

Untersuchungen zum Trennen von polykristallinen Siliziumwafern mit frequenzvervielfachten Kurzpuls-Nd:YAG-Lasern

Dissertation zur Erlangung der Doktorwürde

- Dr. techn. –

der Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswirtschaften /Institut für
Umformtechnik und Hochleistungslasertechnik
der Technischen Universität Wien

vorgelegt von

Diplomingenieur Udo Klotzbach
geboren am 05.03.1966 Zella-Mehlis / Thüringen

Gutachter:

Prof. Dr. D. Schuöcker, TU Wien
Prof. Dr. E. Beyer, TU Dresden

Einreichung : Januar 2006

Vorwort

Diese Arbeit ist am Fraunhofer Institut für Werkstoff- und Strahltechnik in Dresden entstanden. Ich möchte den Mitarbeitern des Institutes für das angenehme Arbeitsklima und die gute Zusammenarbeit danken.

Mein besonderer Dank gilt:

Herrn Prof. Dr.-Ing. E. Beyer, für die Schaffung der günstigen Rahmenbedingungen und die Unterstützung dieser Arbeit. Seine Anregungen und tatkräftige Hilfe gaben dem Projekt oft nötige Impulse.

Herrn Prof. Dr. techn. D. Schuöcker bedanke ich mich für die Übernahme des Korreferates und die positive Kritik in Wien.

Herrn Dr. Ing. L. Morgenthal für die intensive Diskussionen und Anregungen. Seine produktiven Verbesserungsvorschläge trugen sehr zum Gelingen dieser Arbeit bei.

Herrn Prof. Dr. rer. nat. P. Hartmann für die intensive Zusammenarbeit im Bereich der Mikromaterialbearbeitung

Herrn Dr. Michael Panzner, Herrn Dr. Achim Mahrle, Herrn Dipl. Ing. Thomas Kuntze, Herrn Dipl. Ing. Frank Sonntag, Herrn Dipl. Ing. Jan Hauptmann, Frau Dipl. Ing. Stefanie Mälzer und Herrn Michael Dötschel für die Zusammenarbeit bei den Experimenten und Analysen

Dresden im Januar 2006

Udo Klotzbach

Verzeichnis der Formelzeichen

Formelzeichen	SI-Einheit	Beschreibung
a	[Å]	Gitterkonstante
α	[m ⁻¹]	Absorptionskoeffizient
α	[°]	Flankenwinkel/ Wandwinkel
d_0, d_f, d_L	[m]	Tailendurchmesser, Fokussdurchmesser, Strahldurchmesser (auf der Fokussieroptik)
ϵ_{Str}	[J m ⁻¹]	normierte Streckenenergie
F	[]	Fokussierzahl
f	[m]	Brennweite
f_{Rep}	[Hz]	Pulsfolgefrequenz (Repetitionsrate)
Θ, Θ_L	[rad]	Divergenzwinkel, Divergenzwinkel der Fokussieroptik
I, I_o	[W m ⁻²]	mittlere Leistungsdichte (Intensität), Leistungsdichte der Strahltaile
κ	[S m ⁻¹]	elektrische Leitfähigkeit
l_a	[m]	optische Eindringtiefe (Absorptionslänge)
λ	[W m ⁻¹ K ⁻¹]	Wärmeleitfähigkeit
λ, λ_{gr}	[m]	Wellenlänge, Grenzwellenlänge
n	[]	Brechzahl
n	[]	Anzahl Überfahrten
P_{AV}, P_L, P_W	[W]	mittlere Leistung, Laserleistung, mittlere Leistung am Werkstück
r, r_0, r_F	[m]	Strahlradius, Tailenradius, Fokusradius
s	[m]	Schneiddicke/ Materialdicke
s_{Kontur}	[m]	Schnittlänge/ Konturlänge
t_{Scan}	[s]	Überfahrdauer
τ, τ_x	[]	Transmissionsgrad, Transmissionsgrad des Elementes x
v_{eff}, v_{Scan}	[m s ⁻¹]	effektive Schneidgeschwindigkeit, Scangeschwindigkeit/ Vorschubgeschwindigkeit
W_g	[eV]	Energie des Bandabstandes (gap)
W_{Ph}	[eV]	Photonenenergie
w, w_0	[m]	Strahlradius, Tailenradius
$w_0 \Theta/2$	[m·rad]	Strahlparameterprodukt
w_{SA}, w_{SE}	[m]	mittlere Schnittfugenbreite am Strahlein-/ austritt
Z_f	[m]	Fokusslage relativ zur Werkstückoberfläche
Z_R	[m]	Rayleigh-Länge

Konstanten

$c_0 = 2,998 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$	Lichtgeschwindigkeit im Vakuum
$e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$	Elementarladung
$h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J s}$	PLANCK-Konstante (PLANCKsches Wirkungsquantum)
$\pi = 3,141592653589$	LUDOLFsche Zahl

Indizes

0	Bezugswert (Wert der Strahltaile)
a	Absorption
α	Flankenwinkel/ Wandwinkel
av.	average (Mittelwert)
eff.	Effektivwert
F, f	Fokus
g	gap (Bandlücke)
gr.	Grenzwert
Ist	Istwert
L	Laser
Ph.	Photon
Rep.	Repetition (Pulswiederholrate)
SA	Strahlaustritt
scan	Scannen
SE	Strahleintritt
Soll	Sollwert
Str.	Strecke
v	Geschwindigkeit
W	Werkstück
w	Schnittfugenbreite

Verzeichnis verwendeter Abkürzungen

AFM	Atomic Force Microscopy (Raster-Kraft-Mikroskopie)
CAD	Computer Aided Design
CH ₃ COOH	Ethansäure (Essigsäure)
CNC	Computerized Numerical Control
cw	continuous wave (Dauerstrich)
DBG	Dicing before Grinding
DIN	Deutsches Institut für Normung
EDX	Energy-dispersive-X-ray
EN	Europäische Norm
fcc	face-centered cubic (kubisch flächenzentriert)
HF	Hydrogenfluorid/Fluorwasserstoffsäure (Flusssäure)
HNO ₃	Salpetersäure
IC	Integrated Circuit
IR	Infrarot
ISO	International Organization for Standardization
KDP	Kaliumdihydrogenphosphat
KOH	Kaliumhydroxid (Kalilauge)
NC	Numerical Control
Nd:YAG	Neodym -Yttriumaluminiumgranat
OG	Oberer Grenzwert
Q-switch	Quality-switch (Güteschalter)
RE-Bild	Rückstreuelektronen-Bild
REM	Rasterelektronenmikroskop
SE-Bild	Sekundärelektronen-Bild
TEM	Transmissionselektronenmikroskop
TEM ₀₀	Transversal Electromagnetic Mode 00
UG	Unterer Grenzwert
UFP	Ultra Fine Particles
UV	Ultraviolett
WEZ	Wärmeeinflusszone

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung.....	7
2. Stand von Wissen und Technik	9
2.1. Werkstofftechnische Aspekte von Silizium.....	9
2.2. Trennverfahren	11
2.3. Wechselwirkungen Laserstrahl – Silizium	19
3. Ziel der Arbeit	23
4. Experimenteller Aufbau	25
4.1. Versuchsaufbau	25
4.2. Strahlführungen	31
5. Bewertungskriterien.....	36
5.1. Bewertung von Schneidergebnissen.....	36
5.2. Schneidgeschwindigkeit.....	36
5.3. Schnittqualität	37
6. Einfluss von Werkstoffeigenschaften.....	40
6.1. Materialdicke.....	40
6.2. Kristallorientierung	44
7. Einfluss von Laserparametern.....	50
7.1. Wellenlänge	50
7.2. Polarisierung	55
7.3. Leistung	61
7.4. Pulswiederholfrequenz.....	64
8. Fokusslage	72
9. Optik	76
9.1. Scanner.....	76
9.2. Festoptik	79
9.3. Scanner versus Festoptik.....	83
10. Einfluss der Gasatmosphäre	86
10.1. Allgemeine Parameterzusammenhänge	86
10.2. Luft.....	87
10.3. Argon	90
10.4. Helium.....	94
10.5. Vakuum.....	97

10.6. Zusammenfassung Schneiden unter Gasatmosphäre	101
11. Zusammenfassung und Ausblick.....	104
Literaturverzeichnis	107
Anhang A.....	114
Anhang B.....	121
Anhang C.....	126
Danksagung	127

1. Einleitung

Mit den Anforderungen der Mikroelektronikindustrie nach immer dünneren und flexibleren Siliziumchips, die sich in Papier, Folie oder Stoff einbauen lassen, gelangen die Wafersägen an ihre Grenzen. Durch mehrere Schleif- und Polierschritte innerhalb des Herstellungsprozesses entsteht aus einer ursprünglich relativ stabilen Siliziumscheibe ein fragiles Produkt von weniger als 100 Mikrometern [40]. Das Handling und die Weiterverarbeitung dieser dünnen Wafer stellen hohe Anforderungen an die Weiterverarbeitungstechnik.

Die nach dem Moorschen Gesetz fortschreitende Miniaturisierung der Mikroelektronik ist untrennbar mit der Lasertechnik verbunden. Hierbei findet der Laser nicht nur Anwendung im Bereich der Lithographie, sondern auch im Trennen und Vereinzeln von Wafern. Neben dem klassischen Trennen von Siliziumwafern mit der Wafersäge wurden in den letzten Jahren verschiedene Trennverfahren mit dem Laser entwickelt und teilweise etabliert.

Die hervorragenden Eigenschaften des Lasers mit seinem hohen Grad an Flexibilität ([11],[12],[27],[39]) der kräfte- und verschleißfreien Bearbeitungsweise ([4],[10],[11],[12],[27],[39]) hohe Automatisierbarkeit und seine leichte Integration in Fertigungslinien ([4],[12],[27],[39]) machen den Laser für die Chip-Vereinzelung im Bereich der Halbleitertechnik zu einem ernst zunehmenden Konkurrenten konventioneller Technologien.

Der Einsatz der Lasertechnik bietet viele Vorteile, die sie als geeignete Technik für das Trennen von Wafern erscheinen lassen:

- Kurze Wellenlängen, wie z.B. 355 nm erlauben gute Fokussierung des Laserstrahls und damit minimale Schnittfugenbreiten,
- Kurzpulslaser haben geringe Wechselwirkungszeiten mit dem Werkstoff und minimieren damit den thermischen Eintrag,
- Kurze Laserpulse haben hohe Pulsspitzenleistung, die zum schnellen Erreichen der Verdampfungsschwelle des Materials führen,
- Frequenzverdreifachte Nd-YAG Laser – 355 nm - ermöglichen das Bearbeiten nahe am Absorptionsmaximum von Silizium,
- Gute Absorptionseigenschaften des Materials führen zu schneller Energieeinkopplung in das Material,

- Flexible, dynamische Scannersysteme haben keine Beschränkung der Schneidgeometrie,
- berührungslose Trennprozesse führen zu keinen mechanische Belastungen der Wafer.

Die schnellen lokalen Aufheizungen des Wafers durch den Laserstrahl können unter Umständen auch Nachteile hervorrufen, wie z.B. Schädigungen im Materialgefüge bis hin zu Mikrorissbildungen und Abplatzungen (Chipping).

Ziel dieser Arbeit ist es, den Einfluss verschiedener Parameter beim Laserstrahltrennen von polykristallinem Silizium in Form industrierelevanter Wafer zu untersuchen.

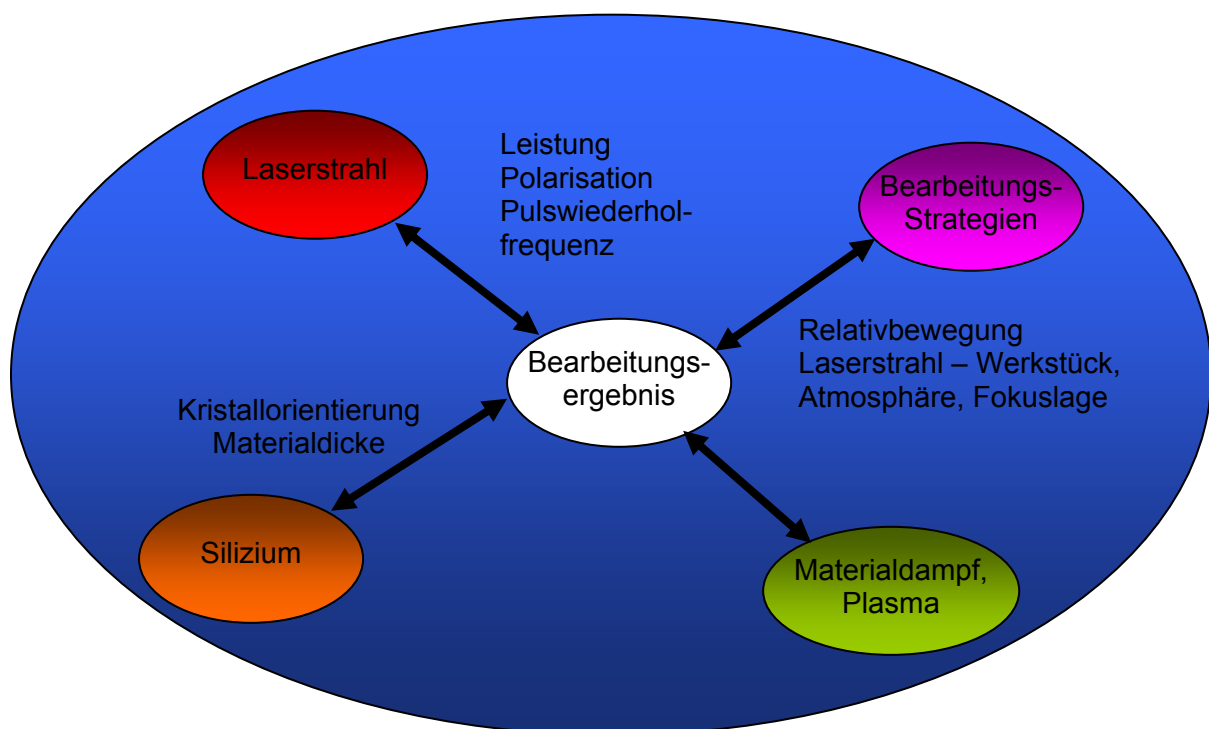


Abbildung 1.1: Strategien der Bearbeitung von Silizium

Die Schwerpunkte der Arbeit bilden die Untersuchungen der Einflüsse von Laserparameter (Leistung, Polarisation, Frequenz), Werkstoffparameter (Kristallorientierung, Materialdicke) und wesentlicher Prozessparameter (Fokusslage, Scangeschwindigkeit, Atmosphärendruck) auf das Bearbeitungsergebnis (Abbildung 1.1).

Dabei sollen Lösungswege zur Steigerung von Schneidgeschwindigkeit und Schnittqualität – im Vergleich mit klassischen Trennverfahren – aufgezeigt werden.

2. Stand von Wissen und Technik

2.1. Werkstofftechnische Aspekte von Silizium

Durch Reduktion des Rohmaterials Quarzsand wird Rohsilizium für die Mikroelektronik gewonnen.



Dieses hat einen Reinheitsgrad von etwa 98% und muss als Substratmaterial in einkristalliner Form vorliegen. Das heißt die Atome haben eine regelmäßige Anordnung.

Tabelle 2.1 : Materialkenngrößen von Silizium ([1],[2],[33],[52],[53])

Parameter	Wert
Elementname (Symbol)	Silizium (Si)
Gitterkonstante [Å]	5,43095
Atomdichte [cm ⁻³]	5,0*10 ²²
Atomgewicht [g mol ⁻¹]	28,086
Dichte [g cm ⁻³]	2,328
spezifisches Gewicht [g cm ⁻³]	2,34
Schmelztemperatur [°C]	1415
Siedetemperatur [°C]	2680
Schmelzwärme [J g ⁻¹]	1650
Verdampfungswärme [J g ⁻¹]	13700
spezifische Wärmekapazität [J g ⁻¹ K ⁻¹] (bei 25°C)	0,703
Wärmeleitfähigkeit [W cm ⁻¹ K ⁻¹]	0,8 -1,5
Dampfdruck [Pa] (bei 1650 °C)	1
Dampfdruck [Pa] (bei 760 °C)	10 ⁻⁶
Thermischer Ausdehnungskoeffizient [°C ⁻¹]	2,6*10 ⁻⁶
Thermischer Diffusionskoeffizient [cm ² s ⁻¹]	0,9
Bandabstand [eV] (bei 0 K)	1,17
Bandabstand [eV] (bei 300 K)	1,12
Dielektrizitätskonstante []	11,9

Das Gitter des elementaren Siliziums ist kubisch flächenzentriert (fcc) mit einer Basis aus identischen Atomen an den Positionen (0, 0, 0) und (¼, ¼, ¼) (Abbildung 2.1). Jedes Atom besitzt vier äquidistante Nachbaratome, mit denen es über kovalente Bindungen verbunden ist. Die Kristallstruktur besteht aus zwei um ¼ der Raumdiagonalen gegeneinander verschobenen kubisch flächenzentrierten Gittern.

