{s}} \right] \quad \nu_{30^\circ\text{C}} = 0,801 * 10^{-6} \left[\frac{\text{m}^2}{\text{s}} \right]$$

lineare Interpolation der kinematischen Viskosität nach (Gl. 9.7)

$$\nu_{T_m} = 0,785 * 10^{-6} \left[\frac{\text{m}^2}{\text{s}} \right]$$

Über (Gl. 9.1) wird die Reynolds-Zahl bestimmt, wodurch zwischen einer laminaren und einer turbulenten Strömung unterschieden werden kann.

$$Re = \frac{v * d_{hyd}}{\nu} = 961,5$$

Die kritische Reynolds-Zahl ist laut [55] $Re_{krit} \approx 2200 - 2500$ für Rechteckkanäle

$$Re < Re_{krit}$$

daher liegt eine laminare Strömung vor.

Überprüfung, ob eine hydraulische und/oder eine thermische Einlaufströmung vorliegen.

hydraulische Einlauflänge:

$$L_h = 0,05 * Re * d_{hyd} \quad (\text{Gl. 9.8})$$

[56]

$$L_h = 0,05 * Re * d_{hyd} = 0,05 * 961,499 * 9524 * 10^{-4} = 0,0458 \text{ [m]}$$

$$L_h > l \quad (45,8 * 10^{-3} > 28 * 10^{-3})$$

Daher liegt eine hydraulische Einlaufströmung vor.

thermische Einlauflänge:

$$L_{th} = 0,1 * Re * Pr * d_{hyd} = 0,1 * Pe * d_{hyd} \quad (\text{Gl. 9.9})$$

[56]

Berechnung der Prandtl-Zahl

$$Pr = \frac{\nu}{a} \quad (\text{Gl. 9.10})$$

Die Temperaturleitfähigkeit kann bei der Temperatur $T_m = 31,1$ aus den Stoffwerten interpoliert werden und die kinematische Viskosität bei T_m wurde bereits interpoliert.

$$a_{35^\circ\text{C}} = 0,1497 * 10^{-6} \left[\frac{\text{m}^2}{\text{s}} \right]$$

$$a_{30^\circ\text{C}} = 0,1478 * 10^{-6} \left[\frac{\text{m}^2}{\text{s}} \right]$$

Berechnungen

interpoliert nach

(Gl. 9.7)

$$a_{Tm} = 0,1482 * 10^{-6} \left[\frac{m^2}{s} \right]$$

$$v_{Tm} = 0,785 * 10^{-6} \left[\frac{m^2}{s} \right]$$

$$Pr = \frac{v}{a} = 5,3$$

Berechnung der Peclet-Zahl

$$Pe = \frac{v * d_{hyd}}{a} = Re * Pr$$

(Gl. 9.11)

$$Pe = Re * Pr = 5090,0$$

$$L_{th} = 0,1 * Pe * d_{hyd} = 0,4848 [m]$$

$$L_{th} > l \quad (484,8 * 10^{-3} > 28 * 10^{-3})$$

Daher liegt auch eine thermische Einlaufströmung vor.

Es liegt somit eine laminare Strömung im thermischen und hydraulischen Einlaufbereich vor.

Bestimmung der Nusselt-Zahl bei laminarer Strömung im thermischen Einlaufbereich

Die lokale Nusselt-Zahl für die dimensionslose x-Koordinate x^* kann laut [56] für Mini- und Mikrokanäle mit rechteckigem Querschnitt und einem Aspektverhältnis $AV=h/b > 10$ mit der (Gl. 9.12) mit dem Gültigkeitsbereich $0,0001 < x^* < 1$ berechnet werden.

$$Nu_{x^*} = a + b * x^* + c * (\ln x^*)^2 + d * \ln x^* + e * x^{*\frac{-3}{2}} \quad (Gl. 9.12)$$

[56]

<i>a</i>	.....	Parameter a = 9,1319
<i>b</i>	.....	Parameter b = -3,7531
<i>c</i>	.....	Parameter c = 0,48222
<i>d</i>	.....	Parameter d = 2,5622
<i>e</i>	.....	Parameter e = 5,16*10 ⁻⁶

Bestimmung der Grenzen der dimensionslosen x-Koordinate

$$x^* = \frac{x}{Pe * d_{hyd}} \quad (\text{Gl. 9.13})$$

[56]

bei $x=l$

$$x^*_{x=l} = \frac{l}{Pe * d_{hyd}} = 0,005776$$

Überprüfung der Länge der unteren Grenze des Gültigkeitsbereiches von (Gl. 9.12) mit (Gl. 9.13) bei $x^*=0,0001$

$$x_{x^*=0,0001} = x^* * Pe * d_{hyd} = 4,8477 * 10^{-4} [m]$$

$$x_{x^*=0,0001} = 0,48477 [mm]$$

Berechnung der lokalen Nusselt-Zahl an der unteren Grenze und am Ende der Kühlkavität mit (Gl. 9.12).

$$Nu_{x^*=0,0001} = 31,6$$

$$Nu_{x^*=0,005776} = 8,7$$

Für die weitere Berechnung wird die mittlere Nusselt-Zahl benötigt. Diese wird mittels numerischer Integration aus der Funktion der lokalen Nusselt-Zahl (Gl. 9.12) im Bereich $0,0001 < x^* < 0,005776$ (bzw. $0,48477 \text{ mm} < x < 28 \text{ mm}$) gemittelt (Flächengleiches Rechteck) nach (Gl. 9.14).

$$Nu_m = \frac{\int_{x^*_{min}}^{x^*_{max}} Nu_{x^*} dx^*}{x^*_{max} - x^*_{min}} \quad (\text{Gl. 9.14})$$

Berechnungen

$$Nu_m = \frac{\int_{0,0001}^{0,00576} \left(a + b * x^* + c * (\ln x^*)^2 + d * \ln x^* + e * x^{*\frac{-3}{2}} \right) dx^*}{x_{max}^* - x_{min}^*}$$

$$Nu_m = 11,8$$

Bestimmung des Wärmeübergangskoeffizienten α nach (Gl. 9.15)

$$Nu_m = \frac{\alpha * d_{hyd}}{\lambda} \quad (\text{Gl. 9.15})$$

Da die Wärmeleitfähigkeit ein temperaturabhängiger Stoffwert ist, wird sie wieder bei der Temperatur $T_m = 31,1$ aus den Stoffwerten (Tabelle 12-15) interpoliert.

$$\lambda_{35^\circ C} = 622,0 * 10^{-3} \left[\frac{W}{m * K} \right] \quad \lambda_{30^\circ C} = 615,0 * 10^{-3} \left[\frac{W}{m * K} \right]$$

interpoliert nach (Gl. 9.7)

$$\lambda_{T_m} = 616,49 * 10^{-3} \left[\frac{W}{m * K} \right]$$

$$\alpha = \frac{Nu_m * \lambda_{T_m}}{d_{hyd}} = 7666,12 \left[\frac{W}{m^2 * K} \right]$$

Berechnung der Wandungstemperatur der Kühlkavität nach (Gl. 9.16)

$$\dot{Q} = \alpha * A_W * \vartheta_{ln} \quad (\text{Gl. 9.16})$$

Für die Wärmeübertragungsfläche wird angenommen, dass sich aufgrund des flachen Kanales (übliche Annahme bei Mikrokanälen) das Material rund um den Strömungskanal aufheizt und somit die der Wärmeeintrag über die gesamte Mantelfläche der Kühlkavität stattfindet. Die Mantelfläche berechnet sich aus (Gl. 9.17).

$$A_W = 2 * b * l + 2 * h * l \quad (\text{Gl. 9.17})$$

$$A_W = 588 * 10^{-6} [m^2]$$

Die logarithmische Temperaturdifferenz berechnet sich aus (Gl. 9.16) zu

$$\vartheta_{ln} = \frac{\dot{Q}}{\alpha * A_W} = \frac{200}{7666,12 * 588 * 10^{-6}} = 44,4 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

Über die Definitionsgleichung der logarithmische Temperaturdifferenz (Gl. 9.18) wird die Wandungstemperatur des Kühlkanals berechnet.

$$\vartheta_{ln} = \frac{T_A - T_E}{\ln\left(\frac{T_W - T_E}{T_W - T_A}\right)} \quad (\text{Gl. 9.18})$$

$$T_W = \frac{T_A * e^{\frac{T_A}{\vartheta_{ln}}} - T_E * e^{\frac{T_E}{\vartheta_{ln}}}}{e^{\frac{T_A}{\vartheta_{ln}}} - e^{\frac{T_E}{\vartheta_{ln}}}} = 75,7 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

Da die Wandungstemperatur deutlich kleiner ist als die Siedetemperatur ($T_W < T_{\text{Siede}}$), ist keine Verdampfung des Kühlmediums an der Grenzfläche zu erwarten. Eine Verdampfung in der Kühlkavität ist kritisch, da die Volumenzunahme des Mediums und der dadurch hervorgerufene Druckanstieg in der Kavität zur Zerstörung der Kavität führen würden. Für die weiteren Wärmeleitungsrechnungen wird die ermittelte Wandungstemperatur von ca. 75,7 °C als konstante Randbedingung angenommen.

9.1.2 Berechnung der Chiprückseitentemperatur bei der einseitigen Kühlung

Die Berechnung der Chiprückseitentemperatur erfolgt mittels der Berechnung einer stationären Wärmeleitung ausgehend von der Wandungstemperatur an der Kühlkavitäten-Grenzfläche und einer Verlustleistung des Chips von 200W die vollständig (vereinfachende Annahme) über die Kühlung abgeführt wird.

Die Wärmeleitungsgleichung (Gl. 9.19) nach Fourier für den stationären Fall eines festen Körpers mit parallelen Wandflächen lautet:

$$\dot{Q} = \frac{\lambda}{s} * A_{leit} * (T_{W1} - T_{W2}) \quad (\text{Gl. 9.19})$$

Berechnungen

Annahme die Wärmeübertragungsfläche ist die Grundfläche der Wärmesenke.

$$A_{leit} = 240 [mm^2] = 240 * 10^{-6} [m^2]$$

Die Berechnung der Temperaturen an den Grenzflächen erfolgt in Tabelle 9-1 nach (Gl. 9.20), wobei von der Wandungstemperatur der Kühlung ausgegangen T_{W1} berechnet wird und T_{W1} gleich T_{W2} der folgenden Schicht entspricht. Der Schichtaufbau der einseitig flüssigkeitsgekühlten in Glas gekapselten Kühlung des Leistungshalbleiters am Testsystem ist ebenfalls in Tabelle 9-1 abgebildet.

$$T_{W1} = \frac{\dot{Q} * s}{\lambda * A_{leit}} + T_{W2} \quad (\text{Gl. 9.20})$$

Tabelle 9-1 Berechnung der Grenzflächentemperaturen der einseitig flüssigkeitsgekühlten in Glas gekapselten Kühlung Variante Restglasdicke 30µm

Schicht	Nr.	Schichtdicke s[m]	Wärmeleitwert $\lambda [W/(m*K)]$	T_{W1} [°C]
Kühlung	0	-	-	75,7
aSi	1	$80*10^{-9}$	150	75,7
Glas	2	$30*10^{-6}$	1,2	96,5
Borofloat33				
aSi	3	$80*10^{-9}$	150	96,5
Al	4	$500*10^{-9}$	235	96,5
Ti	5	$700*10^{-9}$	22	96,6
Ag	6	$500*10^{-9}$	430	96,6
Cu	7	$100*10^{-6}$	385	96,8
Wärmesenke				
Ag	8	$1*10^{-6}$	430	96,8
Lot	9	$100*10^{-6}$	81,6	97,8

Die Chiprückseitentemperatur bei der Variante mit Restglasdicke 30µm beträgt 97,8°C.

Die Variante mit 50 µm Restglasdicke wurde in Tabelle 9-2 analog zur Variante mit 30µm Restglasdicke berechnet.

Tabelle 9-2 Berechnung der Grenzflächentemperaturen der einseitig flüssigkeitsgekühlten in Glas gekapselten Kühlung Variante Restglasdicke 50µm

Schicht	Nr.	Schichtdicke s[m]	Wärmeleitwert λ [W/(m*K)]	T_{W1} [°C]
Kühlung	0	-	-	75,7
aSi	1	$80 \cdot 10^{-9}$	150	75,7
Glas	2	$50 \cdot 10^{-6}$	1,2	110,4
Borofloat33				
aSi	3	$80 \cdot 10^{-9}$	150	110,4
Al	4	$500 \cdot 10^{-9}$	235	110,4
Ti	5	$700 \cdot 10^{-9}$	22	110,5
Ag	6	$500 \cdot 10^{-9}$	430	110,5
Cu	7	$100 \cdot 10^{-6}$	385	110,7
Wärmesenke				
Ag	8	$1 \cdot 10^{-6}$	430	110,7
Lot	9	$100 \cdot 10^{-6}$	81,6	111,7

Die Chiprückseitentemperatur bei der Variante mit Restglasdicke 50 µm beträgt 111,7 und die Differenz zur Variante mit 30µm Restglasdicke beträgt somit 13,9 °C. Die Sicherheit zur maximalen Betriebstemperatur von 150°C ist auch bei dieser Variante noch ausreichend hoch

Die Variante mit 100 µm Restglasdicke wurde in Tabelle 9-3 analog zu den Varianten mit 30 µm und 50 µm Restglasdicke berechnet.