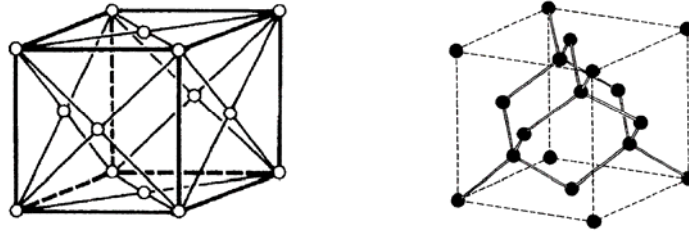


Abbildung 2.1. fcc- Gitter und Kristallstruktur des Siliziums (Diamantgitter) [13]

Die Anordnung der Atome ist durch die Orientierung des kubischen Gitters zur Oberfläche gegeben. Unterschiedliche Abstände zwischen den Eckpunkten der beiden ineinander geschachtelten kubisch flächenzentrierten Gitter führen zu verschieden dicht gepackten Kristallebenen (Abbildung 2.2).

Mit dieser Definition kann jedem Siliziumwafer eine eindeutige Oberflächenorientierung zugeordnet werden, so dass die Lage des Gitters in der Scheibe bekannt ist. Dieses wird mit den Millerschen Indizes (Schnittpunkte der Ebene bzw. Oberfläche mit den Achsen des Kristalls) beschrieben.

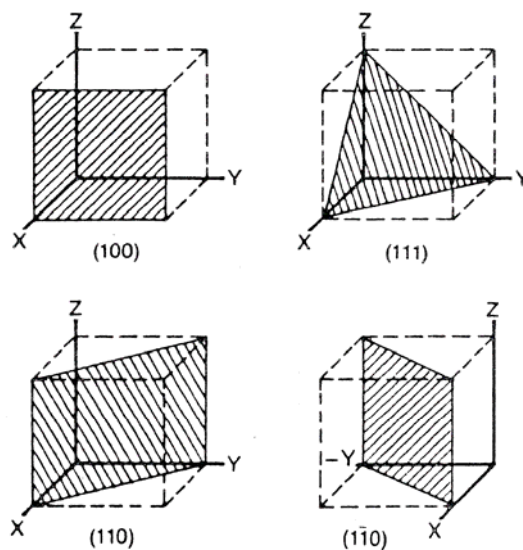


Abbildung 2.2: Kristallebenen von Siliziumwafern [20]

Die in der Halbleiterindustrie am meisten genutzten Kristallebenen sind ([1], [33]):

<100> – Ebene

Flächendichte: 2 Atome pro Elementarzelle entsprechen ca. $6,8 \cdot 10^{14}$ Atomen/ cm^2 ,

<110> – Ebene

Flächendichte: 4 Atome pro Elementarzelle entsprechen ca. $9,6 \cdot 10^{14}$ Atomen/ cm^2 ,

<111> – Ebene

höchste Packungsdichte; Atomdichte von ca. $1,57 \cdot 10^{15}$ Atomen/ cm^2 .

Für die Bearbeitung mit Laser ist der Absorptionsgrad von Silizium eine wichtige materialspezifische Kenngröße. Das Absorptionsspektrum von Silizium (Abbildung 2.3) zeigt eine starke Wellenlängenabhängigkeit. Für infrarote Strahlung ist Silizium durchsichtig. Ein Absorptionsmaximum existiert im Bereich der UV Wellenlängen.

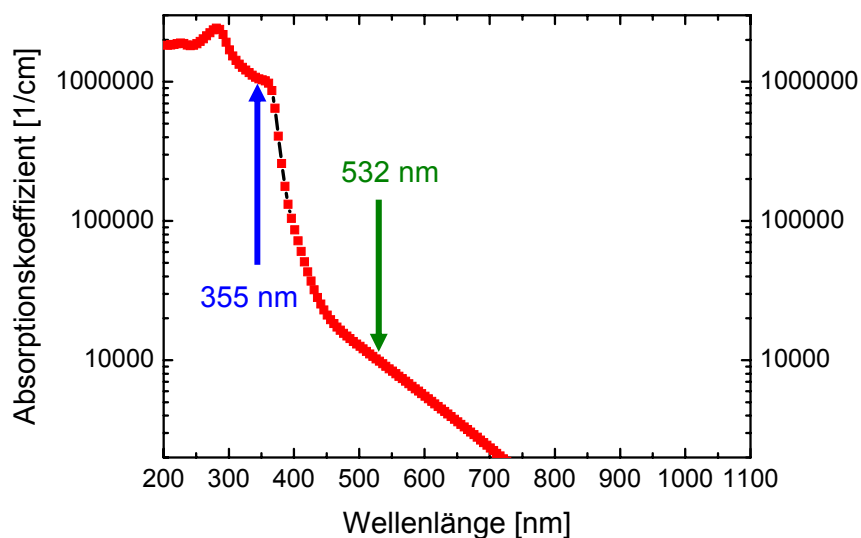


Abbildung 2.3: Absorptionsspektrum von Silizium; [17]

2.2. Trennverfahren

In der Halbleiterindustrie werden jährlich große Mengen an hochreinem Silizium verarbeitet. Der Bedarf an Siliziumfläche machte es erforderlich, den Scheibendurchmesser etwa alle 4 Jahre um einen Zoll (2,54 cm) zu vergrößern [41].

Die über verschiedene Ziehverfahren hergestellten Einkristallblöcke müssen weiter zu Scheiben verarbeitet werden. Die werden z.B. mit Hilfe von Drahtsägen in Scheiben mit Materialdicken von etwa 0.3 bis 1 mm zersägt.

Der Fertigungsprozess eines Integrierten Schaltkreises lässt sich im Wesentlichen auf folgende Technologieschritte zurückführen:

- Schichtabscheidung (CVD, PVD Verfahren),
- Schichtmodifikation (Oxidieren, Dotieren),
- Schichtstrukturierung (Lithographie),
- Schichtabtragung (Ätzen).

Nach diesen Prozessschritten auf Waferlevel folgen die Verfahrensschritte

- **Vereinzeln,**
- Kontaktieren,
- Verpacken.

Im Folgenden soll auf den Stand der Technik des Vereinzeln eingegangen werden.

Beim Vereinzeln wird der Halbleiterwafer in einzelne Chips (dies) getrennt (Abbildung 2.4).

Dies geschieht in der Halbleiterbranche innerhalb des Back-End-Prozesses.

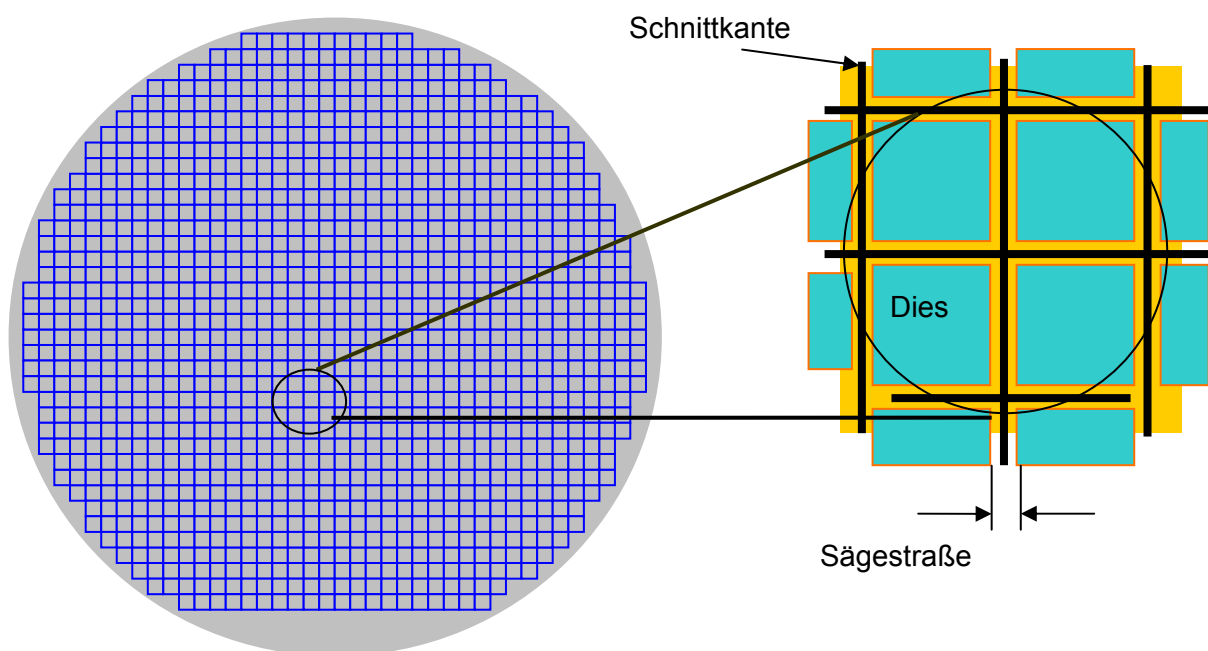


Abbildung 2.4: Wafer mit Sägestraße und Schnittkante [47]

Für das Vereinzeln von Wafern stehen derzeit drei Technologien zur Verfügung:

- Ritzen und Brechen,
- Trennen mit Wafersäge,
- Trennen mit Laser,
- Trennen mit Laser im Wasserstrahl,
- Trennen mit Laserholographie.

Die für die Mikroelektronik auf Siliziumscheiben prozessierten Einzelchips müssen für die Endverarbeitung (Kontaktieren und Verpacken) vereinzelt werden. Für eine bessere Flächenauslastung der Wafer mit Bauelementen soll dies materialsparend realisiert werden. Die einzelnen Chips auf einem Wafer sind durch einen Ritzrahmen mit einer Breite von 50 – 100 µm voneinander abgegrenzt. Der Ritzrahmen beinhaltet keine Schaltungselemente, da dieser als Trennfläche vorgesehen und nach dem Vereinzeln unwiderruflich zerstört ist. Während der Fertigungsprozesse auf Waferlevel wird die Fläche für Teststrukturen zur Parametererfassung genutzt.

Nachfolgend sollen die wichtigsten Technologien kurz vorgestellt und in Form einer tabellarischen Gegenüberstellung (Anhang A) verglichen werden.

Ritzen und Brechen

Der grundlegende Effekt des Ritzens und Brechens besteht in der Erzeugung einer Vertiefung von einigen Mikrometern in der Scheibenoberfläche infolge einer mechanischen, thermischen oder chemischen Beschädigung des Kristalls. Aufgrund der mechanischen Beschädigung des Kristalls entstehen Gitterverspannungen im Silizium, die als Defektzonen bezeichnet werden. Diese Defektzonen bilden - beim anschließenden Brechen - maßgebend die Linien zum vollständigen Trennen.

Das Einbringen dieser mechanischen Beschädigung kann auf unterschiedlicher Art und Weise erfolgen:

- unter leichtem Druck wird eine Diamantspitze entlang der Sollbruchstelle geführt ([1], [13],[39]),

- eine Wafersäge durchtrennt den Wafer bis auf eine Restdicke (half-cut) ([13], [40],[39]),
- durch Scannen des Laserstrahls entlang der Sollbruchstelle entstehen im Halbleitermaterial Defektzonen (Rekristallisation zu polykristallinen Silizium beim Erstarren) ([1], [13],[39]),
- durch Ätzen von Gräben an den Sollbruchstellen ([8],[39]).

Der auf einer selbstklebenden Folie haftend geritzte Wafer wird an einer Kante oder gewölbten Fläche gebrochen. Aufgrund der mechanischen Belastung bricht der Wafer entlang der Ritzlinie.

Das Siliziumeinkristall bricht bevorzugt entlang der $\langle 100 \rangle$ Ebene, so dass bei geringfügigster Fehlausrichtung der Kristalle zur Scheibenorientierung eine gezielte Bruchlinie nicht realisiert werden kann.

Das Handling von Wafern mit Durchmessern von z.B. 300 mm erlaubt heutzutage kein Ritzen und Brechen [13].

Trennen mit Wafersäge

Das Trennen mit der Wafersäge ist ein mechanisch abrasives Verfahren. Bei diesem seit den Kindertagen der Mikroelektronik benutzten Verfahren werden die Chips per mechanischer Säge „ausgesägt“. Als Werkzeug dienen Sägeblätter mit bis zu 4 Zoll Durchmesser und ca. 20 μm Dicke. Dieses ist an der Peripherie mit Diamantstaub beschichtet. Spezielle Handlingsysteme positionieren den Wafer unter dem Sägeblatt. Drehzahlen von bis zu 30 000 Umdrehungen pro Minute erlauben Schneidgeschwindigkeiten von 0,1 – 300 mm/s. Die Breite des Sägespaltes beträgt 50 – 200 μm .



Abbildung 2.5: Wafersäge Disco (Quelle Homepage des Unternehmens Disco)

Die hohen Drehzahlen bewirken infolge der Zentrifugalkraft eine Stabilisierung des dünnen Sägeblattes. Dies führt zu einer sauberen und exakt positionierten Schnittkante. Zur Fixierung des Wafers und der bereits vereinzelt Chips wird dieser mit Hilfe einer Klebefolie auf dem Chuck (Waferauflage) befestigt. Der Trennprozess wird durch einen kontinuierlichen Fluss von Wasser gekühlt. Dieses entfernt gleichzeitig den Sägestaub. Das Trennen mit der Wafersäge ist unabhängig von der Kristallorientierung.

Dieses Verfahren ist etabliert und perfektioniert. Aufgrund der Abnutzung und ungenauen Vorhersagen der Standzeit des Sägeblattes ist das Sichern der Schnittqualität nicht vorhersehbar und nicht realisierbar. Beim mechanischen Trennen der Wafer kann es infolge der mechanischen Beanspruchung des Halbleitermaterials zu Chipping (Abbildung 2.6) und Mikrorissbildung an der Schnittkante und im Materialgefüge kommen. Ausbrüche am Sägerand können bis zu 50 μm betragen [33].

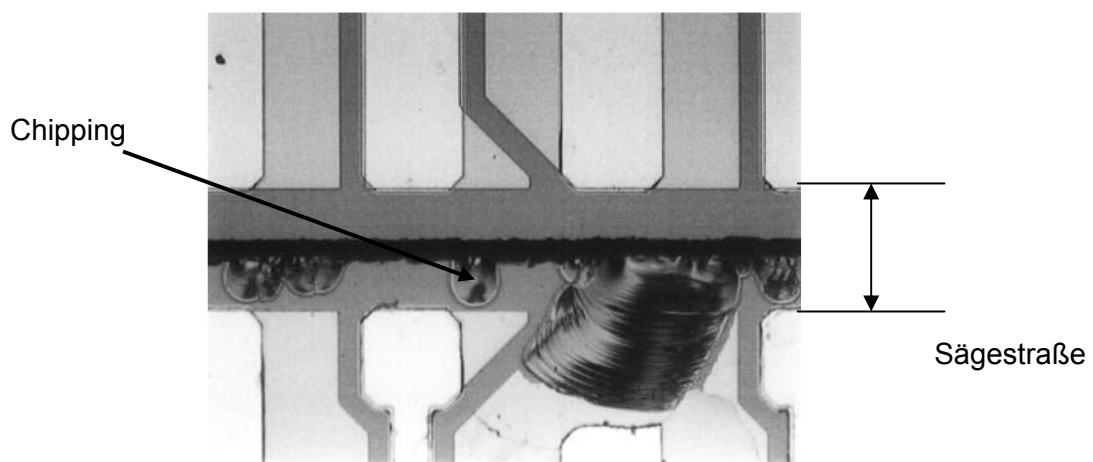


Abbildung 2.6: Chipping an einem Wafer [47]

Ein Ausschneiden von Freiformflächen, wie sie bei passiven Bauelementen zum Einsatz kommen, ist wegen des Werkzeuges nicht möglich.

Zwischen den zu vereinzelt Chips müssen Mindestabstände von 50 -70 μm für das Sägeblatt / Sägestraße belassen werden.

Durch die Benutzung dieses Verfahrens seit Beginn der Halbleiterfertigung und die damit verbundene ständige Weiterentwicklung und Verbesserung ist dieses Verfahren mittlerweile, was Schnittgeschwindigkeit und Schnittqualität angeht ausgereizt und bereits an seine Grenzen gestoßen ([1],[13],[32],[39]).

Trennen mit Laser

Zum Trennen des Wafers wird ein fokussierter Laserstrahl genutzt. Die durch den Laser eingebrachte Energie in das Material bewirkt ein lokales Aufschmelzen und das teilweise oder vollständige Verdampfen des Materials. Das abgetragene Material verdampft aus der Wechselwirkungszone. Der Einsatz eines Schneidkopfes mit Gaszuführung ermöglicht ein zusätzliches „Austreiben“ der Schmelze. Infolge der Relativbewegung zwischen Laserstrahl und Material entsteht eine Schnittfuge ([3],[10],[11],[12],[14],[26],[39]).

Der Einsatz von Handlingsystemen und/oder Scannern ermöglicht ein Schneiden freier Konturen. Aufgrund kraftfreier Bearbeitung existieren keine mechanischen Beanspruchungen für den Wafers. Daraus ergibt sich eine sehr geringe Neigung zum Chipping. Die Vorteile dieses Verfahrens sind die konstante Schnittqualität, die auch bei sehr dünnen Wafer realisiert werden kann.

Derzeitige System werden vorwiegend mit Nd YAG Lasern und Pulslängen von einigen 100 μs realisiert. Das lokale Aufheizen des Materials binnen einiger 100 μs kann zur Ausbildung von Schockwellen im Material und daraus folgend zu Abplatzungen (Chipping) führen.

Derzeit wird am Markt wird ein System der Firma DISCO angeboten.

Trennen mit Laser im Wasserstrahl

Bei diesem Verfahren werden die Verfahrensvorteile des Schneidens mit Wasserstrahl – kalt, großer Arbeitsabstand – mit denen des Laserstrahlschneidens – präzise und schnell – kombiniert. Dabei wird ein gepulster Laserstrahl in einem bis zu 50 μm dünnen laminaren Wasserstrahl fokussiert (Abbildung 2.7).



Abbildung 2.7: Water Microjet Anlage Synova LDS 200 [46]

Dieser wirkt wie eine Glasfaser und führt den Laserstrahl bis auf das Werkstück, welches sich etwa 2 – 3 cm unterhalb der Düse befindet (Abbildung 2.8). Die Totalreflexion im Wasserstrahl sorgt dafür, dass die Intensität über einen großen Arbeitsabstand genutzt werden kann. Im Vergleich zum klassischen Laserstrahlschneiden kann diese Intensität nur im Fokus erzielt werden.

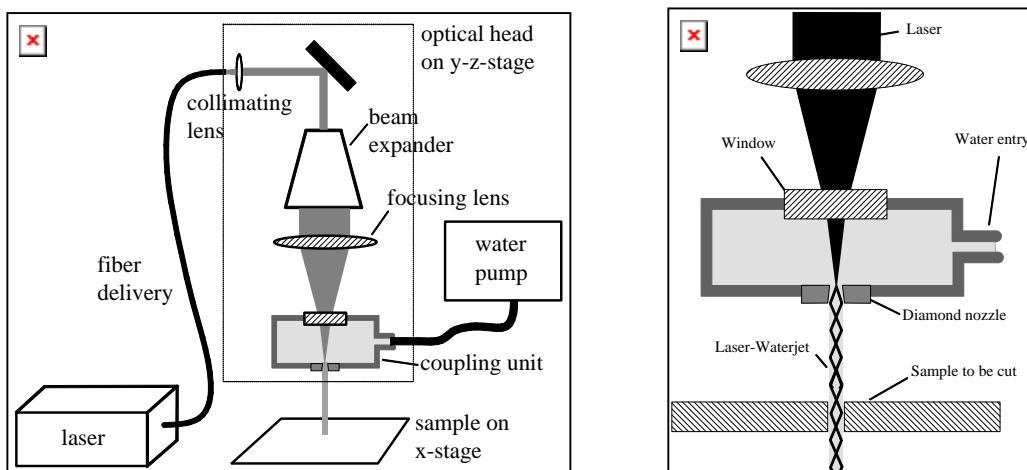


Abbildung 2.8: Schematische Darstellung einer Water Microjet Anlage Synova [46]

Auftretende thermische Effekte werden durch die sofortige Kühlung der Schnittfuge durch den Wasserstrahl vermieden. Das verdampfte Material wird zugleich durch den Wasserstrahl absorbiert und abtransportiert. Dies führt zu einer Reduzierung von Debris auf der Oberfläche des Wafers. Ein Abrasivmittel wird nicht verwendet.

Zur Fixierung des Wafers auf dem Chuck wird ein spezielles Lasertape, das nicht mit dem Laserstrahl reagiert und den Wasserstrahl passieren lässt verwendet.

Die erreichbare Schnittbreite ist abhängig von dem Durchmesser des Wasserstrahls. Derzeit wird an einer Reduzierung des Durchmessers des Wasserstrahls auf bis zu 10 - 25 μm gearbeitet. Dies ist nach Angaben von Synova im Bereich des technisch möglichen (Angaben des Herstellers Synova SA, Schweiz) ([23],[31],[37],[39]).

Trennen mit Laserholographie

Über dieses patentierte Verfahren nach dem Prinzip der Firma ALSI (Advanced Laser Separation Int., Niederlande) ist derzeit wenig bekannt.

Der Laserstrahl (Pulsdauern von 100 ns) wird mit Hilfe eines holographischen Gitters in mindestens zwei, ggf. aber bis zu zehn Einzelstrahlen geteilt. Diese Einzelstrahlen haben entsprechend niedrigerer Leistung. Durch das dicht aufeinander folgende Abfahren des gleichen Weges der einzelnen Teilstrahlen nacheinander, wird der Abtrag stufenweise erreicht. Der Schnitt soll dabei tiefer ausfallen als bei der Bearbeitung mit einem einzigen Laserstrahl gleicher Ausgangsleistung ([38],[39]).

2.3. Wechselwirkungen Laserstrahl – Silizium

Trifft elektromagnetischer Strahlung unter einem Winkel auf eine Oberfläche, wird ein Teil des Strahls reflektiert R, ein Teil transmittiert T und der Rest absorbiert A, wobei

$$R + T + A = 1 \quad (\text{Gl. Nr. 2.1}) [53]$$

gilt.

Dabei sind Reflexion, Transmission, Absorption sowie Brechung und Ausbreitungsgeschwindigkeit der Strahlung abhängig von den Eigenschaften des Materials und der Wellenlänge der Strahlung (Abbildung 2.10).

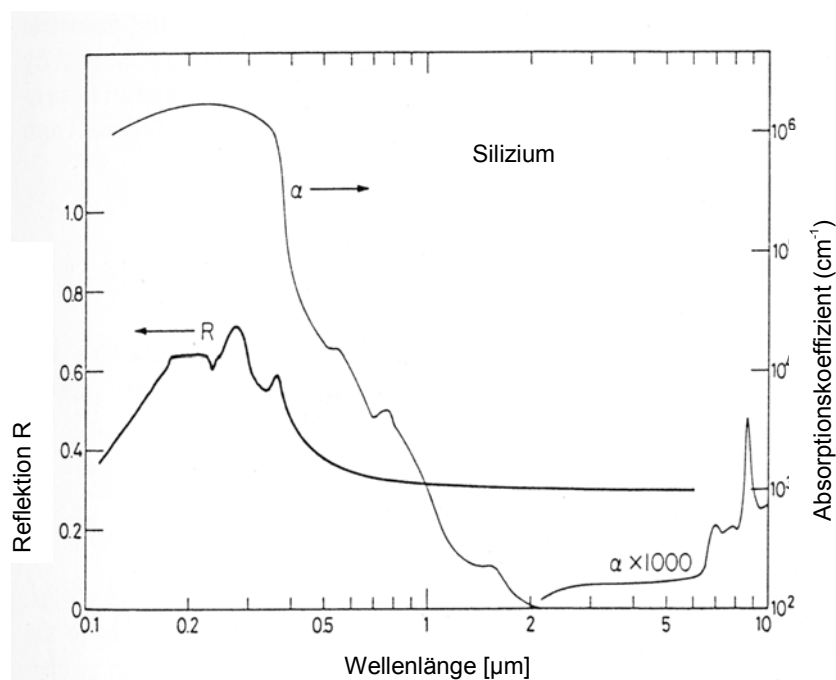


Abbildung: 2.10: Absorptions- und Reflexionskurve von Silizium [9]

Die Energieabsorption in Silizium ist infolge der geringen optischen Eindringtiefe (Absorptionslänge) l_α an der Materialoberfläche auf sehr dünne Schichten an der Oberfläche begrenzt ([2], [39]).

$$I_{\alpha} = \frac{1}{\alpha} \quad (\text{Gl. Nr. 2.2}) [14]$$

Ein Maß für das Absorptionsvermögen eines Materials ist der Absorptionskoeffizient α . Der Absorptionskoeffizient ist abhängig von Wellenlänge. Ermittelt wird der Absorptionskoeffizient α :

$$\alpha(\lambda) = \frac{4\pi nk}{\lambda} \quad (\text{Gl. Nr. 2.3}) [14]$$

Durch Einsetzen der optischen Brechzahl n , der spezifischen Beweglichkeit der freien Ladungsträger k und der Wellenlänge λ ergibt sich die Materialdicke der absorbierenden Schicht.

Trifft elektromagnetische Strahlung auf eine Materie wird die Strahlung durch freibewegliche Elektronen des Festkörpers absorbiert. Aufgrund fehlender freier Elektronen bei Nicht- und Halbleitern im Grundzustand bedeutet das, dass das Medium für die eingekoppelte elektromagnetische Welle transparent ist.

Die elektromagnetische Strahlung muss somit energetisch der Bandlücke zwischen Valenz- und Elektronenband entsprechen. Bei Halbleitern entspricht die Bandlücke dem sichtbaren und dem nahem Infrarot – Spektrum. Bei Wechselwirkung zwischen den Photonen des Laserstrahls mit den Elektronen des Festkörpers kommt es zu Interbandübergängen. Dabei werden die Elektronen durch die Energie der elektromagnetischen Strahlung aus dem Valenzband in das Leitungsband angehoben. Dies führt zu Elektronen- Loch- Paaren im Leitungsband und Löcher im Valenzband - und somit zu frei beweglichen Ladungsträgern. Einkristallines Silizium hat sowohl eine direkte Bandlücke bei $E_g = 3,4 \text{ eV}$, als auch eine indirekte Bandlücke $E_g = 1,12 \text{ eV}$ ([2],[14],[39]).

Voraussetzung für diese Übergänge ist die notwendige Photonenenergie W_{Ph} der einfallenden elektromagnetischen Strahlung. Die muss mindestens der Bandlückenenergie entsprechen.

$$W_{Ph} = \frac{hc}{\lambda} \quad (\text{Gl. Nr. 2.4}) [14]$$

In Tabelle 2.2 sind die unterschiedlichen Parameter für verschiedene Wellenlängen angegeben.

Tabelle 2.2: Charakteristische Materialeigenschaften von Silizium bei unterschiedlichen Energien [5]

Wellenlänge [nm]	Energie des Lichtes [eV]	Absorptionskonstante [cm ⁻¹]	Absorptionslänge [μm]	Reflexionskoeffizient
250	4,97	1,6 · 10 ⁶	0,006	0,61
355	3,49*	1,1 · 10 ⁶	0,009	0,55
500	2,48	2 · 10 ⁶	0,5	0,36
1060	1,17	50	200	0,33

* Aus Gleichung Nr. 2.4 folgt für 355nm:

$$W_{Ph} = \frac{hc}{\lambda} \quad \rightarrow \quad E(355\text{nm}) = 3,49 \text{ eV}$$

Den Einfluss direkter und indirekter Übergänge auf die Absorption und Reflexion zeigt Abbildung 2.10. Der Absorptionskoeffizient zeigt mit abnehmender Wellenlänge einen geringen Anstieg bei $\lambda = 1,13 \mu\text{m}$ und bei $\lambda = 0,36 \mu\text{m}$ einen steilen Anstieg. Diese Anstiege zeigen beide Interbandübergänge des Siliziums, den indirekten bei 1,12 eV ($\lambda = 1,13 \mu\text{m}$) und einen direkten bei 3,4 eV ($\lambda = 0,36 \mu\text{m}$) [9].

Die Absorption der Laserstrahlung führt im Werkstück zu einer Erwärmung und bei hinreichenden Leistungsdichten im Allgemeinen zu einem Schmelzen und Sublimieren des Materials. Sehr kurze Einwirkzeiten mit hohen Intensitäten führen zu direkten Phasenübergängen von fest zu gasförmig [28]. Der entstandene Materialdampf expandiert schlagartig gegen die Umgebungsatmosphäre und bewirkt einen Druck auf die Materialschmelze. Ist dieser Druck höher als die Oberflächenkräfte der Schmelze, erfolgt eine Ablation des Materials.

Aufgrund der Materialeigenschaften von Silizium ist ein Ziel bei der Bearbeitung des Materials den Wärmeeintrag so gering wie möglich zu halten. Damit soll die schmelzflüssige Phase im Silizium auf ein Minimum reduziert und Wärmeleitungsverluste nahezu vermieden werden. Dies kann durch hohe Laserstrahlintensitäten verbunden mit sehr kurzen Einwirkzeiten realisiert werden. Diese Anforderungen können durch so genannte Kurzpulslaser erfüllt werden.

Die tatsächlich eingekoppelte Energie führt letztendlich zum Schmelzen und Verdampfen des zu bearbeitenden Materials. Dieser Materialdampf tritt in Wechselwirkung mit der Laserstrahlung und wird durch Absorptionsvorgänge weiter aufgeheizt. Dabei können sich Temperaturen entwickeln, die zu einer Ionisation des Materialdampfes führen, so dass eine Plasmawolke über dem Bearbeitungsgebiet entsteht.

Die dafür notwendigen Intensität zur Bildung einer Plasmawolke sind bei Anwendung von Nd:YAG Lasern in Größenordnungen von ca. 10^8 W/cm² [53].

Ist die umgebende Gasatmosphäre schwer ionisierbar, kann die Bildung eines Plasmas behindert werden. Eine Reduzierung der Plasmabildung ermöglicht ein höheres Einkoppeln der Laserstrahlung in das Material. Dies führt zu einer Minimierung der Prozesszeiten.

Die Verwendung von schwer ionisierbaren Prozessgasen – wie zum Beispiel Helium – verbessert den Wärmeeintrag in die Bearbeitungszone (siehe Tabelle 2.3).

Tabelle 2.3: Wärmeleitfähigkeit und Ionisierungsenergien von typischen Prozessgasen ([49], [50])

Prozessgase	Wärmeleitfähigkeit (W/mK)	Ionisierungsenergie (eV)
Stickstoff	0,026	14,53
Helium	0,15	24,59
Argon	0,017	15,76
Sauerstoff	0,026	13,62

3. Ziel der Arbeit

Mit den Anforderungen der Mikroelektronikindustrie nach immer dünneren und flexibleren Siliziumchips, die sich in Papier, Folie oder Stoff einbauen lassen, gelangen die Wafersägen an ihre Grenzen. Durch mehrere Schleif- und Polierschritte innerhalb des Herstellungsprozesses entsteht aus einer ursprünglich relativ stabilen Siliziumscheibe ein fragiles Produkt von weniger als 100 μm [40]. Das Handling und die Weiterverarbeitung dieser dünnen Wafer stellen hohe Anforderungen an die Weiterverarbeitungstechnik.

Die vorliegende Arbeit soll die Möglichkeiten des Einsatzes von UV- Kurzpulslaser zum Trennen von Siliziumwafern aufzeigen. In zahlreichen Veröffentlichungen seit Ende der Neunziger Jahre wird berichtet, dass mit Kurzpulslasern prinzipiell ein Prozess zum schädigungsarmen Trennen von Siliziumwafern möglich ist. Neuere Untersuchungen zeigen erstmals, dass die Verwendung von UV- Kurzpulslasern eine Reduzierung des thermischen Einflusses auf das Material Silizium wie auch ein Arbeiten nahe des Absorptionsmaximum von Silizium ermöglicht. Die dabei auftretenden Effekte lassen unter anderem neue Potenziale in der Entwicklung des Laserstahlmikroschneidens erkennen. Demnach eröffnen sich für das Trennen von Siliziumwafern interessante neue technische Möglichkeiten. Bisher sind noch keine Serienanwendungen zum Trennen von Siliziumwafern mit UV- Kurzpulslasern veröffentlicht worden.