Tabelle 9-3 Berechnung der Grenzflächen Temperaturen der einseitig flüssigkeitsgekühlten in Glas gekapselten Kühlung Variante Restglasdicke 100µm

Schicht	Nr.	Schichtdicke s[m]	Wärmeleitwert λ [W/(m*K)]	T_{W1} [°C]
Kühlung	0	-	-	75,7
aSi	1	$80 \cdot 10^{-9}$	150	75,7
Glas	2	$100 \cdot 10^{-6}$	1,2	145,2
Borofloat33				
aSi	3	$80 \cdot 10^{-9}$	150	145,2
Al	4	$500 \cdot 10^{-9}$	235	145,2
Ti	5	$700 \cdot 10^{-9}$	22	145,2

Berechnungen

Ag	6	$500 \cdot 10^{-9}$	430	145,2
Cu	7	$100 \cdot 10^{-6}$	385	145,4
Wärmesenke				
Ag	8	$1 \cdot 10^{-6}$	430	145,4
Lot	9	$100 \cdot 10^{-6}$	81,6	146,4

Die Chiprückseitentemperatur bei dieser Variante mit Restglasdicke 100 μm beträgt 146,4 °C und die Differenz zur Variante mit 30 μm Restglasdicke beträgt somit 48,6 °C bzw. die Differenz zur Variante mit 50 μm beträgt 34,7. Diese Variante liegt bereits sehr nahe an der maximalen Betriebstemperatur von 150°C.

Aus den Berechnungen ist ersichtlich dass die Restglasdicke der entscheidende Faktor in Bezug auf die Wärmeleitung durch den Schichtaufbau bei der einseitig flüssigkeitsgekühlten in Glas gekapselten Kühlung darstellt. Die Restglasdicke soll aus diesem Grund möglichst gering gehalten werden. Die minimale Restglasdicke wird durch die Anforderung der elektrischen Isolierung des Kühlkreislaufes bestimmt, jedoch spielt dies eine untergeordnete Rolle, da die Restglasdicke die für die Isolierung notwendig ist, deutlich kleiner ist als die notwendige Restglasdicke für die Fertigung auf Waferebene (Waferhandling). Als Kompromiss zwischen möglichst geringem Wärmewiderstand und Prozesssicherheit während der Fertigung ist eine Restglasdicke von ca. 30 μm für den Aufbau der einseitigen Kühlung als Zieldicke angestrebt.

9.1.3 Berechnung der Chiprückseitentemperatur bei Aufbau in einem Standardmodul

Die Berechnung der Chiprückseitentemperatur mit dem Schichtaufbau eines Standardmoduls wird analog zur Berechnung der Chiprückseitentemperatur bei der einseitigen Kühlung (9.1.2) durchgeführt, jedoch mit dem in Kapitel 4 beschriebenen Schichtaufbau für das Standardmodul. Um mit der einseitigen Kühlung vergleichbar zu bleiben, wurde als Wärmeübertragungsfläche dieselbe Fläche wie bei der einseitigen Kühlung mit $240 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$ verwendet und die Temperatur an der Grenzfläche zur Kühlung mit $75,7 \text{ °C}$ festgelegt (analog zur einseitigen Kühlung). Die Temperaturen an den Grenzflächen wurde in Tabelle 9-4 mit (Gl. 9.20) berechnet.

Tabelle 9-4 Berechnung der Grenzflächen Temperaturen bei einer Kühlung des Chips in einem Standardmodul

Schicht	Nr.	Schichtdicke s[m]	Wärmeleitwert λ [W/(m*K)]	T_{w1} [°C]
Kühlung	0	-	-	75,7
Wärmeleitpaste	1	$50 \cdot 10^{-6}$	0,8	127,8
Grundplatte	2	$5 \cdot 10^{-3}$	237	145,4
Lot	3	$100 \cdot 10^{-6}$	81,6	146,4
Cu	4	$300 \cdot 10^{-6}$	385	147,0
Keramik (Al ₂ O ₃)	5	$630 \cdot 10^{-6}$	24	168,9
Cu	6	$300 \cdot 10^{-6}$	385	169,6
Lot	7	$50 \cdot 10^{-6}$	81,6	170,1

Die Chiprückseitentemperatur für den Aufbau des Testsystems in einem Standardmodul beträgt ca. 170 °C . Dies ist eine deutlich höhere Temperatur als bei allen drei Varianten der einseitigen Kühlung. Die maßgeblichen Schichten für diesen Temperaturanstieg sind die Wärmeleitpaste, die Aluminiumoxidkeramik und die Grundplatte. Wobei der Einfluss der Wärmeleitpaste am größten ist. Diese Schicht ist besonders kritisch, da die Applizierung der Wärmeleitpaste in Bezug auf Schichtdicke und Void-Freiheit problematisch ist und somit der Einfluss noch deutlich höher sein kann.

9.1.4 Berechnung der Chiptemperatur und der Grenzflächentemperaturen bei der beidseitigen Kühlung

Der Aufbau der beidseitigen Kühlung wird in Kapitel 6.3 beschrieben. Dieser konzeptionell erstellte Aufbau führt zu einem Schichtaufbau, wie in Tabelle 9-5 dargestellt. Es wurden für die Berechnungen die Annahmen getroffen, dass der Chip die Wärmequelle darstellt, aber selbst keine Ausdehnung besitzt, und dass die Wandungstemperaturen an den Grenzflächen zu den Kühlkavitäten konstant bei 37,7 °C liegen bei einer zu übertragenden Wärmeleistung von 200 W.

Die Wärmewiderstände in Tabelle 9-5 wurden über (Gl. 4.1) berechnet mit den Wärmeleitflächen für die Vorderseite

$$A_{leitV} = 196,6 * 10^{-6} [m^2]$$

und für die Rückseite.

$$A_{leitR} = 216 * 10^{-6} [m^2]$$

Tabelle 9-5 Schichtaufbau und Berechnung der Wärmeübergangswiderstände bei einer beidseitigen Kühlung des Chips

Schicht	Nr.	Schichtdicke s[m]	Wärmeleitwert $\lambda [W/(m*K)]$	Wärmewiderstand $R_{th} [K/W]$
Kühlung	0	-	-	-
Isolierung (AlN)	1	$1*10^{-6}$	220	$2,3125*10^{-5}$
Cu	2	$510*10^{-6}$	385	$6,7393*10^{-3}$
Vorderseite				
Chip	3	-	-	-
Rückseite				
Cu	4	$455*10^{-6}$	385	$5,4714*10^{-3}$
Isolierung (AlN)	5	$1*10^{-6}$	220	$2,1044*10^{-5}$
Kühlung	6	-	-	-

Der Gesamtwärmewiderstand wird nach (Gl. 9.21) berechnet.

$$R_{thges} = \sum_{i=1}^{i=n} R_{thi} \quad (\text{Gl. 9.21})$$

Mit den in Tabelle 9-5 berechneten Wärmewiderständen ergibt sich ein Gesamtwärmewiderstand nach (Gl. 9.21) für die Vorderseite von

$$R_{thgesV} = R_{thAlNV} + R_{thCuV} = 6,8 * 10^{-3} \left[\frac{K}{W} \right]$$

und für die Rückseite von

$$R_{thgesR} = R_{thAlNR} + R_{thCuR} = 5,5 * 10^{-3} \left[\frac{K}{W} \right]$$

Die Verlustleistung bzw. die zu übertragende Wärmeleistung setzt sich nach (Gl. 9.22) zusammen.

$$\dot{Q} = \dot{Q}_V + \dot{Q}_R \quad (\text{Gl. 9.22})$$

mit der zu übertragene Wärmeleistung an der Vorderseite und der Rückseite nach (Gl. 9.23)

$$\dot{Q} = \frac{\Delta T}{R_{th}} \quad (\text{Gl. 9.23})$$

ergibt sich die (Gl. 9.24) für die gesamte übertragene Wärmeleistung (Verlustleistung).

$$\dot{Q} = \frac{T_{Chip} - T_{WV}}{R_{thgesV}} + \frac{T_{Chip} - T_{WR}}{R_{thgesR}} \quad (\text{Gl. 9.24})$$

Durch Umformen von (Gl. 9.23) und der Bedingung (Gl. 9.25), dass die Wandungstemperatur zur Kühlkavität an der Vorderseite und die Wandungstemperatur an der Rückseite zur Kühlkavität gleich sind

$$T_{WV} = T_{WR} = T_W \quad (\text{Gl. 9.25})$$

ergibt sich eine (Gl. 9.26) zur Berechnung der Chiptemperatur.

$$T_{Chip} = \frac{\dot{Q} * R_{thgesV} * R_{thgesR}}{R_{thgesV} + R_{thgesR}} + T_W \quad (\text{Gl. 9.26})$$

$$T_{Chip} = 76,3 [^{\circ} C]$$

Berechnungen

Mit der berechneten Chiptemperatur kann die abgeführte Wärmeleistung an der Vorderseite und an der Rückseite nach (Gl. 9.23) berechnet werden.

$$\dot{Q}_V = \frac{T_{chip} - T_W}{R_{thgesV}} = 89,6 \text{ [W]}$$

$$\dot{Q}_R = \frac{T_{chip} - T_W}{R_{thgesR}} = 110,4 \text{ [W]}$$

Berechnung der Temperaturen an den Grenzflächen in Tabelle 9-6 ausgehend von der Vorderseite. Die Wärmewiderstände wurden aus Tabelle 9-5 übernommen nach der (Gl. 9.27) für die Vorderseite

$$T_{W1} = \dot{Q}_V * R_{ths} + T_{W2} \quad (\text{Gl. 9.27})$$

und ab dem Chip für die Rückseite nach (Gl. 9.28)

$$T_{W1} = T_{W2} - \dot{Q}_R * R_{ths} \quad (\text{Gl. 9.28})$$

Es wird von der Wandungstemperatur der Kühlung an der Vorderseite ausgegangen, T_{W1} berechnet, und T_{W1} entspricht T_{W2} der folgenden Schicht.

Tabelle 9-6 Berechnung der Grenzflächen Temperaturen der beidseitig flüssigkeitsgekühlten in Glas gekapselten Kühlung

Schicht	Nr.	Wärmewiderstand R_{th} [K/W]	zu übertragende Wärmeleistung Q [W]	T_{W1} [°C]
Kühlung	0	-	89,6368	75,7
Isolierung (AIN)	1	$2,3125 \cdot 10^5$	89,6368	75,7
Cu	2	$6,7393 \cdot 10^{-3}$	89,6368	76,3
Vorderseite				
Chip	3	-	-	76,3
Rückseite				
Cu	4	$5,4714 \cdot 10^{-5}$	110,3632	75,7
Isolierung (AIN)	5	$2,1044 \cdot 10^{-5}$	110,3632	75,7

Der Temperaturverlauf über den gesamten Aufbau zeigt, dass keine Schicht zu einer deutlichen Temperaturerhöhung führt.

9.1.5 Berechnung der maximal übertragbaren Wärmeleistung aufgrund der Wärmeleitung des Testsystems

Die Berechnung erfolgt für die drei Aufbauten bei der maximal erlaubten Betriebstemperatur (150°C) des Testsystems

- beidseitige Kühlung des Testsystems
- einseitige Kühlung (Restglasdicke 30µm) des Testsystems
- Kühlung des Testsystems in einem Standardmodul

Die Annahmen für die Berechnung sind analog zu den in Kapitel 9.1.2 bis 9.1.4 getroffenen Annahmen zu den jeweiligen Aufbauten.

Berechnung der maximalen übertragbaren Wärmeleistung bei beidseitiger Kühlung des Testsystems:

Berechnung der maximalen übertragbaren Wärmeleistung über die Vorderseite und der Rückseite nach (Gl. 9.23):

$$\dot{Q}_V = \frac{T_{Chipmax} - T_W}{R_{thgesV}} = 10985,5 [W] = 11,0 [kW]$$

$$\dot{Q}_R = \frac{T_{Chipmax} - T_W}{R_{thgesR}} = 13525,6 [W] = 13,5 [kW]$$

Die gesamte übertragbare Wärmeleistung ergibt sich nach (Gl. 9.22)

$$\dot{Q} = \dot{Q}_V + \dot{Q}_R = 24511,1 [W] = 24,5 [kW]$$

Berechnung der maximalen übertragbaren Wärmeleistung bei einseitiger Kühlung (Restglasdicke 30µm) des Testsystems:

Die Berechnung der benötigten Wärmewiderstände erfolgt in Tabelle 9-7 mit (Gl. 4.1) bei einer Wärmeübertragungsfläche von $A = 240 \cdot 10^{-6} \text{ [m}^2\text{]}$

Tabelle 9-7 Berechnung der Schichtwärmewiderstände bei der einseitig flüssigkeitsgekühlten in Glas gekapselten Kühlung; Variante Restglasdicke 30µm

Schicht	Nr.	Schichtdicke s[m]	Wärmeleitwert $\lambda \text{ [W/(m}\cdot\text{K)]}$	Wärmewiderstand $R_{th} \text{ [K/W]}$
Kühlung	0	-	-	-
aSi	1	$80 \cdot 10^{-9}$	150	$2,2 \cdot 10^{-6}$
Glas Borofloat33	2	$30 \cdot 10^{-6}$	1,2	$1,0 \cdot 10^{-1}$
aSi	3	$80 \cdot 10^{-9}$	150	$2,2 \cdot 10^{-6}$
Al	4	$500 \cdot 10^{-9}$	235	$8,9 \cdot 10^{-6}$
Ti	5	$700 \cdot 10^{-9}$	22	$1,3 \cdot 10^{-4}$
Ag	6	$500 \cdot 10^{-9}$	430	$4,8 \cdot 10^{-6}$
Cu Wärmesenke	7	$100 \cdot 10^{-6}$	385	$1,1 \cdot 10^{-3}$
Ag	8	$1 \cdot 10^{-6}$	430	$9,7 \cdot 10^{-6}$
Lot	9	$100 \cdot 10^{-6}$	81,6	$5,1 \cdot 10^{-3}$