Ausgangspunkt dieser Arbeit war ein Defizit im Hinblick auf die Untersuchungen der Verfahrensparameter und atmosphärischen Bedingungen beim Schneiden von Siliziumwafern. Während sich eine Vielzahl vorangegangener Untersuchungen vor allem mit dem Einsatz von gepulsten Nd-YAG Laser sowie der Hybridanwendung von wasserstrahlgeführten Nd-YAG Lasern (SYNOVA) und deren technologischen Einsatzmöglichkeiten beschäftigen, liegt bisher kein übergreifendes Verständnis des Zusammenhanges zwischen den verschiedenen Verfahrensparametern und dem Schneidergebnis vor. Ohne dessen Kenntnis ist ein gezieltes Vorgehen für die gewünschte Anwendung nicht möglich. Untersuchungen zum Einfluss der Laserwellenlängen von 532 nm oder 355 nm zum Schneiden von Silizium kommen nur in wenigen Veröffentlichungen vor. Aussagen zum Wirken verschiedener Laserparameter wie z.B. Pulswiederholfrequenz und Polarisation existieren in wenigen Arbeiten. Die Abhängigkeiten von Bearbeitungsstrategie, Materialeigenschaften und Umgebungsatmosphäre beim Schneiden liegen nur in wenigen Studien vor, aus denen kein eindeutiger Aufschluss über das Verhalten beim Einsatz von UV- Kurzpulslasern hervorgeht. Außerdem wurden in diesen Studien keine direkt

vergleichenden Untersuchungen durchgeführt, in denen eine direkte Gegenüberstellung zu den Eigenschaften der jeweiligen Einzelparameter vorliegt, weshalb die veröffentlichten Interpretationen der Ergebnisse auch nicht immer eindeutig nachvollziehbar sind bzw. eine Reihe von Frage offen lassen.

Für einen zukünftigen industriellen Einsatz von UV Kurzpulslasern besteht somit Bedarf im Hinblick auf das Verständnis der unterschiedlichen Laserparameter und auf die zu berücksichtigenden prozesstechnischen Aspekte. Weiterhin ist festzustellen, dass die Möglichkeiten des Einsatzes von UV – Kurzpulslasern zur Beeinflussung der Schnittfugengeometrie hinsichtlich der Minimierung der Schnittfugenbreite und somit der Maximierung der Ausbeute auf Wafern bislang kaum untersucht wurde.

Das wissenschaftlich-technische Ziel der Arbeit ist es durch Klärung des Zusammenhanges von Laserparametern und Verfahrensparametern Möglichkeiten aber auch Grenzen des Lasermikroschneidens von Siliziumwafern aufzuzeigen.

4. Experimenteller Aufbau

4.1. Versuchsaufbau

Die für die Mikromaterialbearbeitung eingesetzte Anlage ist ein am IWS entwickeltes System. Dieses besteht im Wesentlichen aus folgenden Komponenten:

- Strahlquelle,
- Strahlführung,
- Fokussieroptik und
- Stromversorgung, das Kühlsystem und die Steuerung (Abbildung 4.1 und 4.2).



Abbildung 4.1: Lasermikrobearbeitungsanlage

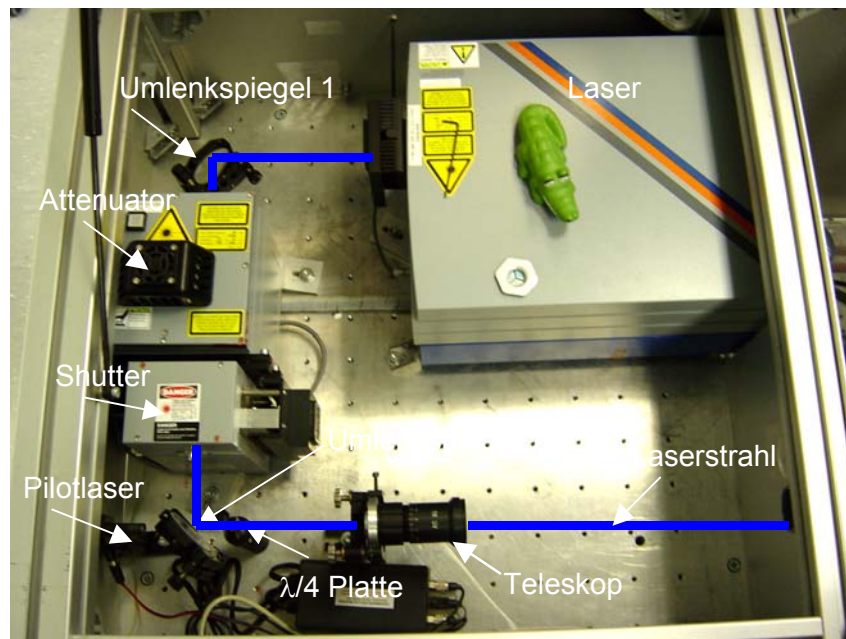


Abbildung 4.2: Strahlführung des verwendeten Lasersystems

Für die Untersuchungen sind folgende frequenzverdreifachte Lasersysteme zum Einsatz gekommen:

- Nd:YAG - Laser vom Typ Lightwave UV 7 W (Lightwave electronics),
- Nd:YAG - Laser vom Typ GATOR UV 3 W (Lambda Physik),
- Nd:YAG - Laser vom Typ GATOR UV 10 W (Lambda Physik).

Alle verwendeten Laserquellen werden diodengepumpt und arbeiten mit optischer Güteschaltung (Q-Switch) im Pulsbetrieb. Mit der Güteschaltung werden Pulsdauern von 25 ns (Lightwave) bzw. 15 ns (Gator) mit Pulsenergien von 0,3 mJ bei 3 W, 1 mJ bei 7 W und 10 W erzeugt, ([14],[26],[28],[39]).

Durch gezielte Dotierung der Pumpdioden (GaAlAs) ist ein sehr schmales Emissionsspektrum der Dioden realisierbar z. B. 807 nm. Mit dieser zielgerichteten Abstimmung des Emissionsspektrums auf das Absorptionsspektrum des Festkörperkristalls ist eine Steigerung des Gesamtwirkungsgrad auf $\geq 10\%$ der Laser möglich [51].

Die Pumpdioden werden grundsätzlich am Ende oder transversal um den Festkörperstab angeordnet. Für die hier verwendeten Lasertypen wurde die transversale Anordnung vom Hersteller gewählt. Abbildung 4.3 stellt die transversale Anordnung quer zum aktiven Lasermedium dar. Hier werden die Diodenarrays sternförmig um den Nd:YAG - Kristall angeordnet. Die zweite Möglichkeit besteht darin, die Pumpstrahlung longitudinal zur

Achse des Mediums einzubringen. In beiden verwendeten Lasersystemen wird die transversale Anordnung realisiert.

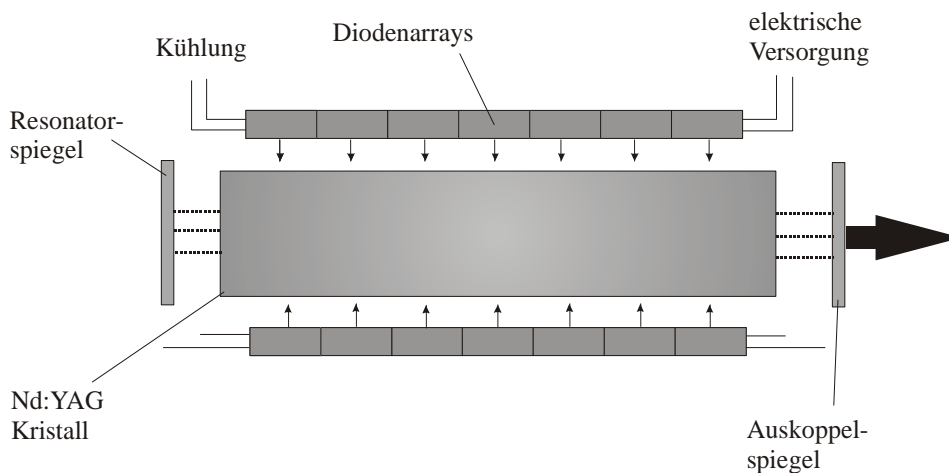


Abbildung 4.3: Prinzip eines transversal diodengepumpten Festkörperlasers [51]

Durch eine Frequenzvervielfachung der diodengepumpten Festkörperlaser lassen sich Wellenlängen im Grünen und im UV- Bereich erzeugen.

Frequenzverdopplung

Der Einsatz von nichtlinearen, optisch doppelbrechenden Kristallen erlaubt die Verdopplung der Grundwellenlänge. Verwendet werden dafür nichtlineare optische Materialien, die eine möglichst hohe Transparenz aufweisen sollten, sowie eine möglichst hohe Zerstörschwelle. Ein häufig verwendeter Kristall ist Kaliumdihydrogenphosphat (KDP).

Durchläuft eine Lichtwelle mit der Frequenz ω_1 , mit einer ausreichend großen Feldstärke E , einen Kristall, so ergibt sich ein nichtlinearer Anteil der elektrischen Polarisation der mit der doppelten Frequenz $\omega = 2\omega_1$ (zweite Harmonische) schwingt.

Wird z.B. ein infraroter Strahl eines Nd:YAG Lasers mit der Wellenlänge $1,06\mu\text{m}$ durch einen solchen Kristall geschickt, dann tritt neben dem einfallenden Strahl mit der Grundwellenlänge noch ein grüner Strahl mit der Wellenlänge $0,53\mu\text{m}$ aus.

Der Wirkungsgrad dieser Frequenzverdopplung beträgt ca. 20- 30 % und ist vom verwendeten Kristall, der einfallenden Intensität und Strahlqualität abhängig ([19]).

Voraussetzung ist, das der Brechungsindex des Kristalls für beide Frequenzen gleich ist. Dies bewirkt ein phasengleiches durchlaufen der Lichtwelle durch den Kristalls ([19],[52]) realisiert.

Frequenzverdreifung

Zur Erzeugung der frequenzverdreifachten Wellenlänge wird eine Frequenzmischung genutzt. In einem nichtlinearen Kristall absorbiert ein Dipol sowohl ein Photon der Grundwellenlänge als auch eines der 2. Harmonischen.

Der Aufbau muss dabei so realisiert werden, dass der verdreifachte Anteil ausgekoppelt wird, während die Grundwellenlänge und die 2. Harmonische den nichtlinearen Kristall wieder durchlaufen und zur weiteren Frequenzmischung genutzt werden ([4],[19],[39]).

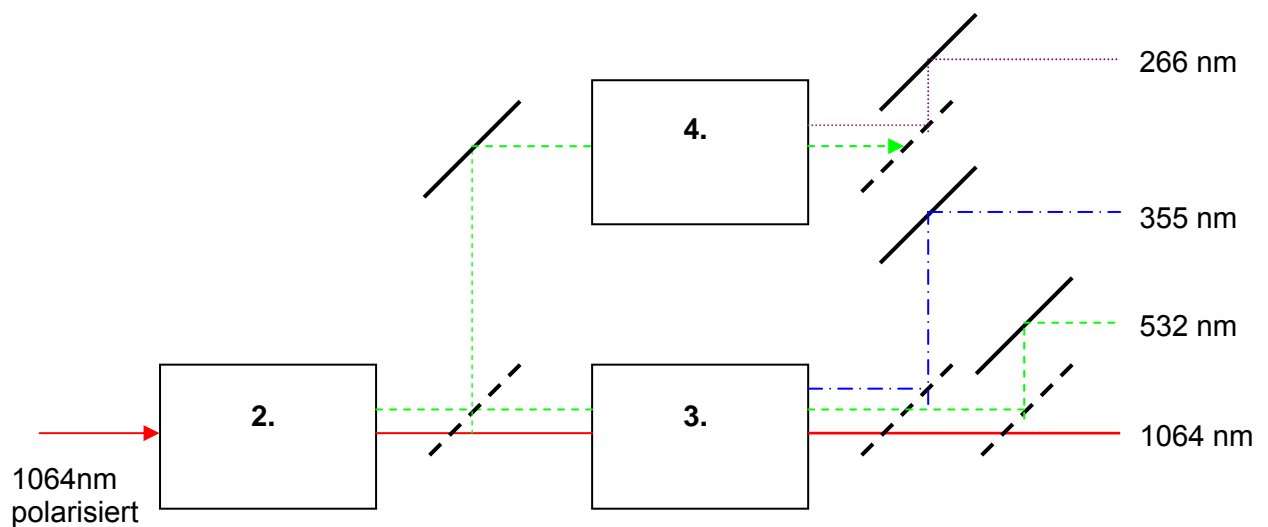


Abbildung 4.4 : Anordnung zur Erzeugung von Frequenzvervielfachung von Laserpulsen [19]

2. Frequenzverdoppler: $1064 \text{ nm} \rightarrow 532 \text{ nm}$
3. Verdreifachung durch Frequenzmischung: 1064 nm und $532 \text{ nm} \rightarrow 355 \text{ nm}$
4. Frequenzverdoppler zur Erzeugung der 4. Oberwelle: $532 \text{ nm} \rightarrow 266 \text{ nm}$

Die frequenzverdreifachten UV-Laser besitzen eine Wellenlänge von 355 nm und damit eine Photonenenergie von 3,49 eV.

Die Spezifikationen der verwendeten Laser sind in Tabelle 4.1 zusammengestellt.

Tabelle 4.1: Laser-Spezifikationen/Daten [Quelle: Datenblätter des Herstellers]

Lasertyp	Lightwave Q301 - HD	GATOR UV	POWER-GATOR UV	POWER-GATOR Grün
Emissionswellenlänge [nm]	355	355	355	532
Laserausgangsleistung	10 W (10 kHz) 8 W (20 kHz)	3 W (bei 10 kHz)	13 W (bei 10 kHz)	13 W (bei 10 kHz)
Pulswiederholrate	1 Hz – 100 kHz	10 kHz	7,5 – 15 kHz (variierbar)	10 kHz
Pulsenergie (bei 10 kHz)	1 mJ	0,3 mJ	> 1 mJ	1,3 mJ
Pulslänge / Pulsdauer	25 ns	15 ns	15 ns	15 ns
Rohstrahldurchmesser	0,27 mm	1 mm	1 mm	1 mm
Polarisationsverhältnis: linear	> 100 : 1	> 25 : 1	> 25 : 1	> 25 : 1
Polarisationsrichtung	Horizontal	Horizontal	Horizontal	Horizontal
Strahlqualität	TEM ₀₀	TEM ₀₀	TEM ₀₀	TEM ₀₀

Die Intensitätsverteilung der emittierten Laserstrahlung im transversalen Grundmode (TEM₀₀) entspricht einer Gauß-Verteilung und liegt in linear polarisierter Form mit horizontaler Schwingungsrichtung vor.

Für eine effektive Arbeitsweise wird der Strahl über ein Scannersystem auf die Materialoberfläche abgelenkt. Die beiden Scannerspiegel lenken den Laserstrahl entsprechend der gewünschten Kontur ab (Abbildung 4.5).

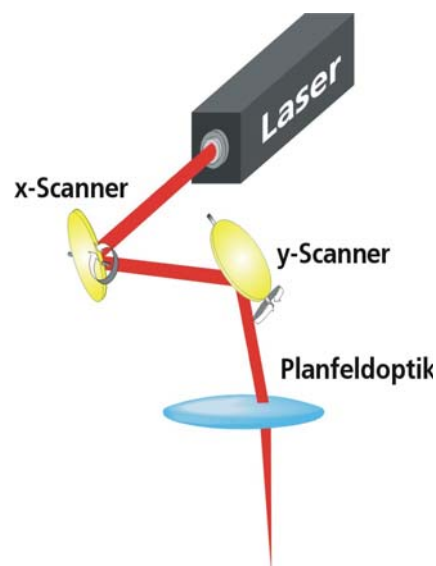


Abbildung: 4.5: Laser – Scanner - System

Integriert in das Scannersystem der Firma Arges ist ein Planfeldobjektiv „F- Theta- Optik“ welches zur Fokussierung verwendet wird. Der mehrstufige Aufbau eines Scannersystems zur Gewährleistung nahezu konstanter Verhältnisse im Fokusbereich ist im Kapitel 10 beschrieben.

Als Positionier- und Handlingsystem diente ein XYZ- Verschiebetisch der Firma Aerotech. Für niedrigere Arbeitsgeschwindigkeiten kann das Werkstück auf einem XY-Verschiebetisch bei feststehender Laserbearbeitungsoptik über Vorschubantriebe der einzelnen Linearachsen relativ zum Laserstrahl verschoben werden. Die Z- Achse dient der Zustellung des Strahlfokus zur Materialoberfläche. Der maximale Verfahrweg des verwendeten 3-achsigen Positioniertisches 1000 DC der Firma Aerotech beträgt 150 mm in jede der drei Raumrichtungen (Positioniergenauigkeit: 5 μm). Geschwindigkeiten können bis maximal 1000 mm/min eingestellt werden, ([4],[19]).

Tabelle 4.2: Vergleich von Verfahren zur Erzeugung der Relativbewegung Laserstrahl – Werkstück

Form der Relativbewegung	Tischsteuerung	Scanner
Bewegungslänge [mm]	150	50
Maximale Geschwindigkeit [mm/s]	ca. 17 (1000 mm/min)	6000
Minimale Geschwindigkeit [mm/s]	-	0,025
Positioniergenauigkeit [μm]	ca. 5	ca. 500 (entspricht ca. 1 %)
Programmierung	CNC/UNIDEX (u 500)	ARGES Inscript

Die Steuerung von Strahlablenkung und Positioniertischen von Laseranlagen erfolgt mit Hilfe von rechnergestützten Systemen durch Programmierung (z.B. Erstellung von Werkstückgeometrien mit CAD-Systemen oder NC-Programmierung für die Arbeitsplanung).

Die Versuche wurden unter reproduzierbaren Bedingungen in einer abgeschlossenen Gasatmosphäre oder Vakuum durchgeführt. Hierzu standen eine evakuierbare Probenkammer mit Quarzglasfenster sowie eine Vorvakuumpumpe und Druckmessgerät zur Verfügung (Abbildungen 4.6).



Abbildung 4.6: Vakuumkammer mit Druckmessgerät

4.2. Strahlführungen

Zur Strahlführung und -formung kommen sowohl transmittierende (Linsen, Objektive) als auch reflektierende (Spiegel) optische Komponenten zum Einsatz.

Nach Auskopplung des Strahls aus der Laserquelle geht er über einen Umlenkspiegel und folgende optischen Bauelemente (Abbildung 4.8):

- Attenuator (nur bei 10 Watt Laser genutzt),
- Strahlshutter,
- $\lambda/4$ Platte,
- Teleskop,
- Scannersystem.

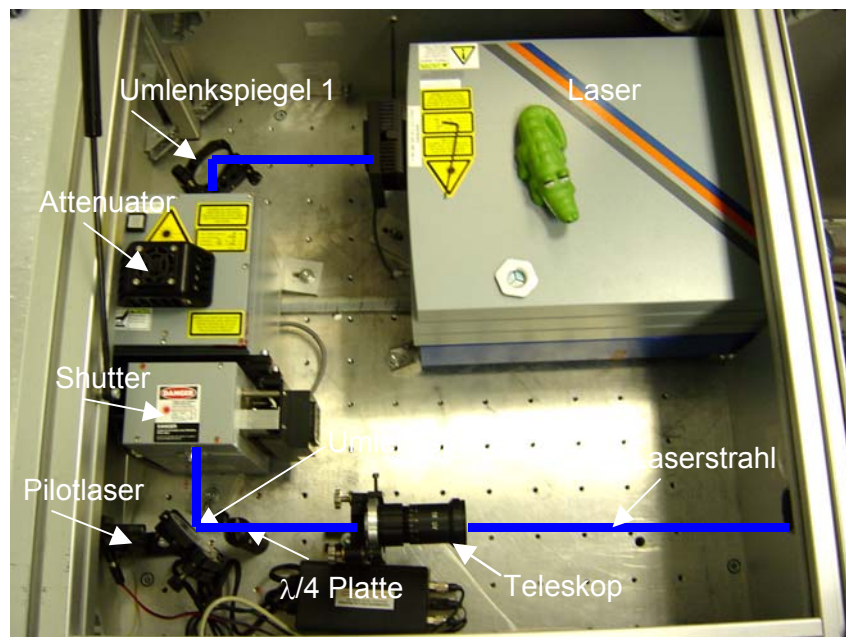


Abbildung 4.8: Strahlführung innerhalb der Anlage

Der Attenuator (Strahlabschwächer) kann zur Leistungsregelung des Lasers eingesetzt werden. Durch Variation der Transmission ist somit eine stufenweise Einstellung der Laserleistung möglich. Für die Versuche zum Schneiden von Silizium wurde ständig mit der maximalen Leistung gearbeitet. Der Strahlshutter kann neben seiner sicherheitsrelevanten Bedeutung noch aktive Funktionen als Strahlschalter ausüben. Diese ermöglicht ein

schnelles Zu- oder Abschalten des Laserstrahls für definierte Sprünge auf dem zu bearbeitenden Material.

Für die Änderung der Polarisationsrichtung des linear polarisierten Strahls der verwendeten Laserquellen wurde in den Strahlengang eine $\lambda/4$ Platte integriert. Nach dieser besitzt der Strahl eine zirkular polarisierte Richtung. Diese Polarisation ist die am meisten in der Laserfeinschneidtechnik verwendete Richtung und realisiert eine gleich bleibende Schnittqualität (siehe Kapitel 7.2).

Um auf der Materialoberfläche einen möglichst kleinen Fokus zu realisieren, erfolgt mittels eines Galileiteleskops eine 1 : 5 Vergrößerung. Dies führt zu einer Reduzierung der Strahlintensität auf den verwendeten optischen Komponenten im Strahlengang, ([3],[26],[39]).

Eine Schlüsselkomponente der Strahlableitung bildet das Scannersystem. Dieses System lenkt den Laserstrahl über zwei galvanometrisch angesteuerte Umlenkspiegel und eine integrierte Planfeldoptik entsprechend den gewünschten Konturen auf der Materialoberfläche ab, Bild 4.9. Die Umlenkspiegel sind entsprechend der genutzten Wellenlänge dichroitisch beschichtet.

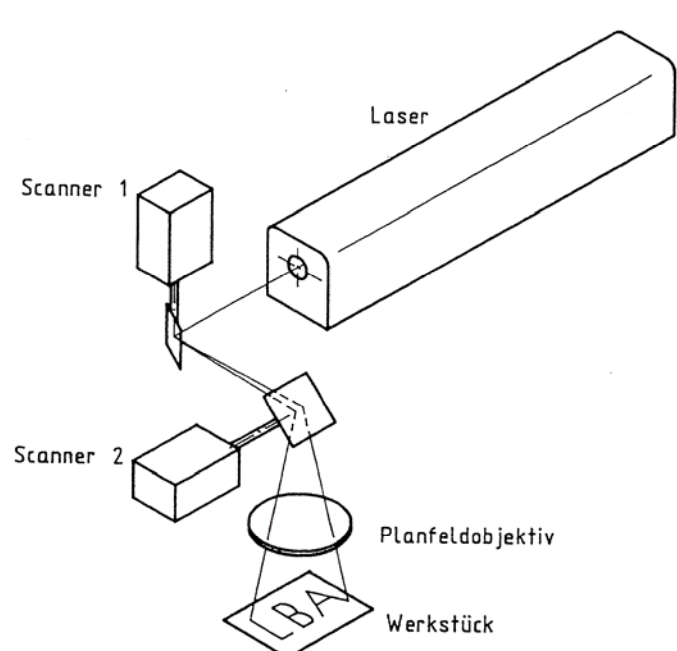


Abbildung 4.9: Grundprinzip einer Strahlableitungseinheit, [19]

Die Fokussierung erfolgt über die Planfeldobjektiv, eine so genannte F-Theta-Optik. Ein solches Scannersystem wird durch die Angaben zu Brennweite, Arbeitsabstand, maximaler

Arbeitsfeldgröße (Scanfeld) und minimalem Fokusdurchmesser ausreichend spezifiziert (Tabelle 4.3).

Tabelle 4.3: Laserstrahlparameter für das verwendete Scannersystem

Parameter	Wert
Aufweitung	5fach (Teleskop)
Planfeldobjektiv	F-Theta-Optik
Arbeitsfeldgröße [mm]	50 x 50
Brennweite [mm]	100
berechneter Fokusdurchmesser [μm] (nach Gl. 4.3)	9,04 *
gemessener Fokusradius [μm]	11,45 *
berechnete Rayleighlänge [mm] (nach Gl. 4.5)	0,18 *
gemessene Rayleighlänge [mm]	0,30 *

(* Werte für Power Gator UV)

Der Vorteil von Planfeldobjektiven gegenüber Standardobjektiven ist der gleichmäßige Fokus des Strahls innerhalb der Brennweite und der Arbeitsfeldgröße auf dem Material (Fokusebene), (Abbildung 4.10)[19].

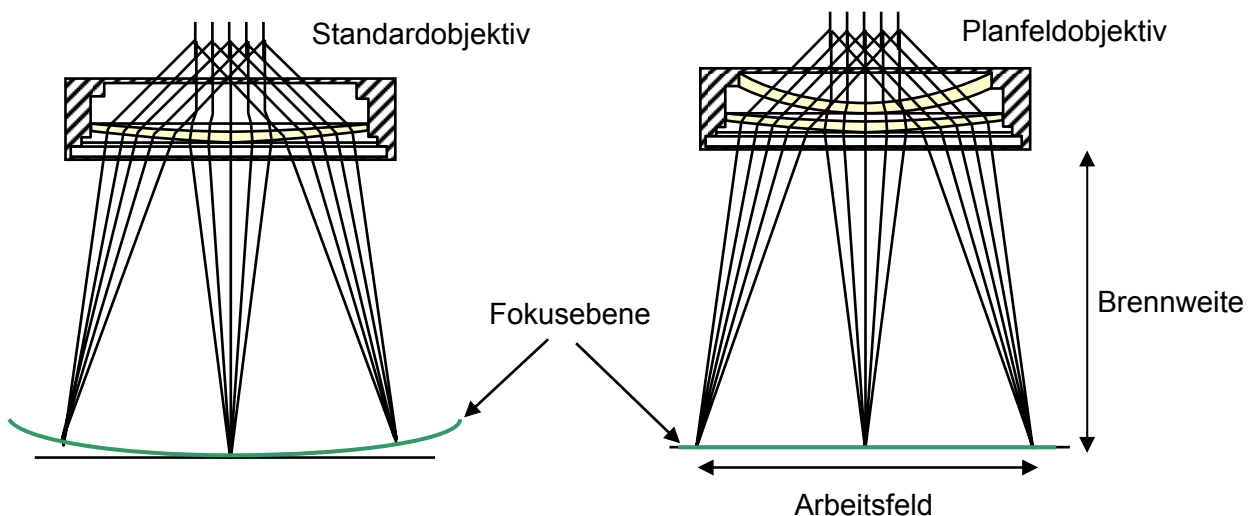


Abbildung 4.10: Vergleich Standardobjektiv und Planfeldobjektiv (F-Theta) [19]

Der Durchmesser des fokussierten Laserstrahls d_f im TEM_{00} -Mode ist definiert als die Strahlquerschnittsfläche, in der 86 % der Gesamtstrahlleistung enthalten sind [3]. Dieser ergibt sich aus:

$$d_f = \frac{4\lambda F}{\pi K} \quad (\text{Gl. Nr. 4.3}) [53]$$

Hierin ist F die Kennzahl für die Fokussierung, die sich aus dem Strahldurchmesser D auf der Fokussieroptik – nach Aufweitung - und deren Brennweite f ergibt, (Gl. Nr. 4.4) ([3], [14]).

$$F = \frac{f}{D} \quad (\text{Gl. Nr. 4.4}) [53]$$

Die Strahlqualitätszahl K ist eine Größe welche die Qualität eines Laser charakterisiert. Die Werte liegen zwischen 0 und 1, wobei Werte nahe 1 eine hohe Strahlqualität beziffern. Ein Gaußstrahl hat eine Strahlqualität von K=1, reale Laserstrahlen von K< 1 [45].

Mit dem von den Herstellern angegebenen Rohstrahldurchmesser von ca. 1 mm errechnet sich ein Fokusdurchmesser d_f - nach einer 1 : 5 - fachen Strahlaufweitung – von 9,04 µm.

Gleichung 4.3 zeigt, dass ein kleiner Fokusdurchmesser durch eine kürzere Wellenlänge oder durch eine kleinere Kennzahl der Fokussierung zu erzielen ist. Kleine Kennzahlen der Fokussierung durch kleinere Brennweiten f oder große Strahldurchmesser D verursachen nach

$$z_R = \frac{4\lambda F^2}{\pi K} \quad (\text{Gl. Nr. 4.5}) [53]$$

eine kürzere Rayleighlänge z_R. Diese ist definiert als der Abstand von der Strahltaile, nachdem sich die maximale Strahlintensität halbiert bzw. der Strahlradius um den Faktor $\sqrt{2}$ vergrößert hat. Dies bedeutet eine Verdopplung der Querschnittsfläche des Laserstrahls. Die Rayleighlänge für die verwendete Optik von 0,18 mm ergibt sich nach Gleichung 4.5 ([3], [14]).

Eine Reduzierung der Rayleighlänge des Laserstrahls erfordert eine exakte Bestimmung der Fokusslage für den Bearbeitungsprozess.

Mit dem Microspotmonitor M der Firma Primes wurde für den Gator UV und Power Gator UV ein Fokusradius von 11.45 µm gemessen (Abbildung 4.11).

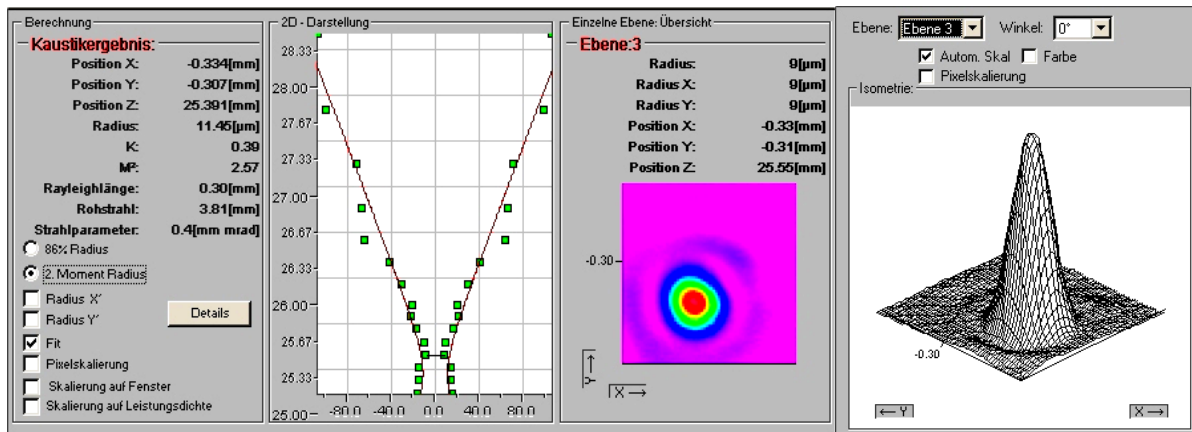


Abbildung 4.11: Kautikvermessung für Power Gator UV [Quelle: Fraunhofer IWS]

Aufgrund des optischen Aufbaus der Strahlführung erfährt der Laserstrahl auf seinem Weg zum Werkstück Beugungs- und Absorptionsverluste. Daraus ergibt sich die Anforderung einer exakten Intensitätsbestimmung auf dem zu bearbeitenden Material. Diese Messungen wurden mit einem pyroelektrischen Leistungsmessgerät durchgeführt und prozentual in Bezug auf die standardmäßig am Laser geräteintern gemessene Leistung in Tabelle 4.4. angegeben.

Tabelle 4.4: Prinzipdarstellung/Daten der optischen Leistungsübertragung [39] (τ_x - Übertragungsgrad)

	Laser	Umlenkspiegel 1	Attenuator, Shutter	Umlenkspiegel 2	$\lambda/4$ Platte	Teleskop (1:5) Scanner
τ_x [%]	100	95	100	95	98	88
τ_{Gesamt} [%]	100	95	95	90	88	76

5. Bewertungskriterien

5.1. Bewertung von Schneidergebnissen

Durch Variation verschiedener Laserstrahl- und Prozessparameter (Gasatmosphäre, Fokussierung, Werkstückeigenschaften) soll das Bearbeitungsergebnis im Hinblick auf die Schnittgeschwindigkeit und Schnittqualität beurteilt werden (Abbildung 5.1) [28].

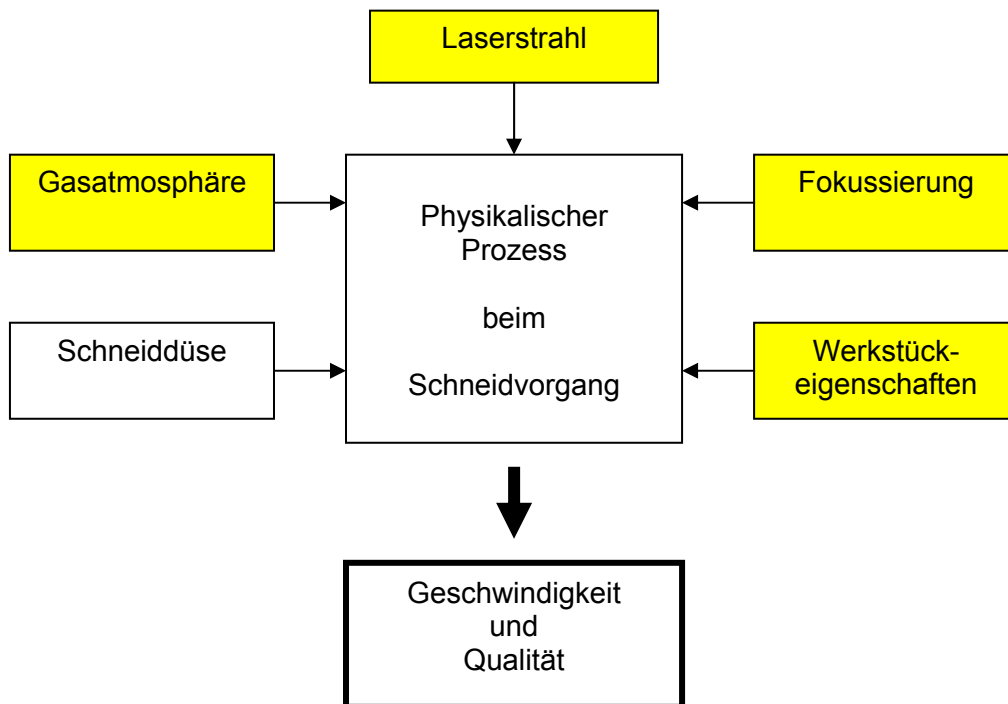


Abbildung 5.1: Einflussfaktoren beim Schneidvorgang [14]

5.2. Schneidgeschwindigkeit

Die Wirtschaftlichkeit eines Schneidprozesses besteht in den meisten Fällen aus den Aussagen zur Geschwindigkeit in der das Material getrennt werden kann. Daher ist die Schnittgeschwindigkeit eine der wichtigsten Prozessgrößen und ist direkt abhängig von den Werkstoffparametern des Materials, [28].