Mit den in Tabelle 9-7 berechneten Wärmewiderständen ergibt sich ein Gesamtwärmewiderstand nach (Gl. 9.21) von

$$R_{thges} = R_{th1} + R_{th2} + R_{th3} + R_{th4} + R_{th5} + R_{th6} + R_{th7} + R_{th8} + R_{th9}$$

$$R_{thges} = 1,1 \cdot 10^{-1} \left[\frac{K}{W} \right]$$

Berechnung der maximalen übertragbaren Wärmeleistung nach (Gl. 9.23)

$$\dot{Q} = \frac{T_{Chipmax} - T_W}{R_{thges}} = 672,2 \text{ [W]}$$

Berechnung der maximalen übertragbaren Wärmeleistung für die Kühlung des Testsystems in einem Standardmodul

Die Berechnung der benötigten Wärmewiderstände erfolgt in Tabelle 9-8 mit (Gl. 4.1) bei einer Wärmeübertragungsfläche von $A = 240 \cdot 10^{-6} \text{ [m}^2\text{]}$

Tabelle 9-8 Berechnung der Grenzflächentemperaturen bei einer Kühlung des Chip in einem Standardmodul

Schicht	Nr.	Schichtdicke s[m]	Wärmeleitwert λ [W/(m*K)]	Wärmewiderstand R_{th} [K/W]
Kühlung	0	-	-	-
Wärmeleitpaste	1	$50 \cdot 10^{-6}$	0,8	$2,6 \cdot 10^{-1}$
Grundplatte	2	$5 \cdot 10^{-3}$	237	$8,8 \cdot 10^{-2}$
Lot	3	$100 \cdot 10^{-6}$	81,6	$5,1 \cdot 10^{-3}$
Cu	4	$300 \cdot 10^{-6}$	385	$3,2 \cdot 10^{-3}$
Keramik (Al ₂ O ₃)	5	$630 \cdot 10^{-6}$	24	$1,1 \cdot 10^{-1}$
Cu	6	$300 \cdot 10^{-6}$	385	$3,2 \cdot 10^{-3}$
Lot	7	$50 \cdot 10^{-6}$	81,6	$2,6 \cdot 10^{-3}$

Mit den in Tabelle 9-8 berechneten Wärmewiderständen ergibt sich ein Gesamtwärmewiderstand nach (Gl. 9.21) von

$$R_{thges} = R_{th1} + R_{th2} + R_{th3} + R_{th4} + R_{th5} + R_{th6} + R_{th7}$$

$$R_{thges} = 4,7 \cdot 10^{-1} \left[\frac{K}{W} \right]$$

Berechnung der maximalen übertragbaren Wärmeleistung nach (Gl. 9.23)

$$\dot{Q} = \frac{T_{Chipmax} - T_W}{R_{thges}} = 157,4 \text{ [W]}$$

Beim Vergleich der übertragbaren Wärmeleistung bzw. der abführbaren Verlustleistung der 3 Varianten

- beidseitige Kühlung des Testsystems (24,5 kW)
- einseitige Kühlung (Restglasdicke 30µm) des Testsystems (672,3 W)
- Kühlung des Testsystems in einem Standardmodul (157,4 W)

ist klar ersichtlich, dass sowohl die einseitige Kühlung als auch die beidseitige Kühlung zu einer drastischen Steigerung der übertragbaren Wärmeleistung führen. Die berechneten Werte für die Wärmeleistung sind jedoch nur gültig für die gesetzten Randbedingungen, da sie nur die Wärmeleitung über den Schichtaufbau mit konstanten Wandungstemperaturen zu den Kühlungen berücksichtigen. Es wird nicht berücksichtigt, ob die Kühlung in der Lage ist diese Wandungstemperatur von ca. 75,7 °C zu halten.

9.2 Thermische Simulationen zur Wärmesenke

Die thermische Simulation wird an drei Aufbauvarianten durchgeführt. Als Ausgangssituation wird ein 70 μm dicker Siliziumchip mit einer 100 μm Wärmesenke aus den Materialien

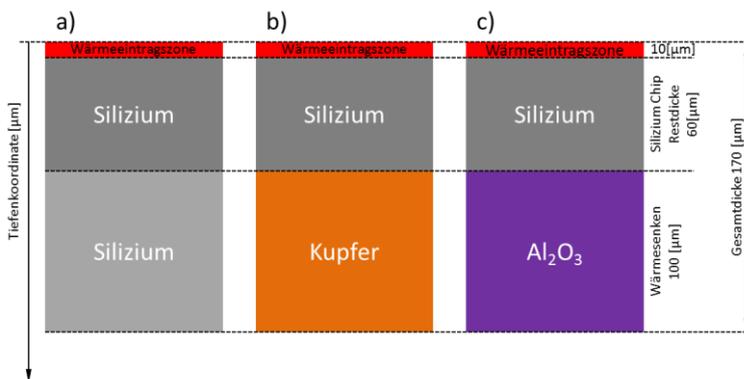


Abbildung 149 Aufbau für thermische Simulation der Wärmesenke

beträgt 70 J. Dies entspricht über diesen kurzen Zeitraum einer Leistung von 3,5 MW. Der von der Simulation betrachtete Zeitraum beträgt 100 μs und die Temperaturentwicklung soll über den gesamten Querschnitt (der Tiefencoordinate) berechnet werden, daher genügt die Betrachtung des 1D instationären Wärmeleitungsproblems. Als Randbedingungen werden eine konstante Temperatur an der Chipvorderseite (Tiefencoordinate $x = 0\mu\text{m}$) von 25 $^{\circ}\text{C}$ und eine konstante Temperatur an der Wärmesenkenrückseite (Tiefencoordinate $x = 170\mu\text{m}$) festgelegt.

Silizium (Abbildung 149a), Kupfer (Abbildung 149b), und Al_2O_3 (Abbildung 149c), gewählt. Der Wärmeimpuls wird in den oberen 10 μm des Chip (aktiver Bereich) und über einen Zeitraum von 20 μs aufgeprägt, dies stellt einen Kurzschluss dar. Die durch den Wärmeimpuls aufgeprägte Wärmemenge

Die FD-Simulation erfolgt über die Lösung der Wärmeleitungsgleichung im eindimensionalen

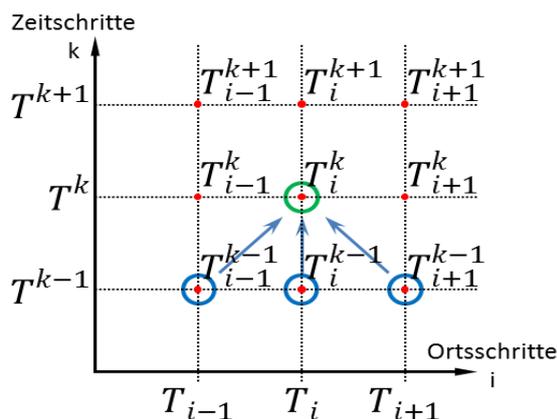


Abbildung 150 Berechnungsschema Explizit Euler

Fall (Gl. 9.29) durch ein explizites Euler Verfahren. Hierbei wird aus 3 bereits bekannten Temperaturwerten der gesuchte Temperaturwert berechnet (Abbildung 150). Die Berechnung selbst wurde mit Scilab durchgeführt. Um die Wärmeleitungsgleichung lösen zu können, wurde eine Orts- (Gl. 9.30) und eine Zeitdiskretisierung (Gl. 9.31) der partiellen eindimensionalen

Wärmeleitungsgleichung durchgeführt und daraus eine Berechnungsvorschrift entwickelt mit der das Temperaturfeld mit den gegebenen Randbedingungen gelöst werden konnte.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{\rho * c_p} * \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\dot{q}(x, t)}{\rho * c_p} \quad (\text{Gl. 9.29})$$

Die Zeitdiskretisierung

$$\left(\frac{\partial T}{\partial t}\right)_i^k = \frac{T_i^{k+1} - T_i^k}{\Delta t} + \sigma(\Delta t) \quad (\text{Gl. 9.30})$$

Die Ortsdiskretisierung

$$\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}\right)_i^k = \frac{T_{i-1}^k - 2 * T_i^k + T_{i+1}^k}{\Delta x^2} + \sigma(\Delta x^2) \quad (\text{Gl. 9.31})$$

Bestimmung der Berechnungsvorschrift durch Einsetzen der Diskretisierungen (Gl. 9.30) (Gl. 9.31) in die Wärmeleitungsgleichung (Gl. 9.29).

$$\frac{T_i^{k+1} - T_i^k}{\Delta t} = \frac{\lambda}{\rho * c_p} * \frac{T_{i-1}^k - 2 * T_i^k + T_{i+1}^k}{\Delta x^2} + \frac{\dot{q}(x, t)}{\rho * c_p}$$

Die Stabilität des expliziten Verfahrens ist gewährleistet, wenn das Stabilitätskriterium (Gl. 9.32) erfüllt ist.

$$M \leq \frac{1}{2 * n} \quad (\text{Gl. 9.32})$$

Um das Stabilitätskriterium leichter kontrollieren zu können, wird der Modul in die diskretisierte Wärmeleitungsgleichung eingesetzt.

$$M = \frac{\lambda}{\rho * c_p} * \frac{\Delta t}{\Delta x^2} \quad (\text{Gl. 9.33})$$

$$T_i^{k+1} - T_i^k = \frac{\lambda}{\rho * c_p} * \frac{\Delta t}{\Delta x^2} (T_{i-1}^k - 2 * T_i^k + T_{i+1}^k) + \frac{\dot{q}(x, t) * \Delta t}{\rho * c_p}$$

$$T_i^{k+1} - T_i^k = M * (T_{i-1}^k - 2 * T_i^k + T_{i+1}^k) + M * \frac{\Delta x^2}{\lambda} * \dot{q}(x, t)$$

Durch Umformen wird die Berechnungsvorschrift (Gl. 9.34) für den nächsten Zeitschritt aus den benachbarten Werten des vorigen Zeitschritts erhalten (siehe Abbildung 150).

$$T_i^{k+1} = M * T_{i-1}^k + (1 - 2 * M) * T_i^k + M * T_{i+1}^k + M * \frac{\Delta x^2}{\lambda} * \dot{q}(x, t) \quad (\text{Gl. 9.34})$$

Für die Berechnung des Temperaturfeldes wurde neben den Stoffkonstanten und einem festgelegten Ortschritt von 2,5 µm mit einem festgelegtem Modul von 0,3 der Zeitschritt für die Siliziumstrecke bestimmt, und in weiterer Folge mit dem so bestimmten Zeitschritt von $2.0804 * 10^{-2}$ µs die Module für die weiteren Materialien bestimmt. An den Materialübergängen wurde der Modul aus dem Material vor und nach dem Übergang gemittelt.

9.2.1 Ergebnisse der thermischen Simulation der Wärmesenke

Die Ergebnisse zeigen deutlich, dass die Spitzentemperatur, wie erwartet, bei der Al₂O₃ Keramikwärmesenke am höchsten (ca. 2166°C Abbildung 153), bei der Siliziumwärmesenke deutlich geringer (ca. 580°C Abbildung 151) und bei der Kupferwärmesenke (ca. 233°C Abbildung 152) am niedrigsten ist.

Die Siliziumwärmesenke:

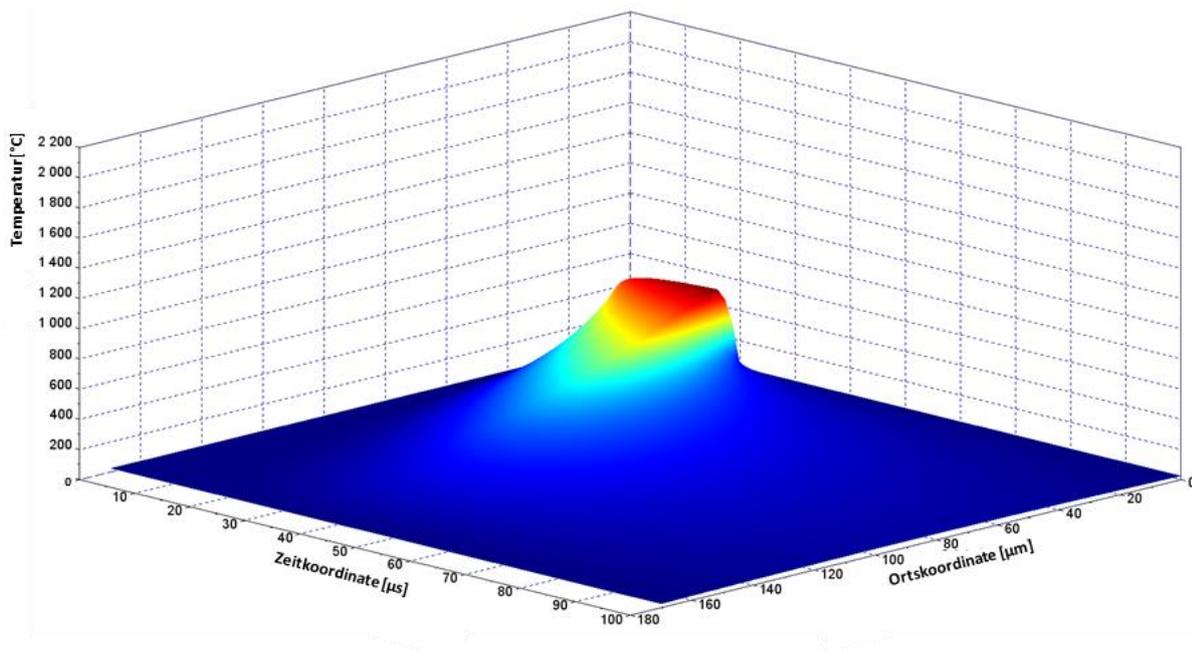


Abbildung 151 Simulationsergebnis Siliziumwärmesenke

Die Kupferwärmesenke:

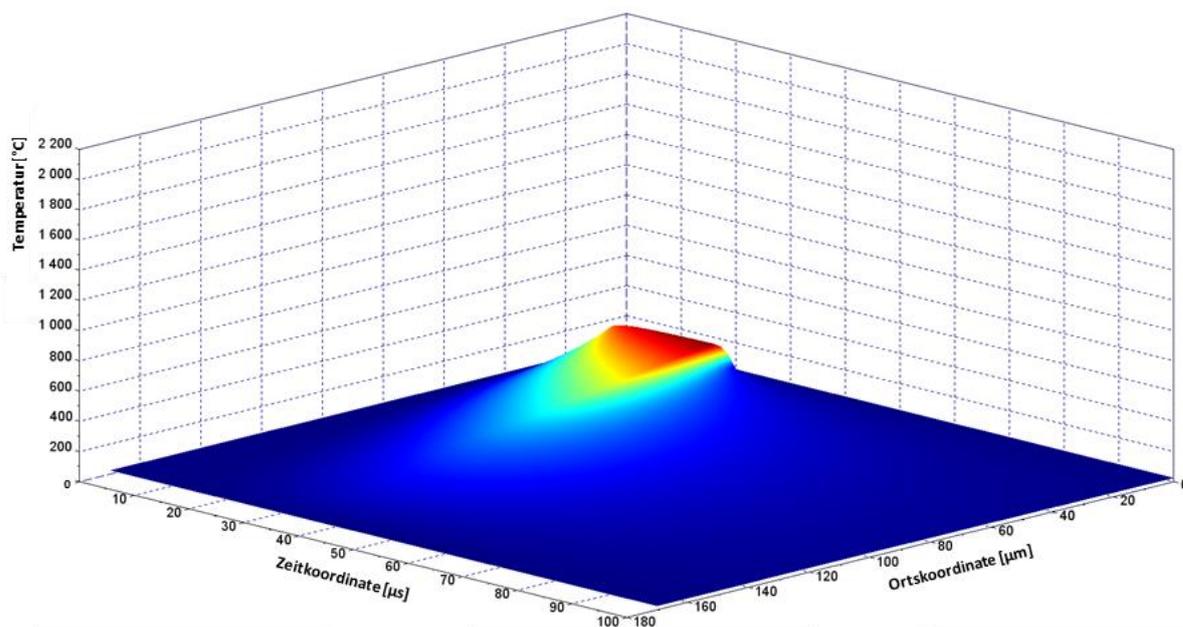


Abbildung 152 Simulationsergebnis Kupferwärmesenke

Die Al_2O_3 Wärmesenke:

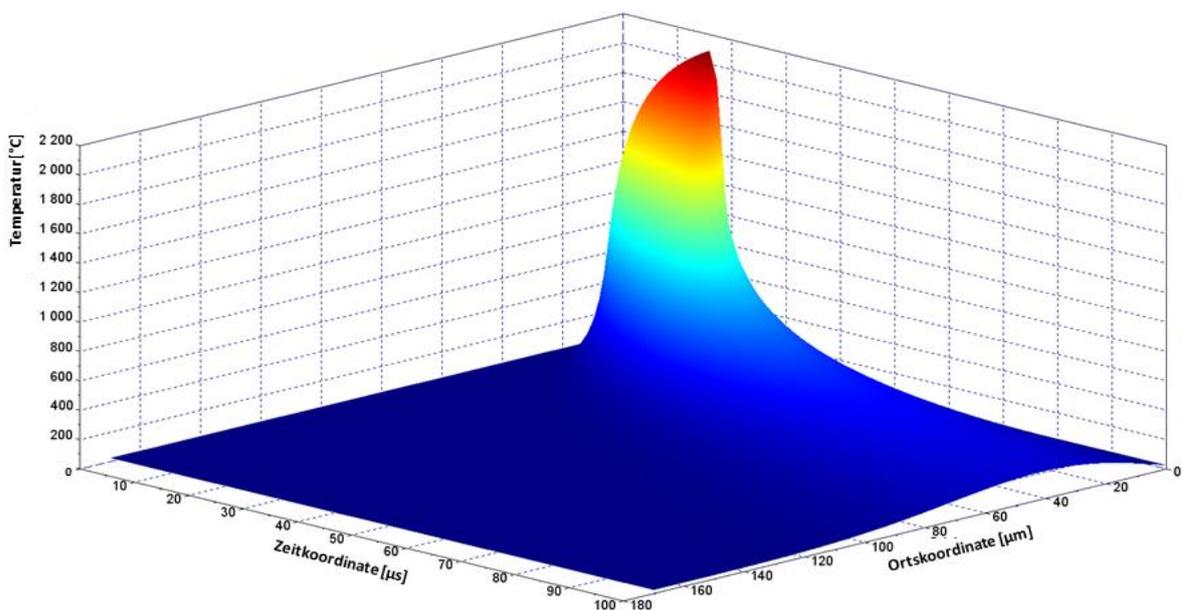


Abbildung 153 Simulationsergebnis der Al_2O_3 Wärmesenke

Am Ende des Wärmepulses nach 10 μs wurde das Temperaturprofil über die Tiefenkoordinate ermittelt. Aus den Temperaturprofilen ist erkennbar, dass die Wärme in den Varianten mit der Silizium- und mit der Kupferwärmesenke deutlich besser über den Querschnitt verteilt (Temperaturanstieg deutlich im Wärmesenkenbereich) hat als bei der Al_2O_3 Wärmesenke, wo erst bei x ca. $60\mu\text{m}$ (noch im Silizium Bereich) ein deutlicher Temperaturanstieg erkennbar ist.

**Temperaturprofil über Tiefenkoordinate
am Ende des Wärmeimpulses**

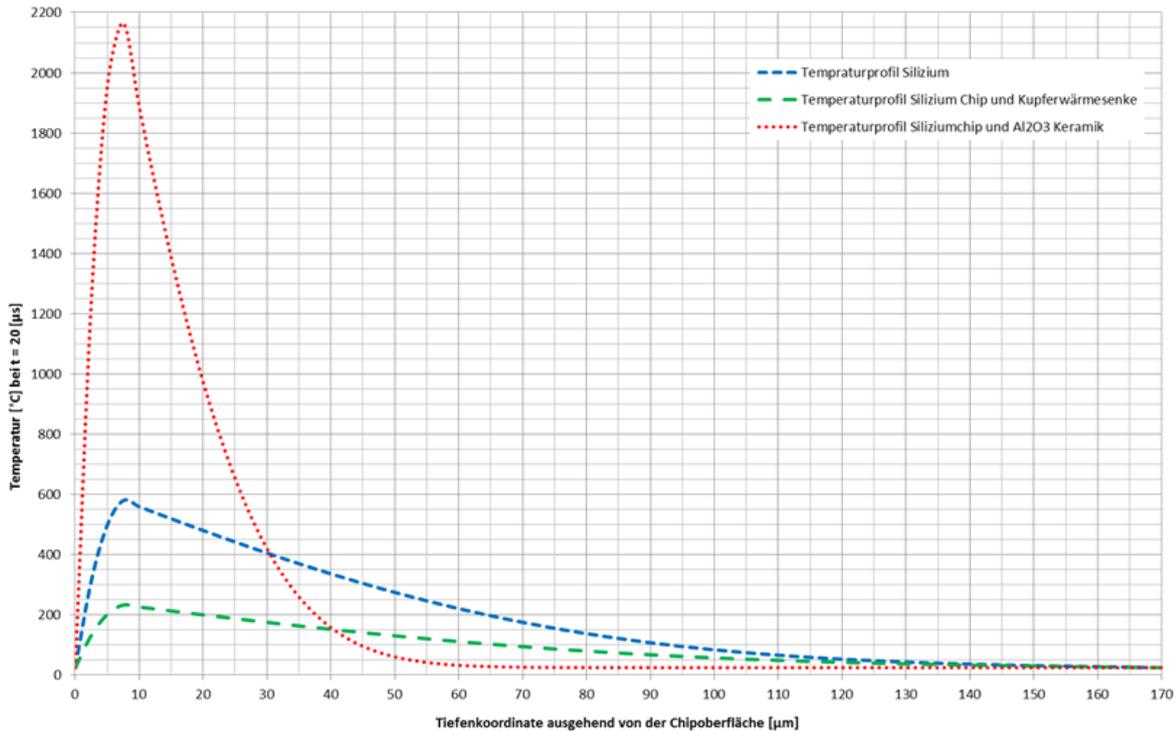


Abbildung 154 Temperaturprofil über den Querschnitt nach $20\mu\text{s}$

Bei allen drei Varianten fällt auf, dass die Spitzentemperatur nicht in der Mitte der Wärmeeintragszone erreicht wird sondern in Richtung der Wärmesenke verschoben ist. Dies ist in dem Wärmeabtransport aus der Wärmeeintragszone begründet. Die Temperaturrandbedingung an der Chipoberfläche hält die Oberfläche konstant auf 25°C ; würde sich am Ende der Wärmeeintragszone ebenso eine solche Randbedingung befinden, wäre die Spitzentemperatur genau in der Mitte der Wärmeeintragszone, da die Temperatur am Ende der Wärmeeintragszone jedoch zu diesem Zeitpunkt höher ist und somit das treibende Temperaturgefälle niedriger, ist der Wärmestrom in Richtung Wärmesenke geringer als in Richtung Oberfläche. Dadurch wird die Spitzentemperatur in Richtung Wärmesenke verschoben.

10 Zusammenfassung

Problemstellung für diese Dissertation war die Entwicklung eines Kühlkonzeptes für Leistungselektronik.

Es wurde mittels eines Demonstrators gezeigt, dass das Konzept der einseitigen aktiven Wasserkühlung auf Waferebene gefertigt werden kann. Dabei wurde die Prozessfolge für die Fertigung einer solchen Kühlung festgelegt. Die beidseitige Kühlung wurde konzeptionell entworfen und einzelne kritische Prozessschritte wurden durchgeführt. Es zeigte sich bei beiden Kühlvarianten, dass die Prozessfolge von entscheidender Bedeutung für die Herstellung auf Waferebene ist.

Bei der Glasstrukturierung wurde für die nasschemische Ätzung von Glas mit Flusssäure ein Algorithmus entwickelt, mit dem eine Vorausberechnung der Ätzrate in Abhängigkeit von Temperatur und Flusssäurekonzentration möglich ist. Die Entwicklung der Formel erfolgte experimentell, und es zeigte sich sowohl bei der Temperatur als auch bei der Konzentration eine exponentielle Abhängigkeit der Ätzrate. Es wurden weitere Glasstrukturierungsmethoden untersucht wie mechanisches Bohren und Laserablation. Die mechanische Strukturierung konnte die Anforderungen jedoch nicht erfüllen und die Laserablation ist den nasschemischen Verfahren hinsichtlich Durchsatz unterlegen. Daher ist die nasschemische Ätzung der Zielprozess für den Aufbau der Kühlungen.

Bei den untersuchten Waferverbindungsmethoden konnten für den Aufbau die keramischen Klebstoffe aufgrund der Ergebnisse der Versuche zur mechanischen Festigkeit ausgeschlossen werden, da die geforderten Festigkeitswerte nicht erreicht werden konnten. Ein weiteres Ausschlusskriterium für die keramischen Klebstoffe war die schlechte Verarbeitbarkeit der untersuchten Systeme. Bei den untersuchten Glasloten konnte gezeigt werden, dass die mechanische Festigkeit der Glaslote mit Blei höher war als die Festigkeit der bleifreien Glaslote. Als Zielprozesse konnten der anodische Bond und die Verklebung mit dem Epoxidharz Epo-Tek 353 ND definiert werden. Die Auswahl der Verbindungsmethode erfolgt zwischen den beiden Verbindungsprozessen unter Berücksichtigung der von der Prozessfolge vorgegebenen Randbedingungen.

Bei den Untersuchungen zur Metallisierung von Glas als Seedlayer für eine galvanische Kupferabscheidung konnte ein System gefunden werden, mit dem die Anforderungen für die Kühlungen erfüllt werden konnten. Hierbei lag der Schwerpunkt der Untersuchungen auf der

Haftung der Metallisierung auf Glas. Die Metallisierung wurde mittels eines Schichtstapels, ausgehend vom Glas, aus amorphem Silizium, Aluminium, Titan und Silber erzeugt. Hierbei dient die Siliziumschicht als Haftvermittler zwischen dem Aluminium und dem Glas.

Bei den Untersuchungen zur Void-Minimierung beim Reflowlöten konnte jeweils ein Layout für den Lotauftrag für IGBT und der Diode gefunden werden, bei dem ein Auftreten von Lunkern sehr gering ist. Durch die Vermeidung von Voids ist ein guter Wärmeübergang zwischen Chip und Wärmesenke bei der einseitigen Kühlung gewährleistet.