Die tatsächliche Prozessgeschwindigkeit für das Trennen von Siliziumwafern ergibt sich aus der effektiven Schneidgeschwindigkeit. Diese ist definiert über die Länge der

auszuschneidenden Sollkontur und der zum vollständigen Ausschneiden benötigten Zeit.

Das komplette Trennen von Silizium mit Materialdicken von mehr als ca. 210 µm in einem Zug ist in der Regel nicht möglich. Deshalb muss die Schnittfuge mehrmals abgefahren bzw. abgescannt werden.

Dieses Mehrfachscannen des zu schneidenden Materials ist in der Kurzpuls-Lasertechnologie ein etabliertes Verfahren. Dabei erfolgt stufenweise ein Abtrag innerhalb der Schnittfuge. Die Abtragsrate ist materialabhängig ([8] [39]).

Die effektive Schneidgeschwindigkeit v_{eff} - als Maß für die Prozessgeschwindigkeit - errechnet sich dann aus der Scangeschwindigkeit und der Anzahl der Überfahrten:

$$v_{eff} = \frac{S_{Kontur}}{t_{scan} \cdot n} = \frac{v_{scan}}{n} \quad (\text{Gl. Nr. 5.1}) [39]$$

mit v_{scan} für Relativgeschwindigkeit zwischen Laserstrahl und Werkstück (Vorschub) und n für Anzahl Überfahrten.

Für die Schneidexperimente wurde ein Quadrat von 4 mm x 4 mm Kantenlänge gewählt um bestimmte richtungsabhängige Einflüsse auszugleichen. Die in den Messwertetabellen ausgewiesene Fehlergröße zur Schneidgeschwindigkeit wurde nach Gleichung (C.4) im Anhang C errechnet.

5.3. Schnittqualität

Für die Mikromaterialbearbeitung ist die Qualität des Schnittes ein wichtiges Kriterium zur Beurteilung der technischen Eignung. Dies ist im Vergleich zur Schneidgeschwindigkeit keine objektiv mess- oder bewertbare Größe.

In Abhängigkeit von den erforderlichen Maßhaltigkeiten bzw. Qualitätsanforderungen an die Schnittfuge können die erforderlichen Genauigkeiten von Anwendung zu Anwendung variieren. Ein entscheidender Faktor hierbei sind auch die Eigenschaften des Materials. Daher sind in der Praxis unter Berücksichtigung der spezifischen Anforderungen des Materials oft Optimierungsmaßnahmen angezeigt ([2],[11],[14],[39]).

In der DIN 2310 „Thermisches Schneiden“, der VDI-Richtlinie 2906 und DIN 8518 „Fehler an Brennschnitten und Plasmaschnitten“ sind Kenngrößen und Kriterien zur Charakterisierung und Bewertung der Schnittqualität speziell der Güte von Schnittflächen sowie der Schnittfugengeometrie zusammengestellt, ([3],[28]). Diese dort nach den Gesichtspunkten Feingestaltabweichung, Grobgestaltabweichung und Werkstoffbeeinflussung bzw. Schnittflächengüte differenzierten Unregelmäßigkeiten bzw. Abweichungen von der vorgesehenen Schnittform und -lage ([39],[57],[58],[59]), beziehen sich jedoch vorrangig auf das thermische Schneiden von Metallen bei Materialdicken von 0,5 bis 40 mm. Diese Normierung ist zur Beurteilung des Laserfeinschneidens nur bedingt geeignet.

Für die Untersuchung der Schnittqualität von einkristallinem Silizium existieren unterschiedliche Verfahren [27]. Diese betrachten vorwiegend die Auswirkungen der Wärmeeinflusszone. Hierzu wurden verschiedene direkte und indirekte Nachweismöglichkeiten des Einflusses im Materialinneren z.B. von thermisch angeregten Kristallfehlern bzw. Störungen des regelmäßigen Kristall-Aufbaus (Punktdefekte, Liniendefekte, Flächendefekte), ([13],[19]), erarbeitet. In der vorliegenden Arbeit wurden vorwiegend die an der Materialoberfläche existierenden Veränderungen wie z.B. Oberflächentextur, Materialaufwurf, Materialaubtrieb und Ablagerungsform untersucht [2]. Dabei geben lichtmikroskopische Untersuchungen Aufschluss über Ablagerungsausdehnung und Beschaffenheit loser Partikel oder stark oxidierte Schmelzaufwürfe.

Über Rasterelektronenmikroskop–Aufnahmen (REM-Aufnahmen) wurden Untersuchungen zum topographischen Eindruck auf der Materialoberfläche bzw. dem oberflächlichen Materialaufwurf durchgeführt. Exakte Betrachtungen der Morphologie der entstandenen Schichten – mit Hilfe von EDX Analysen - ergaben Aussagen über die chemische Zusammensetzung von Ablagerungen.

Daraus ergeben sich folgende quantitativ messbare Kriterien der Schnittfugengeometrie zur Beurteilung der Schnittqualität [3]:

- die Schnittfugenbreite w (am Strahleintritt und am Strahlaustritt),
- der Flanken- oder Wandwinkel α (Maß für die Konizität / Schnittflächenparallelität) ,
- die Ausdehnung der Kernzone der Ablagerungen (Debris).

Die Auswertung erfolgte optisch. Zur Vermessung der erzeugten Schnittfugencharakteristiken kam ein Lichtmikroskop mit zwanzigfacher Vergrößerung zum Einsatz.

Mit Hilfe der gemessenen Schnittfugenbreiten am Strahleintritt und Strahlaustritt wurde der Flankenwinkel (Wandwinkel) wie folgt berechnet:

$$\alpha = \arctan \frac{(w_{SE} - w_{SA})}{2s} \quad (\text{Gl. Nr. 5.2}) [39]$$

dabei ist w_{SE} die mittlere Schnittfugenbreite am Strahleintritt, w_{SA} die mittlere Schnittfugenbreite am Strahlaustritt und s die Materialdicke.

Die Ablagerungen an den Schnittfugen wurden auf beiden Seiten der Schnittfuge gemessen.

Zusätzliche REM - Untersuchungen über die Ablagerungen an den Schnittfugen wurden bei den Experimenten zum Einfluss von Prozessgasen durchgeführt.

Diese geben Aufschluss über Wiederanlagerung (Redeposite) abgetragenen Materials, die Anhaftung von Oxidresten und das Auftreten von Spritzern.

Die Bearbeitungskriterien wie Schneidgeschwindigkeit und Schnittqualität werden durch mehrere Bearbeitungsparameter bestimmt ([2],[8],[10],[19],[26],[27]). Eine unabhängig voneinander durchgeführte Betrachtungsweise ist in der Regel nicht möglich.

Aufgrund dieser mehrdimensionalen Matrix wurde während der Experimente Wert auf die Variation eines einzelnen Parameters gelegt.

Die untersuchten Einflussparameter sind strukturiert nach Materialeigenschaften, Laserparameter und Prozess- bzw. Verfahrensparameter.

6. Einfluss von Werkstoffeigenschaften

6.1. Materialdicke

Siliziumwafer werden in verschiedenen Materialstärken hergestellt. Standard Siliziumwafer haben eine Stärke von 500 μm . Mit einem entwickelten Verfahren des Fraunhofer Institutes für Siliziumtechnologien können diese Standard Wafer auf eine Stärke von weniger als 100 μm ausgedünnt werden. Diese sind dünn wie Papier und biegsam wie eine Folie.

Die Untersuchungen zur Materialdicken wurden mit Wafern der Stärke von ca. 220 μm , 330 μm und 530 μm und einer Kristallorientierung $\langle 111 \rangle$ durchgeführt. Ziel der Untersuchungen war es, eine Beziehung zwischen den Materialdicken des Siliziumwafers und der Schneidgeschwindigkeit herzustellen.

Für die Schnittfugenbreiten w wird infolge der Strahlkaustik und der Rayleighlänge z_R (errechneter Wert $z_R = 180 \mu\text{m}$) eine breitere Schnittfuge am Strahlaustritt – verglichen mit Strahleintritt – erwartet (Fokusslage auf der Oberfläche des Wafers). Dies hat direkten Einfluss auf die Konizität und den Wandwinkel. Abbildung 6.1 zeigt grundsätzliche Abhängigkeiten von Laserstrahlparameter und Materialdicken [53].

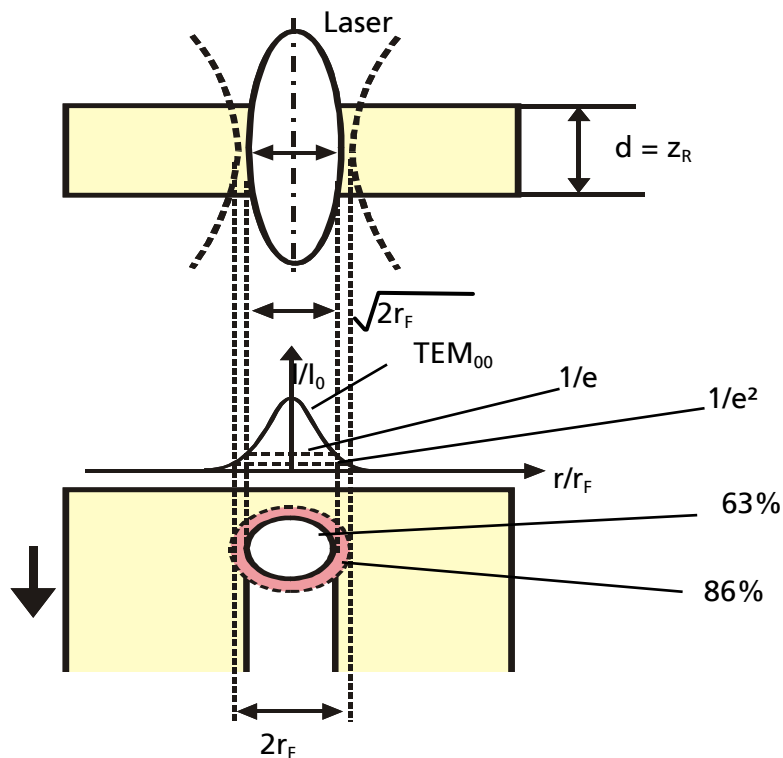


Abbildung 6.1: Charakteristische Größen eines fokussierten Laserstrahls [53]

Aufgrund der Strahlcharakteristik der verwendeten Laserstrahlung, wie Strahlkaustik und Rayleighlänge ist die Laserstrahlintensität eine wichtige Größe. Die örtliche Intensitätsverteilung des Gaußschen Laserstrahls (Abbildung 6.1) ist beschrieben mit:

$$\frac{I}{I_{\max}} = \exp\left(\frac{-2r^2}{w^2(z)}\right) \quad (\text{Gl. Nr. 6.1}) [45]$$

Die maximale Laserstrahlintensität I_0 im Fokus nimmt bei konstanten Laserparametern und Fokusslage, nach Gleichung 6.1 mit steigendem Strahlradius w mit $(I \sim \frac{1}{r^2})$ ab. Abbildung 6.2 zeigt die Isophoten des Gaußschen Strahls für unterschiedliche Intensitätsverhältnisse für den Power Gator UV.

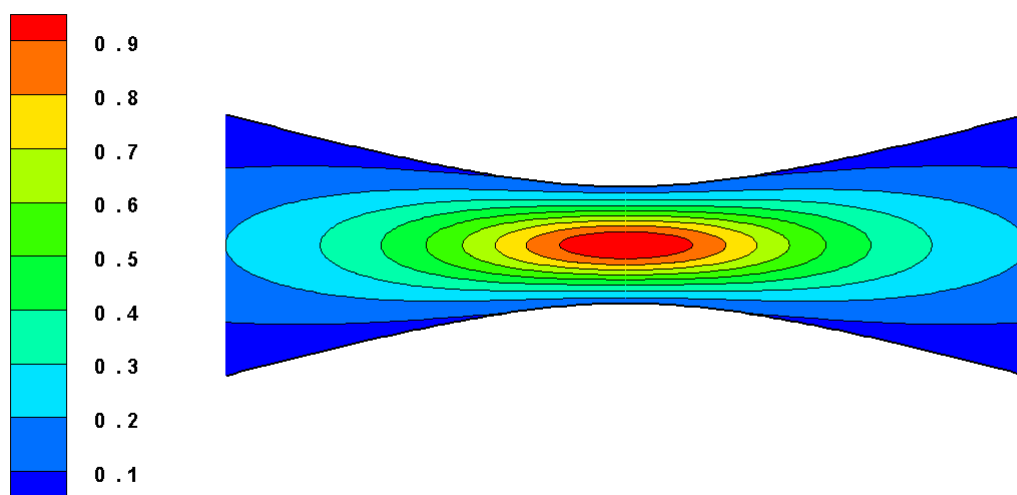


Abbildung 6.2: Isophoten eines Gaußschen Strahls für unterschiedliche Intensitätsverhältnisse für den Power Gator UV

Aufgrund der unterschiedlichen Intensitäten in Abhängigkeit des Strahlradius (Abbildung 6.2) ergibt sich ein Zusammenhang zwischen der Materialdicke und der Fokusslage. Beide Kenngrößen beeinflussen somit die Schnittfugegeometrie. Dies kann direkt beobachtet werden beim Laserstrahlschneiden von Metallen mit CO₂ Laserstrahlung. Die Ausbildung der Schnittfugegeometrie beim Schneiden von Silizium erfolgt erst durch Mehrfach – Ablation.

Daraus ergibt sich, dass die erforderlichen Prozesszeiten d.h. die Anzahl an erforderlichen Schneidzyklen (Anzahl notwendiger Überfahrten) mit zunehmender Materialdicke überproportional ansteigt ([14],[28]).

Die erforderliche Intensität I_0 um die Verdampfungstemperatur zu erreichen ergibt sich aus:

$$T(t) = A_{opt} I_0 \frac{r_0}{\lambda \sqrt{2\pi}} \arctan \frac{\delta \sqrt{2}}{r_{f0}} \quad (\text{Gl. Nr. 6.2}) [14]$$

Für $A_{opt} = 1$, $r_{f0} = 9,04 \mu\text{m}$, Verdampfungstemperatur von Silizium $T_V = 2628 \text{ K}$, Umgebungstemperatur $T_0 = 293 \text{ K}$ und dem verwendeten Laser Power Gator UV errechnet sich eine Intensität von

$$I_0 = 1,978677 \cdot 10^{11} \text{ Wm}^{-2}.$$

Aussagen zu Untersuchungen von Abtragsraten pro Puls und Wellenlänge werden in Kapitel 7.1. Wellenlängen behandelt.

Die gemessenen Rayleighlängen von $300 \mu\text{m}$ der verwendeten UV Laser sind kleiner als die Wafer mit $330 \mu\text{m}$ und $530 \mu\text{m}$ Dicke. Für die Experimente mit der Fokuslage auf der Substratoberfläche würden sich infolge der Rayleighlänge größere Schnittfugenbreiten am Strahlaustritt als am Eintritt ergeben. Dies kann ggf. durch ein Nachführen des Fokus in das Material minimiert werden.

Diese Voraussetzungen erlauben die Annahme einer Konizität der Schnittkante, welche durch die Messung des Wandwinkels – Verhältnis Strahleintritt zu Strahlaustritt – überprüft wurden [28].

Verwendet wurden <111>- Siliziumwafer. Konstante Verfahrensparameter sind: Laserparameter ($P = 3 \text{ W}$; $f_{\text{Rep}} = 10 \text{ kHz}$; zirkular polarisiert), Brennweite $f = 100 \text{ mm}$, Fokuslage: +/- 0 mm auf Werkstückoberseite, Scangeschwindigkeit $v_{\text{scan}} = 50 \text{ mm/s}$ und Atmosphäre Luft. Die Übersicht der Messwerte befindet sich im Anhang B1. Die verwendeten Siliziumwafer sind poliert.

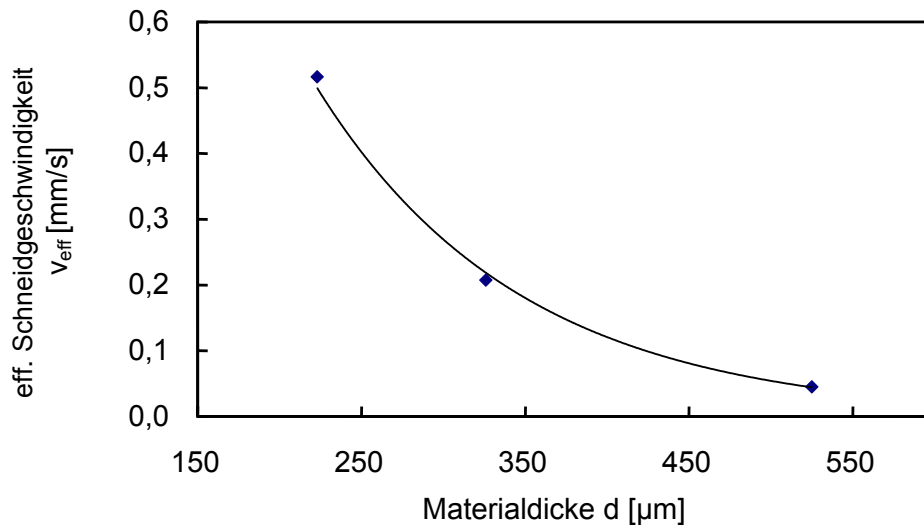


Abbildung 6.3: effektive Schneidgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Materialdicke

Die Experimente bestätigen, dass mit größerer Materialdicke die notwendige Anzahl von Überfahrten zum Trennen des Wafers steigt. Umgekehrt verhält sich die effektive Schneidgeschwindigkeit wie das Diagramm in Abbildung 6.3 zeigt.

Infolge der Intensitätsverteilung im Strahl (Abbildung 6.2) und Fokusslage auf der Materialoberfläche ist die Schnittfugenbreite am Strahleintritt kleiner als am Strahlaustritt (Abbildung 6.4).

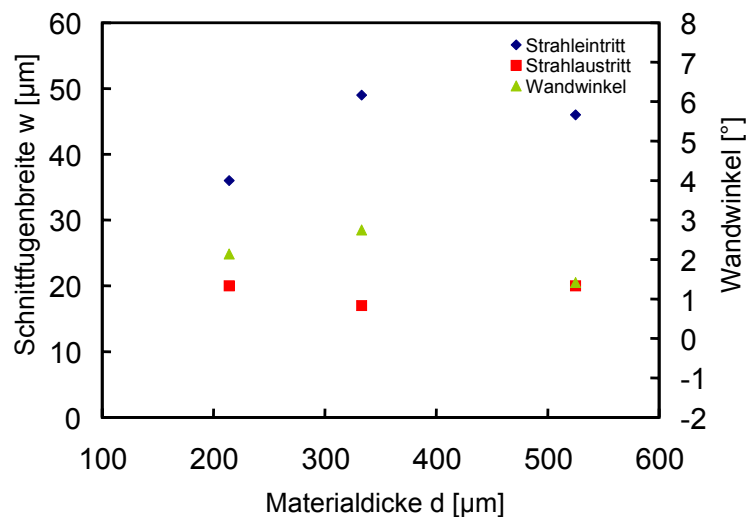


Abbildung 6.4: Schnittfugenbreiten und Wandwinkel in Abhängigkeit der Materialdicke

Die Unterschiede der Schnittfugenbreiten am Strahleintritt und Strahlaustritt sind auf Schwankungen der Strahlqualität und Laserleistung sowie zurückzuführen. Der Neigungswinkel der Schnittflanken liegt im Mittel bei ca. 2° (positiv konische

Schnittfuge). Mit zunehmender Materialdicke ist eine deutliche Vergrößerung der Debrisfläche ersichtlich, wobei die Ablagerungen auf der Strahlaustrittsseite tendenziell geringer sind als auf der Strahleintrittsseite (Abbildungen 6.5 und 6.6).

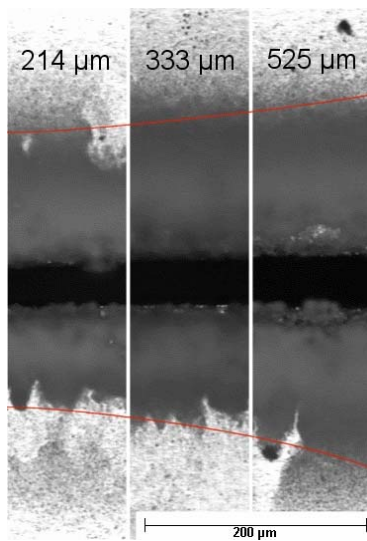


Abbildung 6.5: Schnittfuge mit Ablagerungen (Strahleintritt)

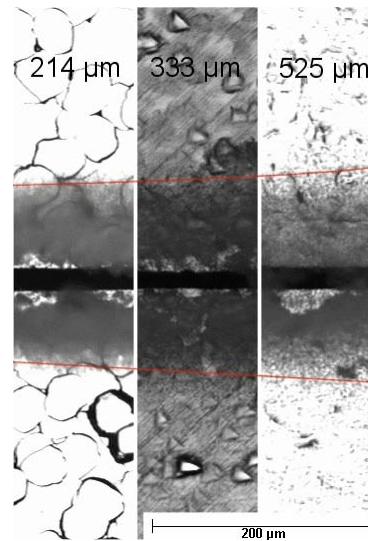


Abbildung 6.6: Schnittfuge mit Ablagerungen (Strahlaustritt)

Die Auswertung der Experimente ergab weiterhin eine Zunahme der Verluste durch Wärmeleitung mit steigenden Materialdicken. Durch eine effiziente Energieabführung in der Wechselwirkungszone im Material werden die Schnittkanten und Schnittflächen weniger stark geschmolzen. Dadurch entstehen schmalere Schnittfugen die zu einer Steigerung der Qualität der Schnittkanten führen können.

Zusammenfassung:

Die höchsten Schnittgeschwindigkeiten (ca. 0,52 mm/s) bei gleich bleibenden Schnittfugenbreiten und Wandwinkeln sind für kleine Materialdicken (ca. 220 µm) erreicht worden. Dabei entstanden geringe Ablagerungen.

Eine weitere Erhöhung der effektiven Scheidgeschwindigkeit – bei gleicher Qualität - sind höhere Intensitäten der Laserstrahlung notwendig.

6.2. Kristallorientierung

Weitere Experimente wurden durchgeführt um den Einfluss der Kristallorientierung auf das Bearbeitungsergebnis d.h. auf Schneidgeschwindigkeit und Schnittqualität zu untersuchen.

Aufgrund niedrigerer Bindungsdichten wird davon ausgegangen das beim Schneiden parallel und senkrecht zum Flat¹⁾ - entlang der weniger stark besetzten <100>- Ebenen - höhere Schneidgeschwindigkeiten und schmalere Schnittfugen erzielt werden. Die Sprödigkeit des Siliziums wird beim Schneiden quer zur vorgegebenen Kristallorientierung breitere Schnittfugen und unregelmäßige Schnittkanten geben. Zur Trennung der dichter besetzten Kristallebenen des <111>- Siliziumwafer wird mehr Energie aufgewendet werden müssen. Dies lässt geringere Schneidgeschwindigkeiten erwarten [21].

Als Basis für die Experimente wurde ein Rechteck mit 10 mm x 4 mm Kantenlänge gewählt. Die Seite mit der Kantenlänge von 10 mm ist der zu untersuchenden Kristallorientierung gleichgerichtet. Zur Anwendung sind hierbei Wafer mit Kristallorientierungen <100> und <111> und Materialdicken von ca. (210 +/- 10) µm gekommen.

Konstante Verfahrensparameter sind: Laserparameter ($P = 3 \text{ W}$; $f_{\text{Rep}} = 10 \text{ kHz}$; zirkular polarisiert), Brennweite $f = 100 \text{ mm}$, Fokusbildung: +/- 0 mm auf Werkstückoberseite, Scangeschwindigkeit $v_{\text{scan}} = 50 \text{ mm/s}$ und Atmosphäre Luft. Die Übersicht der Messwerte befindet sich im Anhang B 2.

Die gemessenen Größen sind über dem Drehwinkel (Winkel zwischen der Polarisation und Schneidrichtung bzw. Flat) des Wafers auf dem X-Y-Z -Handlingsystem unterhalb der Scannersystems aufgetragen. Für das Schneiden parallel zum Flat des <100>- Siliziumwafers wurde der Drehwinkel 0° definiert. Für die <111>- Siliziumwafer ist eine eindeutige Zuordnung wegen fehlender Markierung – Flat - nicht möglich.

¹⁾ Kennzeichnung der Lage des kubischen Gitters in der Siliziumscheibe durch Zuordnung einer Oberflächenorientierung

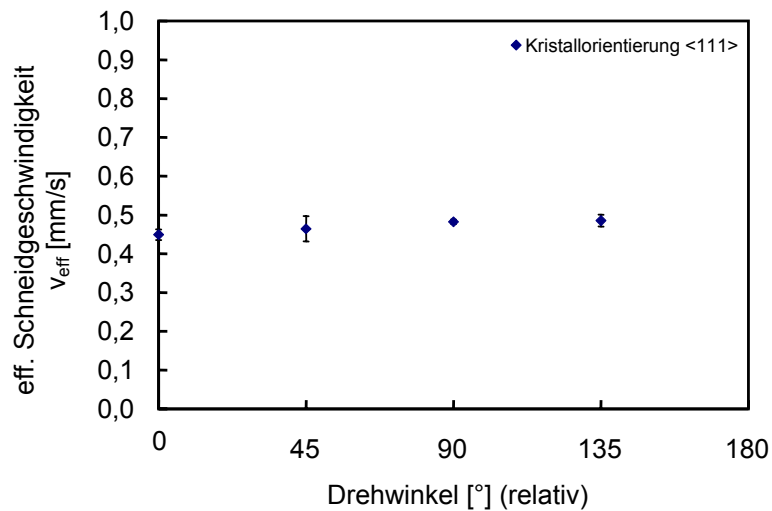


Abbildung 6.9: effektive Schneidgeschwindigkeit, gemessen bei einem <111>-Wafer

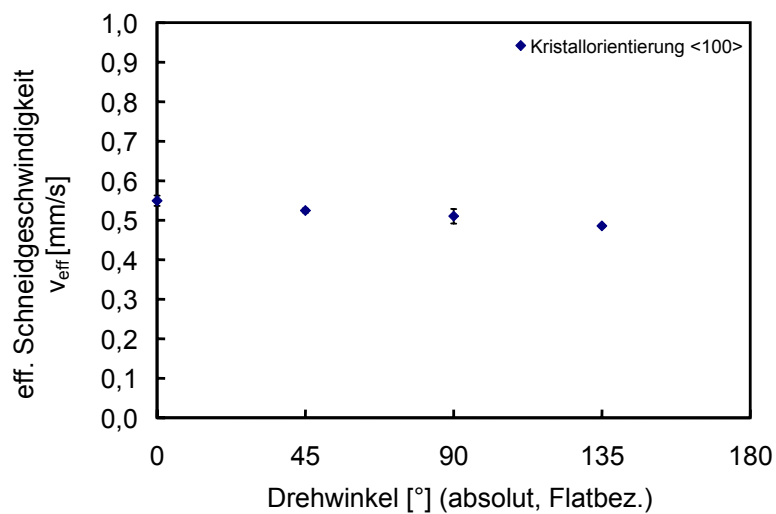


Abbildung 6.10: effektive Schneidgeschwindigkeit, gemessen bei einem <100>-Wafer

Wie Abbildung 6.9 zeigt, liegt die Schneidgeschwindigkeit beim <111>- Siliziumwafer wie erwartet um ca. 0,05 mm/s (= 9,6 %) niedriger als die beim Schneiden des <100>- Materials (Abbildung 6.10). Die Untersuchungen zur Variation von Schneidrichtung / Drehwinkel in Abhängigkeit von der Kristallorientierung ergaben Unterschiede in der effektiven Schneidgeschwindigkeit von maximal 0,04 mm/s für <111>- und 0,06 mm/s für <100>- Wafer.

Die ermittelten Wandwinkel für die $\langle 111 \rangle$ -Siliziumwafer betragen ca. 3° (positiv konisch) und für die $\langle 100 \rangle$ -Siliziumwafer ca. 2° (positiv konisch) (Abbildungen 6.11 und 6.12).

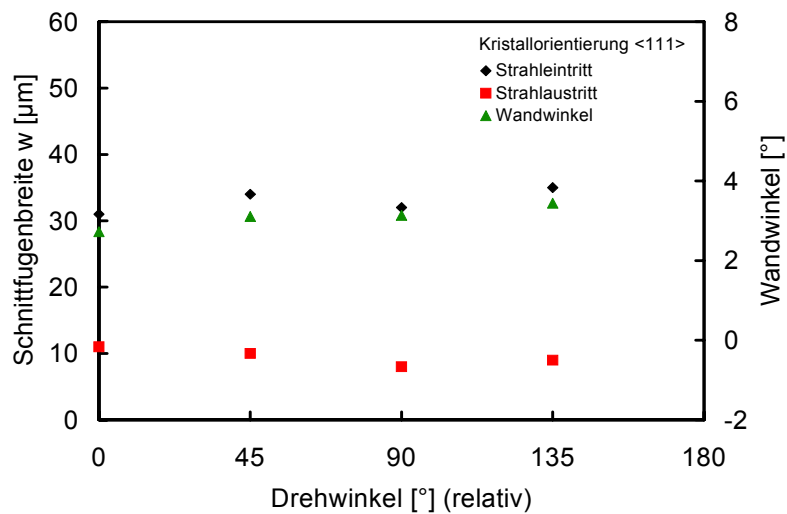


Abbildung 6.11: Schnitffugenbreiten und Wandwinkel beim $\langle 111 \rangle$ -Wafer in Abhängigkeit des Drehwinkels

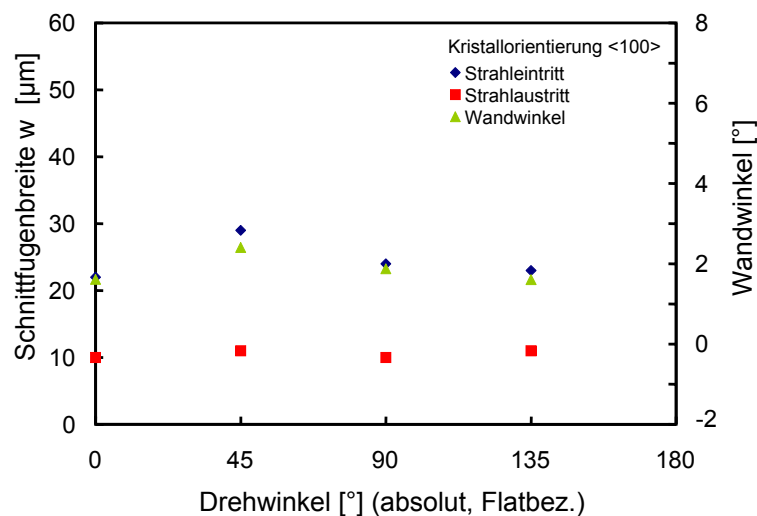


Abbildung 6.12: Schnitffugenbreiten und Wandwinkel beim $\langle 100 \rangle$ -Wafer in Abhängigkeit des Drehwinkels

Die Untersuchungen der Schnitffugenbreiten am Strahleintritt ergaben eine Kristallorientierungsabhängigkeit der Schnitffugeengeometrie und der Bearbeitungsqualität (Abbildungen 6.11 und 6.12). Abbildungen 6.13 zeigt, dass für $\langle 100 \rangle$ -Siliziumwafer die Schneidrichtung in Abhängigkeit des Drehwinkels unterschiedliche Schnitffugenbreiten am Strahleintritt erzielt werden.

Schmalste Schnittfugenbreiten für den $\langle 100 \rangle$ -Siliziumwafer sind durch das Schneiden parallel zum Flat (0°) in Richtung der Kristallorientierung ausführbar. Im Gegensatz hierzu wurden die breitesten Schnittfugen (Abbildung 6.14) von $29 \mu\text{m}$ durch das Schneiden diagonal zur Kristallorientierung (45°) erzielt.