Bei den Untersuchungen zur Chipkühlung mit Hilfe eines Labor-Aufbaues bei der einseitigen Kühlung konnte gezeigt werden, dass durch die Kühlung bei einem absichtlich erzeugten Kurzschluss eine Zerstörung der Bauelemente verhindert werden konnte, während die Versuche ohne Kühlung zu einem sofortigem Bauteilversagen führte.

In den Berechnungen zur erzwungene Konvektion bei der einseitige Kühlung wurde gezeigt, dass bei der einseitige Kühlung eine Wandungstemperatur zwischen Kühlkavität und Fluid, bei den zu Grunde gelegten Randbedingungen und einer Verlustleistung von 200 W, von rund 76 °C gehalten werden kann. Die Chiprückseitentemperatur beträgt in Folge dessen bei der einseitigen Kühlung rund 98 °C. Die Chiprückseitentemperatur liegt deutlich unter der maximalen Betriebstemperatur der Chips. Der größte auftretende Wärmewiderstand stellt bei diesem Aufbau das Glas dar. Bei einem Aufbau in einem Standardmodul wurde zum Vergleich eine Chiprückseitentemperatur bei analogen Randbedingungen errechnet. Die Berechnung der Chiprückseitentemperatur bei der beidseitigen Kühlung zeigte bei analogen Randbedingungen eine deutliche Reduktion der Temperatur auf rund 76 °C. Diese Reduktion der Chiprückseitentemperatur war aufgrund der beidseitigen Wärmeabführung und der Eliminierung des Restglases im Aufbau möglich.

In weiteren Berechnungen wurde gezeigt, dass die maximal abführbare Wärmemenge bei den berechneten Varianten

- | | |
|--|-----------|
| - Kühlung des Testsystems im Standardmodul | 157,5 W |
| - einseitige Kühlung des Testsystems | 672,2 W |
| - beidseitige Kühlung des Testsystems | 24511,1 W |

beträgt.

Dabei ist zu berücksichtigen, dass alle drei Varianten mit analogen Randbedingungen berechnet wurden und die zu Grunde gelegte Wandungstemperatur von rund 76 °C bei der beidseitigen Kühlung nicht gehalten werden kann.

Bei den Berechnungen zur Wärmesenke wurden die bei kurzen Wärmeimpulsen entstehenden Spitzentemperaturen in der Wärmesenke simuliert und gezeigt, dass durch eine geeignete Materialwahl für die Wärmesenke diese Spitzentemperatur deutlich gesenkt werden kann. Die Berechnungen zeigen, dass das verwendete Kupfer bei der einseitigen bzw. beidseitigen Kühlung ein geeignetes Material ist, um eine thermische Zerstörung der Bauelemente zu verhindern.

Die Konzepte für den Aufbau der einseitigen und beidseitigen Kühlung zeigen deutliche Vorteile gegenüber dem Aufbau eines Testsystems in einem Standardmodul. Der Ansatz, eine direkte Kühlung in die Fertigung zu integrieren, zeigt dabei Potenzial die Lebensdauer der Chips zu erhöhen oder die Maximalleistungen der Leistungshalbleiter durch die verbesserte Wärmeabfuhr zu erhöhen. Durch den Aufbau in einem Glas-Package konnte eine erhöhte mechanische Stabilität der Bauteile erreicht werden, wodurch es möglich ist dickere Wärmesenken zu integrieren, die im Kurzschlussfall das Risiko einer Bauteilzerstörung verringern.

11 Literaturverzeichnis

- [1] **Völklein, Friedemann und Zetterer, Thomas.** *Praxiswissen Mikrosystemtechnik.* Wiesbaden : Vieweg & Sohn Verlag, 2006. ISBN:3-528-13891-1.
- [2] **Prof. Dr. Eisele, Ignaz.** Skriptum Grundlagen der Silizium-Halbleitertechnologie. 85577 Neubiberg, Deutschland : Universität der Bundeswehr München Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik, 2013.
- [3] **Atkins, Peter W.** *Physikalische Chemie.* Weinheim : Wiley-VCH, 2001. ISBN:3-527-30236-0.
- [4] **Laube, Phillip.** Halbleitertechnologie von A-Z, Dotieren n- und p-Halbleiter. [Online] 01. 02 2013. [Zitat vom: 19. 11 2013.] <http://www.halbleiter.org/grundlagen/dotieren/>.
- [5] **Laube, Phillip.** HalbleiterTechnologie von A-Z, Waferherstellung Dotiertechniken. [Online] 1. 2 2013. [Zitat vom: 19. 11 2013.] <http://www.halbleiter.org/waferherstellung/dotieren/#Dotieren>.
- [6] **Goßner, Stefan.** *Grundlagen der Elektronik Halbleiter, Bauelemente, Schaltungen.* Aachen : Shaker Verlag, 2008. ISBN:978-3-8265-8825-9.
- [7] **Laube, Phillip.** HalbleiterTechnologie von A-Z, Grundlagen der p-n-Übergang. [Online] 1. 2 2013. [Zitat vom: 24. 03 2013.] <http://www.halbleiter.org/grundlagen/p-n/>.
- [8] **Lutz, Josef.** *Halbleiter-Leistungsbaulemente Physik, Eigenschaften, Zuverlässigkeit.* Berlin : Springer, 2006. ISBN: 3-540-34206-0.
- [9] **Specovius, Joachim.** *Grundkurs Leistungselektronik Bauelemente, Schaltungen und Systeme.* Deutschland : Vieweg Teubner, 2011. ISBN: 978-3-8348-1647-4.
- [10] **Hering, Eckbert, Gutekunst, Jürgen und Martin, Rolf.** *Elektrotechnik für Maschinenbauer.* Heidelberg : Springer, 1999. ISBN: 3-540-62671-9.
- [11] **Misholi, Ariel.** Technik Lexikon. [Online] [Zitat vom: 17. Juli 2014.] <http://www.techniklexikon.net/d/halbleiterbauelement/halbleiterbauelement.htm>.
- [12] **K., Volker.** www.mikrocontroller.net. *Leistungselektronik Unterkapitel IGBT.* [Online] [Zitat vom: 30. Oktober 2014.] <http://www.mikrocontroller.net/articles/IGBT>.
- [13] **Tammann, Gustav.** *Der Glaszustand.* Leipzig : L.Voss, 1933. IDN: 576624187 (Deutsche Nationalbibliothek).
- [14] **Scholze, Horst.** *Glas Natur, Struktur und Eigenschaften.* Heidelberg : Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1977. ISBN: 978-3-662-07498-5.
- [15] **Haase, Rolf.** *Thermodynamik der Mischphasen.* Heidelberg : Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1956. ISBN: 978-3-662-22547-9.
- [16] **Schaeffer, Helmut A. und Langfeld, Roland.** *Werkstoff Glas.* Berlin : Springer Vieweg Verlag, 2014. ISBN: 978-3-642-37230-8.
- [17] **Infineon Technologies Austria AG.** Interne Unterlagen. 2015.
- [18] **Wang, Fan.** Dissertation Dynamische Belastbarkeit von Energieaufbereitungseinheiten für die elektrische Energieversorgung. Kassel : Kassel University Press GmbH, 2009. ISBN: 978-3-89958-718-0.

- [19] **Baehr, Hans Dieter und Stephan, Karl.** *Wärme und Stoffübertragung.* Bochum, Stuttgart : Springer Vieweg, 2013. ISBN: 978-3-642-36557-7.
- [20] **SCHOTT Technical Glass Solutions GmbH.** Datenblatt Borofloat33 Schott. [Online] SCHOTT Technical Glass Solutions GmbH. [Zitat vom: 14. 11 2013.] www.schott.com/borofloat/german/download/borofloat_33_de.pdf.
- [21] **Hilleringmann, Ulrich.** *Silizium-Halbleitertechnologie: Grundlagen mikroelektronischer Integrationstechnik .* Wiesbaden : Springer Vieweg, 2013. ISBN: 978-3-8348-1335-0.
- [22] **Jelinek, Thomas Walter.** *Praktische Galvanotechnik.* 5 Auflage. Saulgau : Eugen G. Leuze Verlag, 1997. ISBN: 3-87480-108-X.
- [23] **Zorn, Peter und von Koblinski, Carsten.** Tagungsband 9. Minisymposium der Verfahrenstechnik. *Insulating Glas Cooling Device.* Leoben : Lehrstuhl für Verfahrenstechnik des Industriellen Umweltschutzes Department Energie- und Umweltverfahrenstechnik Montanuniversität Leoben, 17. April 2013. 1, S. 266-272. ISBN 978-3-200-03047-3.
- [24] **Zorn, Peter, et al.** *Erzeugung einer galvanischen Verbindung von Halbleiterbauelementen mit einem Glas-Substrat. US Patent Application Nr.: 14/190,952 pending US, EU, 26. Februar 2014.*
- [25] **Laube, Phillip.** HalbleiterTechnologie von A-Z. [Online] 1. 2 2013. [Zitat vom: 19. 11 2013.] <http://www.halbleiter.org>.
- [26] **Fritz, Alfred Herbert, et al.** *Fertigungstechnik.* Heidelberg : Springer-Verlag, 2010. ISBN: 978-3-642-12878-3.
- [27] **Zorn, Peter und von Koblinski, Carsten.** Proceedings 10. Minisymposium Verfahrenstechnik. *Glass Structuring for Insulating Glass Cooling Device .* Wien : Vienna University of Technology, Institute of Chemical Engeneering, Juni 2014. S. 119-123. ISBN: 978-3-9502754-4-5.
- [28] **Becker, H., et al.** Chemical analysis in photostructurable glass chips. *Sensors and Actuators B: Chemical.* September 2002, 86, S. 271-279.
- [29] **Haefer, Rene A.** *Oberflächen- und Dünnschicht-Technologie: Teil I: Beschichtungen von Oberflächen.* Berlin : SpringerVerlag, 1987. ISBN: 978-3-642-82835-5.
- [30] **Zorn, Peter und von Koblinski, Carsten.** Proceedings 11. Minisymposium Verfahrenstechnik. *Hochtemperatur Wafer Verbindungsmethoden für eine in Glas gefasste aktive Chipkühlung.* Wien : Bodenkultur Universität Wien, 2015. ISBN: 978-3-200-04069-4.
- [31] **Gösele, U., et al.** Wafer bonding for microsystems technologies. *Sensors and Actuators.* 1999, Bd. 74, S161-168.
- [32] **v. Koblinski, Carsten.** Trägertechnik. *interne Schulungsunterlagen Infineon.* Villach : s.n., 22. Mai 2012.

- [33] **Dziuban, J. A.** *Bonding in Microsystems*. Niederlande : Springer, 2006. ISBN: 1-4020-4578-6.
- [34] **Iyer, Subramanian S. und Auberton-Hervé, Andre J.** *Silicon Wafer Bonding Technology for VLSI and MEMS applications*. London : Institution of Electrical Engineers, 2002. ISBN: 0-85296-039-5.
- [35] **Hull, Robert.** *Crystalline Silicon*. London : Institution of Electrical Engineers, 1999. ISBN: 0-85296-933-3.
- [36] **Wiegand, Marco.** *Dissertation Auswirkungen einer Plasmabehandlung auf die Eigenschaften des Niedertemperatur-Waferbondens monokristalliner Siliziumoberflächen*. Leipzig : ULB Sachsen-Anhalt, 1971.
<http://sundoc.bibliothek.uni-halle.de/diss-online/01/01H162/prom.pdf> am 02.02.2015.
- [37] **Knechtel, Roy.** *Dissertation Halbleiterwaferbondverbindungen mittels strukturierter Glaszwischen-schichten zur Verkapselung oberflächenmikromechanischer Sensoren auf Wafer ebene*. München : Dr. Hut, 2005. ISBN: 3-89963-166-8.
- [38] **v. Koblinski, Carsten.** persönliche Mitteilung.
- [39] **Habenicht, Gerd.** *Kleben Grundlagen, Technologien, Anwendungen*. 6. Berlin : Springer Verlag, 2008. ISBN: 978-3-540-85266-7.
- [40] **Gleich, Henning.** *Dissertation Zusammenhang zwischen Oberflächenenergie und Adhäsionsvermögen von Polymerwerkstoffen am Beispiel von PP und PBT und deren Beeinflussung durch die Niederdruck-Plasmatechnologie*. Duisburg : Universität Duisburg Essen, 2004. IDN: 973049766 (Deutsche National Bibliothek).
- [41] **Dutschk, Victoria.** *Dissertation Oberflächenkräfte und ihr Beitrag zu Adhäsion und Haftung in glasfaserverstärkten Thermoplasten*. Dresden : Technische Universität Dresden, 2000. IDN: 960130713 (Deutsche National Bibliothek).
- [42] *Adhesives - Designation of main failure patterns*. [Norm]. s.l. : Beuth Verlag, 08 1995. DIN EN ISO 10365.
- [43] **Hubacek, Hugo und Pesek, Alfred.** *Chemie und Umweltechnik*. Wien : R. Oldenbourg Ges.m.b.H, 1993. ISBN: 3-7029-0370-4.
- [44] **Ebnesajjad, Sina.** *Handbook of Adhesion Technology 2nd Edition*. Norwich : William Andrew Inc., 2008. ISBN: 978-0-8155-1533-3.
- [45] **Epoxy Technology Inc. (EPO-TEK®)**. [Online] [Zitat vom: 8. März 2015.] oldwww.epotek.com/SSCDocs/datasheets/353ND.PDF.
- [46] **Polytec PT GmbH.** *Polytec PT Polymere Technologien. Hochtemperaturklebstoffe und keramische Materialien*. [Online] 2013. [Zitat vom: 12. März 2015.] http://www.polytec-pt.com/no_cache/de/produkte/hochtemperaturklebstoffe-und-keramische-materialien/?cid=17538&did=16613&sechash=cf8a162a.
- [47] **Schott Technical Glass Solutions GmbH.** *Schott Technical Glasses. Physical and Technical Properties*. [Online] 01 2014. [Zitat vom: 18. 03 2015.]

- http://www.schott.com/epackaging/german/download/schott-brochure-technical-glasses_english.pdf.
- [48] **Ramm, Peter, Jian-Qiang Lu, James und Taklo, Maaike M. V.** *Handbook of Wafer Bonding*. Weinheim : Wiley-VCH Verlag, 2012. ISBN: 978-3-527-32646-4.
- [49] **Hassler, Julia.** Bachelorarbeit. *Charakterisierung von Hochtemperaturadhäsiven*. Graz : s.n., 2013. TU Graz Materialphysik\ Infineon.
- [50] **Prof. Dr. Zengerle, Robert.** Aufbau und Verbindungstechnik. *Skriptum Mikrosystemtechnik Technologien & Prozesse*. Freiburg : Albert-Ludwigs Universität Freiburg, 2009.
- [51] **Verhaverbeke, S., et al.** The Etching Mechanisms of SiO₂ in Hydrofluoric Acid. *Journal of the Electrochemical Society*. 1994, Vol.141, No. 10.
- [52] **Harfmann, Markus.** Dissertation: Untersuchung der Reaktionsmechanismen und Kontrollmethoden von komplexen nasschemischen Ätzprozessen in der Halbleiterherstellung. Graz : TU-Graz, 2006.
- [53] **Williams, Thomas, et al.** \Gnuplot Vers 4.6.5. [Online] 26. Februar 2014. [Zitat vom: 5. März 2014.] <http://www.gnuplot.info/>.
- [54] **Verein Deutscher Ingenieure VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen (Herausgeber).** *VDI - Wärmetlas*. Berlin : Springer Verlag, 2005. ISBN: 3-540-25504-4.
- [55] **Hartnett, J. P., Koh, J. C. Y. und McComas, S. T.** A Comparison of Predicted and Measured Friction Factors for Turbulent Flow Through Rectangular Ducts. *Journal Heat Transfer*. 1962, Bd. 84, 1.
- [56] **Kandlikar, S. G., et al.** *Heat Transfer and Fluid Flow in Minichannels and Microchannels*. Oxford : Butterworth-Heinemann (Elsevier), 2006. ISBN: 978-0-08-098346-2.
- [57] **International Organization for Standardization.** ISO 3166 country codes. [Online] [Zitat vom: 11. Juni 2014.] <https://www.iso.org/obp/ui/#search>.
- [58] **Sun, Kuan-Han.** Fundamental condition of glass formation. *Journal of the American Ceramic Society*. 1947, Bd. 30, 9.
- [59] **Ferro.** Pb-based Sealing Glass Paste for MEMS and Sensors. [Online] [Zitat vom: 26. August 2013.] <http://www.ferro.com/non-cms/ems/EPM/content/docs/11-036,%2011-155,%2011-201,%201180A.pdf>.
- [60] **Ferro.** Pb-free Sealing Glass Paste for MEMS and Sensors. [Online] [Zitat vom: 26. August 2013.] <http://www.ferro.com/non-cms/ems/EPM/content/docs/DL11-205.pdf>.
- [61] **Diemat Inc.** Datasheet DM2995P/J203. *Diemat*. [Online] [Zitat vom: 12. 02 2013.] <http://www.diemat.com/docs/products/glass/DM2995P-J203.php>.
- [62] **Newport Electronics GmbH.** CC - HIGH TEMP Chemisch härtende Hochtemperatur-Kleber. [Online] [Zitat vom: 13. August 2013.] <http://www.omega.de/pdf/manuals/m0080de.pdf>.

- [63] **Newport Electronics GmbH.** OB-700 Chemisch härtende Hochtemperatur-Kleber. [Online] [Zitat vom: 13. August 2013.] <http://www.omega.de/pdf/manuals/m1242de.pdf>.
- [64] **Aylward, G. und Findlay, T.** *Datensammlung Chemie in Si-Einheiten.* Weinheim : VCH, 1986. ISBN: 3-527-21084-9.
- [65] **Niklaus, Frank.** Dissertation Wafer Bonding for Microelectronic and Microelectromechanical Systems. Stockholm : Universitetservice Royal Institute of Technology (KTH), 2002. ISSN: 0281-2878.
- [66] **Roland.chem.** Wikimedia Commons. [Online] 5. Jänner 2015. [Zitat vom: 8. März 2015.] <http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Epoxyphenol-Novolak.svg>.
- [67] **SÜSS MicroTec AG.** SÜSS MicroTec AG. [Online] [Zitat vom: 22. 04 2015.] <http://www.suss.com/de>.
- [68] **Pozetta Products.** www.pozetta.com. [Online] [Zitat vom: 28. 04 2015.] <http://www.pozetta.com/products/waferCarrier/Product%20Overview%20CR300L-01LF.pdf>.
- [69] **Advanced Dicing Technologies Ltd.** Advanced Dicing Technologies Ltd.Homepage. [Online] [Zitat vom: 31. 05 2015.] <http://www.adt-co.com/ADT/UploadFiles/pgallery/6827555871.jpg>.
- [70] **Infineon Technologies Austria.** Bild aus Mediapool. 2015.

12 Anhang

12.1 Erfindungsmeldungen

Tabelle 12-1 Beteiligung an Erfindungsmeldungen während der Dissertation

Titel	Datum	Land [57]	amtl. Akt.-Z.	Status
Galvanisch erzeugte Dickschicht-Metallisierung in einer Glasmatrix	15.05.2013	US	13/894,682	Erteilt / Eingetragen
	14.05.2014	CN	201410204303.5	Anmeldung anhängig
	14.05.2014	DE	102014106823.8	Anmeldung anhängig
eWLB/WLP Wafer Stabilisierung	04.03.2014			archiviert
Methode zur Herstellung ultradünner MEMS-Sensoren	03.03.2014	US	14/194,912	Anmeldung anhängig
Erzeugung einer galvanischen Verbindung von Halbleiterbauelementen mit einem Glas-Substrat	26.02.2014	US	14/190,952	Anmeldung anhängig
Method of Formation of an Enclosure for a Semiconductor Based Electrochemical System By Wafer Stacking Approaches Using Si/Glass Hot Embossing or Anodic Bonding	31.03.2014	US	14/230,056	Anmeldung anhängig
	30.03.2015	CN	201510144873.4	Anmeldung anhängig
	27.03.2015	DE	102015104816.7	Anmeldung anhängig

12.2 Abbildungsverzeichnis

ABBILDUNG 1 BESETZUNG DER ENERGIEBÄNDER FÜR LEITER, HALBLEITER UND NICHTLEITER [2]	3
ABBILDUNG 2 PHOSPHOR DOTIERTES SILIZIUM	5
ABBILDUNG 3 BOR DOTIERTES SILIZIUM	5
ABBILDUNG 4 BÄNDERMODELL FÜR DOTIERTE HALBLEITER [4]	6
ABBILDUNG 5 LADUNGSTRÄGER AM P-N ÜBERGANG OHNE ÄUßERE SPANNUNG [6]	7
ABBILDUNG 6 P-N ÜBERGANG AUSWEITUNG DER RAUMLADUNGSZONE DURCH SPERRSPANNUNG [6]	7
ABBILDUNG 7 P-N ÜBERGANG AUSWEITUNG DER RAUMLADUNGSZONE DURCH FLUSSSPANNUNG [6]	8
ABBILDUNG 8 SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DES LAWINENDURCHBRUCHS [6]	9
ABBILDUNG 9 DARSTELLUNG DES ZENERDURCHBRUCHS IM ENERGIEBANDSCHEMA [6]	10
ABBILDUNG 10 HALBLEITER DÜNNSCICHTSYSTEME [2]	12
ABBILDUNG 11 HYDRAULISCHES ANALOGON DIODE ZU P-N DIODE [6]	13
ABBILDUNG 12 SCHEMATISCHER AUFBAU IGBT UND HYDRAULISCHES ANALOGON [2], [8]	14
ABBILDUNG 13 PRINZIPIELLER VERLAUF DER TEMPERATURABHÄNGIGKEIT VOM VOLUMEN BEI DER ABKÜHLUNG EINER SCHMELZE [14], [16]	17
ABBILDUNG 14 VERGLEICH KRISTALLNETZWERK MIT GLASNETZWERKEN [14], [16]	20
ABBILDUNG 15 PRINZIPIELLE KRISTALLWACHSTUMSRATE UND KEIMBILDUNGSRATE IN ABHÄNGIGKEIT DER TEMPERATUR [16]	21
ABBILDUNG 16 TESTSYSTEM FÜR DIE KÜHLUNG DER LEISTUNGSHALBLEITERBAUELEMENTE [18]	22
ABBILDUNG 17 PRINZIPIELLER AUFBAU UND BILD EINES STANDARDMODULS [8], [70]	23
ABBILDUNG 18 VERGLEICH TYPISCHER WÄRMESTROMDICHTEN [8]	26
ABBILDUNG 19 STANDARD 6" GLASWAFER MIT 2 FLATS	30
ABBILDUNG 20 GLASWAFER BESCHICHTET MIT ASI	31
ABBILDUNG 21 ÜBERSCHNEIDUNG VORDER- UND RÜCKSEITEN MASKEN BASISWAFER	31
ABBILDUNG 22 PRINZIP BASISGLAS MIT PLASMAGEÖFFNETER HARTMASKE ANSICHT RÜCKSEITE	32
ABBILDUNG 23 RESTGLASDICKE BEI BEIDSEITIGEM ÄTZANGRIFF	33
ABBILDUNG 24 STRUKTURIERTES BASISGLAS	34
ABBILDUNG 25 ÄTZTIEFEN KÜHLKAVITÄTENWAFER MIT LASERGEBOHRTEN ANSCHLUSSLÖCHERN	35
ABBILDUNG 26 KÜHLKAVITÄTENWAFER MIT ANSCHLUSSLÖCHERN DURCH LASERABLATION	36
ABBILDUNG 27 VERHINDERUNG VON ÄTZSPITZEN DURCH ÜBERÄTZUNG	36
ABBILDUNG 28 FERTIGUNG DER WAFERVERBINDUNG MIT EPO-TEK 353ND	38
ABBILDUNG 29 ANODISCH GEBONDETER WAFERSTACK AUS BASISWAFER UND KÜHLKAVITÄTENWAFER	38
ABBILDUNG 30 SEEDLAYERS AUF BASISWAFER	39
ABBILDUNG 31 BASISWAFER MIT STRUKTURIERTER SEEDLAYER	39
ABBILDUNG 32 ERGEBNISSE PROFILOMETERUNTERSUCHUNGEN DER GESCHLIFFENEN GLASOBERFLÄCHE [23] 40	
ABBILDUNG 33 PRINZIPIELSKIZZE GALVANISCHE ABSCHIEDUNG (A), WAFER MIT SEEDLAYER (B), WAFER MIT ABGESCHIEDENEM CU (C) [36]	40

ABBILDUNG 34 ENTWURF WAFERHOLDER FÜR GALVANIK	41
ABBILDUNG 35 LÖTEN DER CHIPS AUF DIE KUPFERWÄRMESENKE	41
ABBILDUNG 36 AUFNAHME SEITENKANTE NACH SÄGEN	42
ABBILDUNG 37 AUSGESÄGTE EINSEITIGE IN GLASS GEKAPSELTE LEISTUNGSHALBLEITERKÜHLSYSTEME MIT EINGELÖTETEN CHIPS.....	42
ABBILDUNG 38 KÜHLKREISLAUF FÜR FLÜSSIGKEITSGEKÜHLTE IN GLAS GEFASSTE KÜHLELEMENTE FÜR LEISTUNGSHALBLEITER	43
ABBILDUNG 39 ANSCHLUSSKONZEPT VARIANTE 1 UND BILDER DES FERTIGEN ANSCHLUSSES.....	43
ABBILDUNG 40 ANSCHLUSSKONZEPT VARIANTE 2 MIT BILDER DES FERTIGEN ANSCHLUSSES	44
ABBILDUNG 41 KÜHLELEMENT FÜR EINE EINSEITIGE KÜHLUNG DES TESTSYSTEMS MIT INTEGRIERTER WÄRMESENKE.....	44
ABBILDUNG 42 OPTIMIERUNGSMÖGLICHKEIT DETAIL COOLING BUMP	45
ABBILDUNG 43 FERTIGUNGSPRINZIP COOLING BUMPS	46
ABBILDUNG 44 AUFBAU ZWEISEITIG IN GLASGEKAPSELTE KÜHLUNG	46
ABBILDUNG 45 BASISWAFER FÜR ZWEISEITIGE KÜHLUNG A ABGESCHIEDENER SEEDLAYER, B STRUKTURIERTER SEEDLAYER VS, STRUKTURIERTER SEEDLAYER RS	47
ABBILDUNG 46 ÜBERSCHNEIDUNG VORDER- UND RÜCKSEITENMASKEN BASISDECKWAFER	48
ABBILDUNG 47 BASISDECKWAFER NACH NASSCHEMISCHER ÄTZUNG OHNE HARTMASKE.....	48
ABBILDUNG 48 BASISDECKWAFER MIT SÄGESTRAßEN.....	49
ABBILDUNG 49 BASISDECKWAFER MIT SÄGESTRAßEN UND STRUKTURIERTER ASI-SCHICHT	49
ABBILDUNG 50 ÜBERSCHNEIDUNG VORDER- UND RÜCKSEITEN MASKEN, VORDERSEITEN- KÜHLKAVITÄTENWAFER.....	50
ABBILDUNG 51 VORDERSEITEN KÜHLKAVITÄTENWAFER	50
ABBILDUNG 52 CHIP EINKAPSELUNG A) PROZESSFOLGE CHIP, B) VORDER- UND RÜCKSEITE DES WAFERSTACKS	51
ABBILDUNG 53 GALVANISCHE VERBINDUNG VON BASISWAFER UND CHIP [37] A) PROZESSFOLGE, B) DETAIL REM, C) FOTO WAFER UND DETAILAUFNAHME	51
ABBILDUNG 54 WAFERSTACK MIT GESCHLIFFENER WÄRMESENKE	52
ABBILDUNG 55 ERZEUGUNG DER OBEREN WÄRMESENKE A) PROZESSFOLGE, B) VS UND RS DER FERTIGEN STRUKTUREN	52
ABBILDUNG 56 ERZEUGUNG DER ISOLATION UND VERBINDUNG MIT KÜHLKAVITÄTENWAFERN A) PROZESSFOLGE, B) DARSTELLUNG DER FERTIGEN STRUKTUR.....	53
ABBILDUNG 57 NASSCHEMISCHE TAUCHÄTZUNG	57
ABBILDUNG 58 NASSCHEMISCHE ÄTZUNG IN EINER SAT	58
ABBILDUNG 59 PRINZIP LASERBOHREN	58
ABBILDUNG 60 PRINZIP WAFERSCHLEIFEN	59
ABBILDUNG 61 FOTURAN A) HERSTELLUNGSPROZESS, B) ERZEUGTE TESTÄTZUNG [36].....	60
ABBILDUNG 62 THERMISCH INDUZIERTES CVD (OFENPROZESS) [1].....	61

ABBILDUNG 63 EINTEILUNG DER CVD VERFAHREN.....	61
ABBILDUNG 64 PRINZIP LITHOGRAPHIE [1], [2].....	63
ABBILDUNG 65 ANWENDUNGEN VON LITHOGRAPHIE ZUR STRUKTURIERUNG [1].....	64
ABBILDUNG 66 FUNKTIONSWEISE HDMS ALS HAFTVERMITTLER [38].....	65
ABBILDUNG 67 SPIN BELACKER VON SÜSS MICROTEC AG [64].....	66
ABBILDUNG 68 SPRAY BELACKER VON SÜSS MICROTEC AG [64].....	66
ABBILDUNG 69 OPTISCHE BELICHTUNGSVERFAHREN A) KONTAKTBELICHTUNG, B) PROXIMITYBELICHTUNG UND C) PROJEKTIONSBELICHTUNG [1], [2].....	67
ABBILDUNG 70 PRINZIP LASER DIRECT IMAGING.....	69
ABBILDUNG 71 WAFERHORDE MIT 25 WAFERN [65].....	69
ABBILDUNG 72 ÄTZPROFIL CHEMISCHER TROCKENÄTZPROZESS [2].....	71
ABBILDUNG 73 ÄTZPROFIL PHYSIKALISCHER TROCKENÄTZPROZESS [2].....	71
ABBILDUNG 74 ÄTZPROFIL CHEMISCH PHYSIKALISCHER TROCKENÄTZPROZESS [2].....	71
ABBILDUNG 75 AUFBAU BARRELREAKTOR FÜR PLASMAÄTZPROZESS [26].....	72
ABBILDUNG 76 PRINZIP ELEKTRONENSTRAHL BEDAMPFUNGSANLAGE.....	73
ABBILDUNG 77 PRINZIP EINER DC SPUTTER- ANLAGE.....	74
ABBILDUNG 78 ECD KUPFER MIT LÖSLICHER KUPFERANODE [35].....	75
ABBILDUNG 79 ECD KUPFER MIT UNLÖSLICHER PLATINANODE [35].....	77
ABBILDUNG 80 PRINZIPIELLER PROZESSABLAUF SILIZIUM DIREKT BONDEN [45].....	80
ABBILDUNG 81 VERGLEICH DER OBERFLÄCHENENERGIE VON HYDROPHOBEN UND HYDROPHILEN SILIZIUM DIREKT BOND ÜBER DIE BONDTEMPERATUR [43], [46].....	80
ABBILDUNG 82 GEGENÜBERSTELLUNG VON BINDUNGSENERGIEN BEI UNTERSCHIEDLICHEN BINDUNGSARTEN [43], [62].....	80
ABBILDUNG 83 MECHANISMUS HYDROPHILES SILIZIUM DIREKT BONDEN [32].....	81
ABBILDUNG 84 HRTEM HYDROPHILER SILIZIUM DIREKT BOND [45].....	82
ABBILDUNG 85 MECHANISMUS HYDROPHOBES SILIZIUM DIREKT BONDEN [43].....	82
ABBILDUNG 86 HRTEM HYDROPHOBER SILIZIUM DIREKT BOND [45].....	83
ABBILDUNG 87 PRINZIP ANODISCHER BOND [33], [36].....	83
ABBILDUNG 88 BONDSTROMVERLAUF ANODISCHER BOND [48].....	84
ABBILDUNG 89 AUSWIRKUNG EINES PARTIKELS AUF EINEN ANODISCHEN BOND.....	84
ABBILDUNG 90 EINTEILUNG DER ADHÄSIVE NACH DER CHEMISCHEN BASIS [49].....	85
ABBILDUNG 91 EINTEILUNG DER ADHÄSIVE NACH DEM ABBINDE MECHANISMUS [49].....	86
ABBILDUNG 92 AUFBAU EINER ADHÄSIV VERBINDUNG [49].....	87
ABBILDUNG 93 HAFTUNGSARTEN [50].....	87
ABBILDUNG 94 MECHANISCHE HAFTUNG [49].....	87
ABBILDUNG 95 BINDUNGSENERGIEN ATOMARER UND MOLEKULARER BINDUNGEN [49], [51].....	88
ABBILDUNG 96 PRINZIPIELLE ABHÄNGIGKEIT DER KOHÄSIONSFESTIGKEIT VOM MOLEKULARGEWICHT BZW. VOM POLYMERISATIONSGRAD [49].....	89

ABBILDUNG 97 ORT UND ART DES BRUCHES EINER ADHÄSIV VERBINDUNG [53].....	89
ABBILDUNG 98 BRUCHVERHALTEN VON KLEBUNGEN [49], [53]	90
ABBILDUNG 99 EPOXIDGRUPPE [55]	90
ABBILDUNG 100 AMINHÄRTUNG BEI EPOXIDHARZEN [54]	91
ABBILDUNG 101 AUFBAU DES PHENOL NOVOLAC EPOXIDHARZES [63].....	91
ABBILDUNG 102 FESTIGKEITSVERGLEICH VON VERBINDUNGEN AUS PHENOL-, NITRIL- UND NYLON EPOXID [55]	92
ABBILDUNG 103 HÄRTUNG KERAMISCHER ADHÄSIVE [54], [56].....	92
ABBILDUNG 104 EINTEILUNG KERAMISCHER ADHÄSIVE AUFGRUND DER BASIS [49], [56]	93
ABBILDUNG 105 PRINZIPELLER AUFBAU EINES GLASLOTES ANHAND EINER GLASLOTMISCHUNG AUS BA SILIKATGLAS UND PB/ZN SILIKATGLAS [58].....	93
ABBILDUNG 106 PRINZIPELLER PROZESSABLAUF WAFERVERBINDUNG DURCH GLASLOTE [33], [48], [34], [36]	94
ABBILDUNG 107 PRINZIP KLEBERAUFTRAG FÜR WAFER ÜBER WALZVERFAHREN	95
ABBILDUNG 108 PRINZIP KLEBERAUFTRAG FÜR WAFER ÜBER SPIN VERFAHREN	96
ABBILDUNG 109 PRINZIP KLEBERAUFTRAG FÜR WAFER ÜBER SPRAYVERFAHREN	97
ABBILDUNG 110 AUFBAU STRUKTURIERTER SIEBTRÄGER FÜR SIEBDRUCK [48]	97
ABBILDUNG 111 PRINZIP DES SIEBDRUCKES [48], [34]	98
ABBILDUNG 112 REM AUFNAHMEN VON DRAHTBONDVERFAHREN A) NAILHEADBOND DURCH THERMOKOMPRESSIO NSBONDEN B) ULTRASCHALL WEDGE-WEDGE BOND [1]	100
ABBILDUNG 113 SÄGEN A) BILD WÄHREND SÄGEVORGANG [66], B) PRINZIPSKIZZE SÄGEFRAME MIT GEMOUNTETEN WAFER UND EINGEZEICHNETEN SÄGESPUREN	101
ABBILDUNG 114 VERSUCHSAUFBAU ZUR ÄTZRATENBESTIMMUNG BEI DER NASSCHEMISCHEN GLASÄTZUNG [23]	102
ABBILDUNG 115 ÄTZRATEN FÜR 5% HF BEI TEMPERATUREN 25-50°C	104
ABBILDUNG 116 TEMPERATURABHÄNGIGKEIT DER ÄTZRATE BEI 5% HF	104
ABBILDUNG 117 TEMPERATURABHÄNGIGKEIT DER ÄTZRATE BEI KONZENTRATIONEN 5 - 50% HF	105
ABBILDUNG 118 KONZENTRATIONSABHÄNGIGKEIT DER ÄTZRATE BEI TEMPERATUREN 25 - 50 °C	106
ABBILDUNG 119 ÄTZRATEN-FIT ÜBER KONZENTRATIONSBEREICH BEI 25 °C EXPONENTIELLE FUNKTION UND POTENZ FUNKTION	107
ABBILDUNG 120 LINEARER VERLAUF DER ÄTZTIEFE ÜBER DIE ZEIT BEI 5%HF UND 25°C MIT MÖGLICHEN ABWEICHUNGEN DURCH TRANSPORTLIMITIERUNG	108
ABBILDUNG 121 BERECHNETE FRAKTIONEN A DER KOMPONENTEN ALS EINE FUNKTION DER FLUORID KONZENTRATION OHNE UND MIT DER DIMERISATIONSREAKTION (GL. 8.5) [52].....	109
ABBILDUNG 122 ÄTZRATE IN ABHÄNGIGKEIT VON TEMPERATUR UND KONZENTRATION [23].....	111
ABBILDUNG 123 BOHRER UND CNC BOHRANLAGE FÜR GLASBOHRUNGEN	112
ABBILDUNG 124 VERSCHLEIß BOHRWERKZEUGE NACH 5 GLASBOHRUNGEN	113
ABBILDUNG 125 REM BILDER MECHANISCHES BOHREN MIT HARTMETALLBOHRER	113
ABBILDUNG 126 REM BILDER MECHANISCHES BOHREN MIT DIAMANTBESCHICHTETEN GLASBOHRER	113

ABBILDUNG 127 AUFLICHTMIKROSKOPIE UND REM BILDER LASERBOHREN MIT PICOSEKUNDENLASER.....	114
ABBILDUNG 128 VERSUCH LASERABLATION SPEZIALFALL 1	114
ABBILDUNG 129 VERSUCH LASERABLATION SPEZIALFALL 2	114
ABBILDUNG 130 PRINZIPELLER AUFBAU DER SCHERKRAFTUNTERSUCHUNG [33]	117
ABBILDUNG 131 REM AUFNAHMEN OMEGABOND 700 [33]	118
ABBILDUNG 132 REM AUFNAHMEN OMEGABOND CC [33].....	118
ABBILDUNG 133 REM AUFNAHMEN GLASLOTE MIT BLEI FERRO 11-036 UND FERRO 11-155 [30]	118
ABBILDUNG 134 REM AUFNAHMEN GLASLOTE BLEIFREI FERRO 11-205 UND DIEMAT J203 [30]	119
ABBILDUNG 135 2D-EDX-ANALYSE DER KERAMISCHEN ADHÄSIVE OMEGABOND 700 UND OMEGABOND CC [34]	120
ABBILDUNG 136 2D-EDX-ANALYSE DER BLEIHALTIGEN GLASLOTE FERRO 11-036 UND 11-155 [34].....	121
ABBILDUNG 137 2D-EDX-ANALYSE DER BLEIFREIEN GLASLOTE FERRO 11-205 UND DIEMAT J203 [34].....	121
ABBILDUNG 138 VERGLEICH DER MITTLEREN SCHUBSPANNUNGEN VON GLASLOTEN, KERAMISCHEN ADHÄSIVEN UND DEM EPOXIDHARZ MIT DER REFERENZ ANODISCHER BOND [33].....	122
ABBILDUNG 139 PRINZIP HAFTUNGSUNTERSUCHUNG.....	123
ABBILDUNG 140 PNEUMATISCHE PRÜFVORRICHTUNG ZUR HAFTUNGSUNTERSUCHUNG	123
ABBILDUNG 141 ERGEBNISSE DER RÖNTGENANALYSE ZUR VOID-MINIMIERUNG BEIM REFLOWLÖTEN FÜR DIE IGBT'S	125
ABBILDUNG 142 ERGEBNISSE DER RÖNTGENANALYSE ZUR VOID-MINIMIERUNG BEIM REFLOWLÖTEN FÜR DIE DIODEN	126
ABBILDUNG 143 VERSUCHSAUFBAU ZUR KÜHLUNG IM LABORMAßSTAB BEI DER EINSEITIGEN IN GLAS GEFASSTEN FLÜSSIGKEITSKÜHLUNG DES TESTSYSTEMS.....	127
ABBILDUNG 144 PUMPENKALIBRIERUNG A) GEFÖRDERTES VOLUMEN PRO ZEITEINHEIT B) FÖRDERMENGE IN ABHÄNGIGKEIT DER PUMPENSPANNUNG	128
ABBILDUNG 145 VERGLEICH DER OBERFLÄCHENTEMPERATUR BEI KURZSCHLUSSBELASTUNG GEKÜHLT BZW. UNGEKÜHLT.....	129
ABBILDUNG 146 WÄRMEBILDER VERSUCH UNGEKÜHLT	129
ABBILDUNG 147 WÄRMEBILDER VERSUCH GEKÜHLT	130
ABBILDUNG 148 GEOMETRIE DER KÜHLKAVITÄT	131
ABBILDUNG 149 AUFBAU FÜR THERMISCHE SIMULATION DER WÄRMESENKE	150
ABBILDUNG 150 BERECHNUNGSCHEMA EXPLIZIT EULER	150
ABBILDUNG 151 SIMULATIONSERGEBNIS SILIZUMWÄRMESENKE	152
ABBILDUNG 152 SIMULATIONSERGEBNIS KUPFERWÄRMESENKE	153
ABBILDUNG 153 SIMULATIONSERGEBNIS DER AL ₂ O ₃ WÄRMESENKE	153
ABBILDUNG 154 TEMPERATURPROFIL ÜBER DEN QUERSCHNITT NACH 20µS	154

12.3 Tabellen

Tabelle 12-2 Typische Netzwerkbildner Kationen mit Koordinationszahl und Einfachbindungsenergien [58]

Kation	Koordinationszahl	Einfachbindungsenergie
Bor	3	119 kcal/mol
Silizium	4	106 kcal/mol
Germanium	4	108 kcal/mol
Aluminium	4	101-79 kcal/mol
Bor	4	89 kcal/mol
Phosphor	4	111-88 kcal/mol

Tabelle 12-3 Typische Netzwerkwandler Kationen mit Koordinationszahl und Einfachbindungsenergien [58]

Kation	Koordinationszahl	Einfachbindungsenergie
Lanthan	7	58 kcal/mol
Yttrium	8	50 kcal/mol
Zinn	6	46 kcal/mol
Magnesium	6	37 kcal/mol
Lithium	4	36 kcal/mol
Zink	8	36 kcal/mol
Barium	4	33 kcal/mol
Kalzium	6	32 kcal/mol
Strontium	6	32 kcal/mol
Natrium	6	20 kcal/mol
Kalium	9	13 kcal/mol

Tabelle 12-4 Typische Zwischenoxid Kationen mit Koordinationszahl und Einfachbindungsenergien [58]

Kation	Koordinationszahl	Einfachbindungsenergie
Titan	6	73 kcal/mol
Zink	2	72 kcal/mol
Aluminium	6	53-67 kcal/mol
Zirkonium	8	61 kcal/mol

Tabelle 12-5 Klassischer Schichtaufbau eines Standardmoduls mit Daten über Schichtdicke Wärmeleitfähigkeit und Wärmewiderständen der Schichten nach [8]

Material	Schichtdicke [mm]	Wärmeleitfähigkeit [W/m K]	Wärmewiderstand der Schicht R_{th} [10^{-3} K/W]
Lot	0,05	82	4,234
Kupfer	0,3	385	5,411
Keramik (Al_2O_3)	0,63	24	182,292
Kupfer	0,3	385	5,411
Lot	0,1	82	8,469
Grundplatte (Al)	5	237	146,507
Wärmeleitpaste	0,05	5	69,444

Tabelle 12-6 Maximale Prozess- und Dauerbetriebstemperaturen von Waferverbindungsverfahren [45], [59], [60], [61], [62], [63], [38]

Verbindungsmethode bzw. Adhäsive	max. Verarbeitungs- temperatur °C	max. Dauerbetriebs- temperatur °C
Epo-Tek 353 ND (Epoxidharz)	150	250
Ferro 11 – 036 (Glaslot)	450	400
Ferro 11 – 155 (Glaslot)	550	475
Ferro 11 – 205 (Glaslot)	460	420
Diemat J203 (Glaslot)	520	480
Omegabond CC (keramisches Adhäsive)	104	827
Omegabond 700 (keramisches Adhäsive)	82	827
anodischer Bond	500	450

Tabelle 12-7 Zusammensetzung und Eigenschaften Foturan von Schott [1]

Zusammensetzung und Eigenschaften Foturan von Schott							
SiO ₂	Na ₂ O	Al ₂ O ₃	K ₂ O	Li ₂ O	Ag ₂ O	Sb ₂ O ₃	CeO ₂
75-85%	1-2%	3-6%	3-6%	7-11%	~0,1%	~0,3%	~0,02%
Physikalische Eigenschaften					Glas	Keramik	Einheit
Dichte					2,37	2,41	g/cm ³
Elastizitätsmodul					78	88	GPa
thermische Eigenschaften					Glas	Keramik	Einheit
Erweichungstemperatur					450	750	°C
thermischer Ausdehnungskoeffizient					8,6	10,5	10 ⁻⁶ /K
Wärmeleitfähigkeit					1,35	2,37	W/mK
elektrische Eigenschaften					Glas	Keramik	Einheit
spezifischer elektrischer Widerstand					>10 ¹²	>10 ¹⁶	Ωcm
Dielektrizitätskonstante (1Mhz, 20°C)					6,5	5,7	-

Tabelle 12-8 Vergleich optischer Belichtungsverfahren [2]

	Kontakt	Proximity	Projektion 1:1	Projektion 5:1
Auflösung µm (planarisierte Oberfläche)	1	2	1	0,03
Auflösung bei 1 µm Profilinhomogenitäten des Untergrundes	1,5	3	1,2	-
Defektdichte cm ⁻²	1	0,01	< 0,01	< 0,01

Tabelle 12-9 Vor und Nachteile optischer Belichtungsverfahren [2]

Vorteile	Nachteile
Kontaktbelichtung	
Gute Auflösung	Hohe Defektdichte
	Nur für kleine Chipflächen geeignet
Proximitybelichtung	
Niedrige Defektdichte	Geringe Auflösung durch Beugung am Spalt
Projektionsbelichtung	
Hohe Auflösung bei verkleinernder Belichtung	Beugungsbegrenzung
Niedrige Defektdichte	Geringe Tiefenschärfe bei hoher Auflösung

Tabelle 12-10 Bindungsenergien (kJ/mol) von kovalenten Einfachbindungen zwischen Elementen [64]

Elemente	Br	C	Cl	F	H	I	N	O	P	S	Si
Br	193	285	219	249	366	178		234	264	218	325
C	285	348	339	489	413	218	305	358	264	272	285
Cl	219	339	242	253	431	211	192	208	322	271	397
F	249	489	253	159	567	280	278	193	503	327	586
H	366	413	431	567	436	298	391	463	323	367	318
I	178	218	211	280	298	151		234	184		234
N		305	192	278	391		163	201			
O	234	358	208	193	463	234	201	146	335		451
P	264	264	322	503	322	184		335	172		
S	218	272	271	327	367					255	293
Si	325	285	397	586	318	234		451		293	176

Tabelle 12-11 Vor und Nachteile des Siebdruckes gegenüber Lithographischen Verfahren [37]

Vorteile	Nachteile
Nur ein Prozessschritt notwendig für die Aufbringung einer strukturierten Schicht	Begrenzte Genauigkeit der Strukturen gegenüber Lithographischer Verfahren
Schnelles kostengünstiges Verfahren	Durch Siebdicke keine beliebig dünnen Schichten möglich
Nur eine Anlage notwendig, daher geringe Verschleppungsgefahr von Kontaminationen	
Möglichkeit zur Aufbringung, für die Halbleitertechnik, sehr großer Schichtdicken	
Große Vielfalt an zu applizierbaren Materialien	
Voraussetzung ist nur, dass diese in Pastenform erhältlich sind und später Rückwandelbar sind	

Tabelle 12-12 Ergebnisse Ätzung 25°C / 25% Flußsäure

25°C/5%	Glasdicke vor Ätzung	Glasdicke nach Ätzung	Äztiefe	Zeit	Ätzrate	Ätzrate
Einheit	[μm]	[μm]	[μm]	[sec]	[$\mu\text{m}/\text{sec}$]	[$\mu\text{m}/\text{min}$]
1	526	509	8,5	3600	0,0023611	0,1416667
2	526	493	16,5	7200	0,0022917	0,1375000
3	526	476	25	10920	0,0022894	0,1373626
4	526	463	31,5	14400	0,0021875	0,1312500
5	526	450	38	18000	0,0021111	0,1266667
6	526	433	46,5	21600	0,0021528	0,1291667
7	526	416	55	25260	0,0021774	0,1306413
8	526	401	62,5	28800	0,0021701	0,1302083
9	526	386	70	32460	0,0021565	0,1293900
10	526	372	77	36000	0,0021389	0,1283333
Mittlere Ätzrate:					0,0022036	0,1322186

Tabelle 12-13 Mittlere Ätzraten über gesamten Konzentrationbereich (5-50 %HF) und Temperaturbereich (25-50 °C)

Temperatur [°C]	25	30	35	40	45	50
Temperatur [°K]	298,15	303,15	308,15	313,15	318,15	323,15
Konzentration	[$\mu\text{m}/\text{sec}$]	[$\mu\text{m}/\text{sec}$]	[$\mu\text{m}/\text{sec}$]	[$\mu\text{m}/\text{sec}$]	[$\mu\text{m}/\text{sec}$]	[$\mu\text{m}/\text{sec}$]
0 % HF	0	0	0	0	0	0
5% HF	0,00220364	0,00307572	0,00372137	0,00478534	0,0063110	0,00837592
10% HF	0,00492532	0,00621829	0,00820553	0,01226167	0,0144087	0,01923882
15% HF	0,00857529	0,01104946	0,01358168	0,01788319	0,0224766	0,03136551
20% HF	0,01393242	0,01799012	0,02338972	0,03162232	0,0373524	0,04696473
25% HF	0,02036991	0,02758734	0,03472812	0,04365243	0,0558040	0,06968651
30% HF	0,03158474	0,03863817	0,05348918	0,06592593	0,0813889	0,10258220
35% HF	0,04681074	0,06359368	0,07867689	0,09605118	0,1205774	0,15102980
40% HF	0,07312386	0,09896975	0,12924093	0,15547361	0,1927553	0,22501058
45% HF	0,11428983	0,14404497	0,18676103	0,2317767	0,2632935	0,32752264
50% HF	0,18650142	0,24750868	0,28795767	0,35511476	0,4213024	0,50638020

Tabelle 12-14 Ergebnisse Haftungsversuche

Abzugsversuch	Maximal Druck vor Bruch	Bruchschicht
Seedlayer 1: 100nm Ag		
1	1,7 MPa	Metallschicht abgelöst
2	2,87 MPa	Metallschicht abgelöst
3	2,13 MPa	Metallschicht abgelöst
4	1,63 MPa	Metallschicht abgelöst
5	0,71 MPa	Metallschicht abgelöst
6	3 MPa	Metallschicht abgelöst
Seedlayer 2: 100nm Ti / 200nm Pt / 200nm Au		
1	1,56 MPa	Metallschicht abgelöst + Glas gebrochen
2	2 MPa	Metallschicht abgelöst
3	2,33 MPa	Metallschicht abgelöst
4	2,29 MPa	Glas gebrochen
5	2,36 MPa	Glas gebrochen
6	2,53 MPa	Glas gebrochen
7	2,11 MPa	Metallschicht abgelöst + Glas gebrochen
8	2,22 MPa	Metallschicht abgelöst + Glas gebrochen
9	1,5 MPa	Metallschicht abgelöst
Seedlayer 3: 80nm aSi / 500nm Al / 700nm Ti / 500nm Ag		
1	0,99 MPa	Kleberschicht abgelöst
2	2,13 MPa	Glas gebrochen
3	1,82 MPa	Glas gebrochen
4	3,22 MPa	Kleberschicht abgelöst
5	3,84 MPa	Kleberschicht abgelöst
6	3,17 MPa	Kleberschicht abgelöst + Glas gebrochen
7	3,64 MPa	Kleberschicht abgelöst + Glas gebrochen
8	3,54 MPa	Kleberschicht abgelöst
9	2,17 MPa	Glas gebrochen

Tabelle 12-15 Stoffwerte Wasser bei 1bar nach [54]

Temperatur [°C]	Dichte ρ [kg/m ³]	Wärmekap. c_p [J/(kg*K)]	kin. Viskosität ν [m ² /s]	Temperaturleitfähigkeit a [m ² /s]	Wärmeleitfähigkeit λ [W/(m*K)]
25	997,05	4182	$0,893 \cdot 10^{-6}$	$0,1457 \cdot 10^{-6}$	$607,5 \cdot 10^{-3}$
30	995,65	4180	$0,801 \cdot 10^{-6}$	$0,1478 \cdot 10^{-6}$	$615,0 \cdot 10^{-3}$
35	994,04	4179	$0,724 \cdot 10^{-6}$	$0,1497 \cdot 10^{-6}$	$622,0 \cdot 10^{-3}$
40	992,22	4179	$0,658 \cdot 10^{-6}$	$0,1516 \cdot 10^{-6}$	$628,6 \cdot 10^{-3}$
45	990,22	4179	$0,602 \cdot 10^{-6}$	$0,1534 \cdot 10^{-6}$	$634,8 \cdot 10^{-3}$