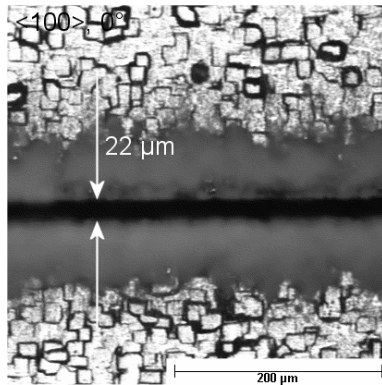


Abbildung 6.13:
Schnittfugenbreite am Strahleintritt für $\langle 100 \rangle$ -Silizium; Schneiden parallel zum Flat (0°)

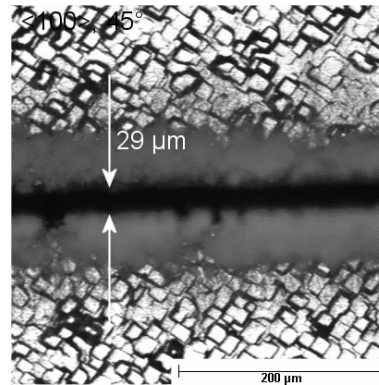


Abbildung 6.14:
Schnittfugenbreite am Strahleintritt für $\langle 100 \rangle$ -Silizium; Schneiden diagonal zum Flat (45°)

Am Strahleintritt wurde die schmalste Schnittfuge beim $\langle 111 \rangle$ -Siliziumwafer (Abbildung 6.16) mit $31 \mu\text{m}$ gemessen. Die breiteste Schnittfuge bei diesem Siliziumwafer (Abbildungen 6.18) beträgt $34 \mu\text{m}$. Im Vergleich hierzu die Messwerte des $\langle 100 \rangle$ -Siliziumwafers; schmalste Schnittfuge: $22 \mu\text{m}$ (Abbildungen 6.15), breiteste Schnittfuge $29 \mu\text{m}$ (Abbildung 6.17).

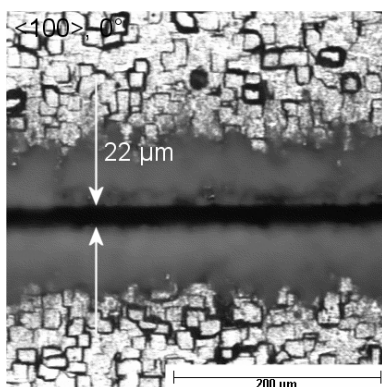


Abbildung 6.15:
schmalste Schnittfuge am Strahleintritt für $\langle 100 \rangle$ -Silizium (0°)

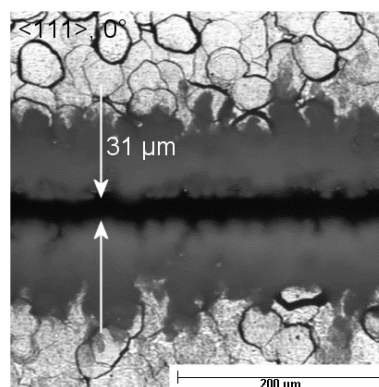


Abbildung 6.16:
schmalste Schnittfuge am Strahleintritt für $\langle 111 \rangle$ -Silizium (0°)

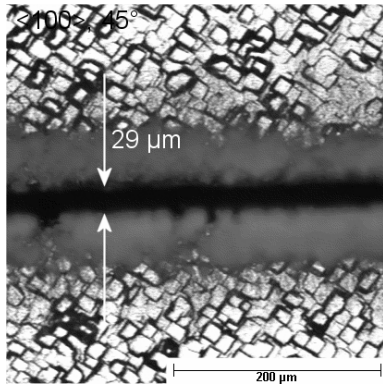


Abbildung 6.17:
Breiteste Schnittfuge am Strahleintritt
für <100>-Silizium (45°)

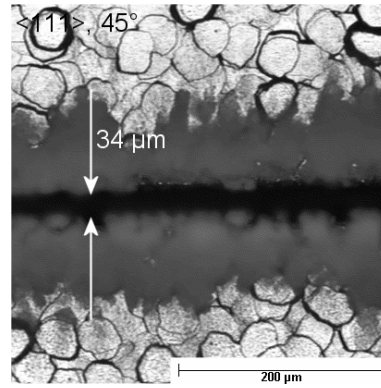


Abbildung 6.18:
breiteste Schnittfuge am Strahleintritt
für <111>-Silizium (45°)

Gravierende Kristallrichtungsabhängigkeiten der Schnittfuge am Strahlaustritt konnten nicht gemessen werden. Hier wurden Schnittfugen von ca. $10 \mu\text{m} \pm 2\mu\text{m}$ gemessen.

Die Ausbreitung des Debris durch oxidierte Schmelzablagerungen sind an den Schnittkanten bei <100>- und <111>- Siliziumwafern unterschiedlich stark ausgeprägt (Abbildungen 6.14 bis 6.17). Wegen des größeren Materialabtrages bei <111>- Siliziumwafern ist die Ausdehnung des Debris –verglichen mit <100>- Siliziumwafern - ca. 40 μm breiter.

Zusammenfassung:

Die höchsten effektiven Schneidgeschwindigkeiten und die schmalsten Schnittfugenbreiten am Strahleintritt, wurden beim Schneiden von <100>-orientiertem Silizium parallel (ca. 0,55 mm/s) und senkrecht (ca. 0,52 mm/s) zum Flat erzielt. Mit diesen Parametern konnte der Wandwinkel und der Debris klein gehalten werden.

7. Einfluss von Laserparametern

7.1. Wellenlänge

Die folgenden Betrachtungen zeigen, dass für das Schneiden von Silizium der Übergang der Laserwellenlänge von 532 nm zu der kürzeren Wellenlänge des verdreifachten Festkörperlasers mit 355 nm eine erhebliche Verbesserung der Schnittqualitäten bringt.

Der wellenlängenabhängige Absorptionskoeffizient $\alpha(\lambda)$ bestimmt die optische Eindringtiefe x_{opt} des Laserstrahles

$$x_{\text{opt}} = \frac{1}{\alpha(\lambda)} \quad (\text{Gl. Nr. 7.1}) [53]$$

in die bestrahlte Oberfläche. Ist dieser Absorptionskoeffizient bei geringen Eindringtiefen hoch kann nahezu der gesamte bestrahlte Bereich abgetragen werden. Es bleibt ein sehr schmaler Bereich mit geschmolzenem Material. Entsprechend verbreitert sich dieser Bereich bei großen Eindringtiefen durch kleine Absorptionskoeffizienten. Abbildung 7.1 zeigt den Absorptionskoeffizienten von Silizium in Abhängigkeit von der Wellenlänge.

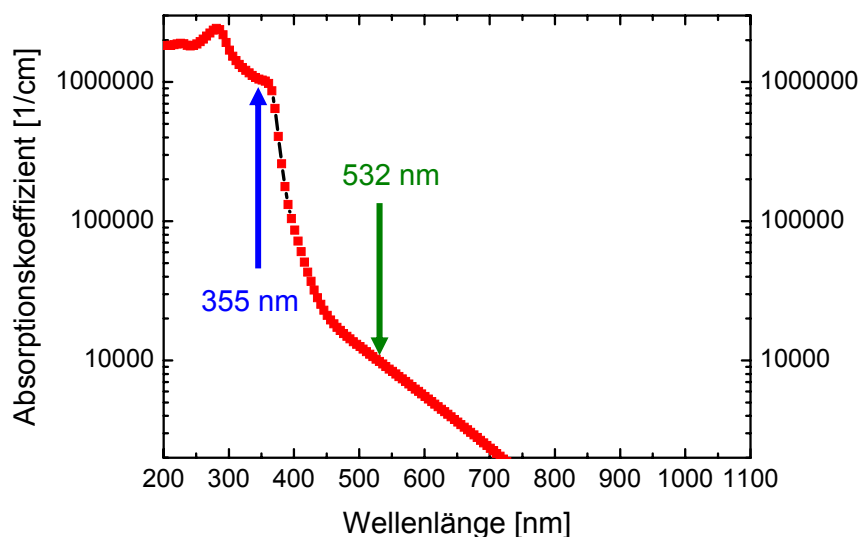


Abbildung 7.1: Absorptionskoeffizient von Silizium in Abhängigkeit der Wellenlänge [17]

Aus Gleichung 7.1 und Abbildung 7.1 ergeben sich für die Harmonischen des Nd:YAG-Lasers optische Eindringtiefen x_{opt} von

- $x_{\text{opt}}(1064 \text{ nm}) \approx 60 \text{ }\mu\text{m}$,
- $x_{\text{opt}}(532 \text{ nm}) \approx 1,0 \text{ }\mu\text{m}$,
- $x_{\text{opt}}(355 \text{ nm}) \approx 0,01 \text{ }\mu\text{m}$.

Bei Materialien mit hoher Temperaturleitfähigkeit wie Silizium ($a_{\text{Si}} = 48,8 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$), ist die optische Eindringtiefe wesentlich kleiner als die thermische Eindringtiefe x_{th} :

$$x_{\text{th}} = \sqrt{\frac{\lambda}{\rho \cdot c} \cdot \tau} \quad (\text{Gl. Nr. 7.2}) [55]$$

(λ -Wärmeleitfähigkeit, ρ -Dichte, c -spezifische Wärmekapazität, τ -Pulsdauer)

Eine Verkürzung der Pulsdauer τ ermöglicht eine Reduzierung der Wärmeeinflusszone. Ausgehend von den Materialeigenschaften von Silizium bei Raumtemperatur ergibt sich bei Pulsdauern von 15 ns nach Gleichung 7.2 eine thermische Eindringtiefe von $x_{\text{th}} \approx 11,7 \text{ }\mu\text{m}$. Verglichen mit der optischen Eindringtiefe hat die thermische Eindringtiefe bei der Bearbeitung von Silizium eine übergeordnete Rolle.

Die Schneidexperimente wurden mit einem frequenzverdoppelten Nd:YAG-Laser POWER GATOR 532 nm und einem frequenzverdreifachten Nd:YAG-Laser GATOR UV der Fa. Lambda Physik durchgeführt. Der Power Gator 532 nm ist mit einem Nachverstärker ausgerüstet und liefert bei einer Repetitionsrate 10 kHz eine Leistung von 13,5 W. Der GATOR UV, ohne Nachverstärker liefert bei 355 nm und der gleichen Repetitionsrate 3 W mittlere Leistung.

Im Strahlengang beider Laser befindet sich je ein Teleskop zur Strahlaufweitung (1:5 für 355 nm UV und 1:10 für 532 nm). Zur Strahlableitung wurden Scannereinheiten mit einer Brennweite von 100 mm verwendet. Auf der Waferoberfläche wurden nach den optischen Bauelementen für den UV Laser 2,2 W und für den Power Gator 532 11 W gemessen. Die Versuche wurden mit Wafern der Dicke 550 μm durchgeführt.

Die Abbildungen 7.3 bis 7.5 zeigen die Verläufe der Tiefe von Abtragsgräben in Abhängigkeit von der Zahl der Überfahrten für zwei verschiedenen Schnittgeschwindigkeiten mit GATOR UV und POWER GATOR 532 nm.

Bei allen Untersuchungen zeigte sich, dass die Abtragsrate mit zunehmender Ausbildung der Schnittfuge sinkt. Ursache hierfür ist, eine Strahlabschwächung des Lasers durch verstärkte Reflexionen des Laserstrahls an den Fugenwänden des Materials und des Plasmas in der Schnittfuge. Dies wird durch Untersuchungen von Lambda Physik beim Bohren von Metall bestätigt (Abbildung 7.2) [56]. Bei größeren Materialdicken kann dies zu einem „Versacken“ des Strahls im Material führen. Die Versuchsergebnisse sind in Anhang B.4 zusammengestellt.

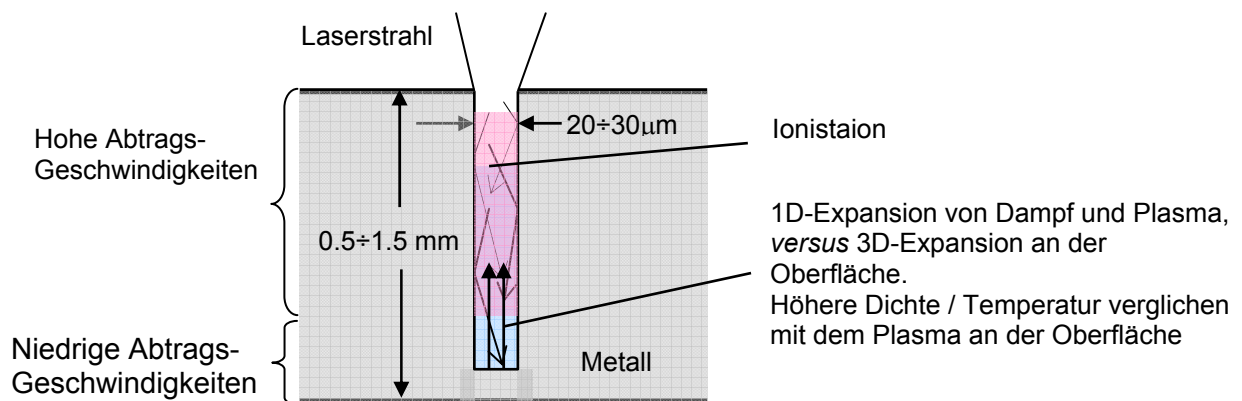


Abbildung 7.2: Bohrprozess mit Kurzpuls-Laser [56]

Eine 20fach größere Scangeschwindigkeit bewirkte eine Reduzierung des Abtrags pro Schneidzyklus um den Faktor 16 (Abbildung 7.3 und 7.5). Hierbei beträgt die durchschnittliche Abtragsrate pro Überfahrt mit 5 mm/s 8,3 µm und mit 100 mm/s 0,5 µm.

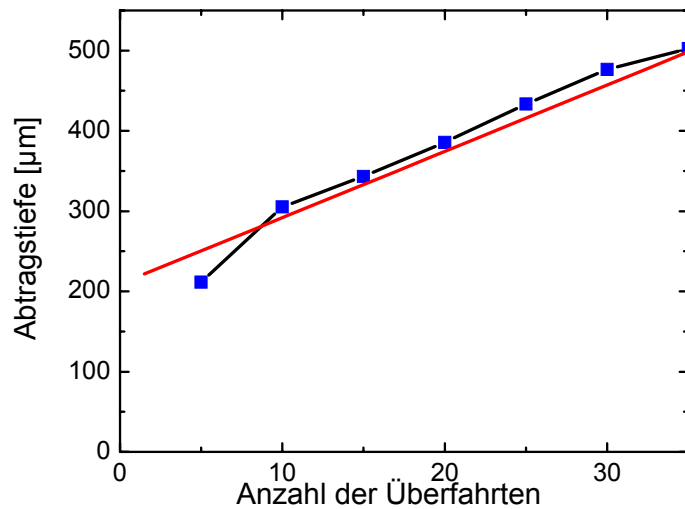


Abbildung 7.3: Abtragstiefe als Funktion der Anzahl der Überfahrten Gator UV
(Scangeschwindigkeit 5 mm/s) [17]

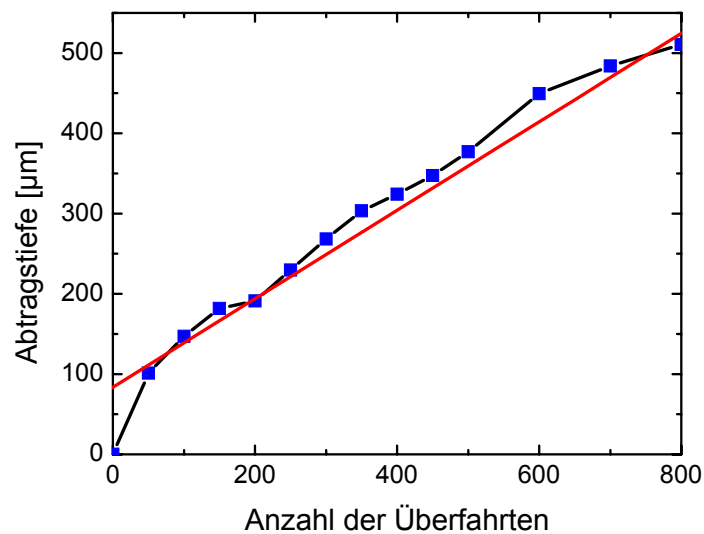


Abbildung 7.4: Abtragstiefe als Funktion der Anzahl der Überfahrten Gator UV
(Scangeschwindigkeit 100 mm/s) [17]

Der Vergleich der Abtragsraten pro Puls zeigt – 355 nm/ 0.12µm und 532 nm/ 0,05 µm – wesentlich höherer Raten mit dem UV Laser. Dies liegt begründet in der höheren Absorption bei 355 nm (Abbildung 7.1). Aufgrund der höheren Laserleistung des Power Gator 532 nm betragen beide Abtragsraten pro Überfahrt 0,5 µm.

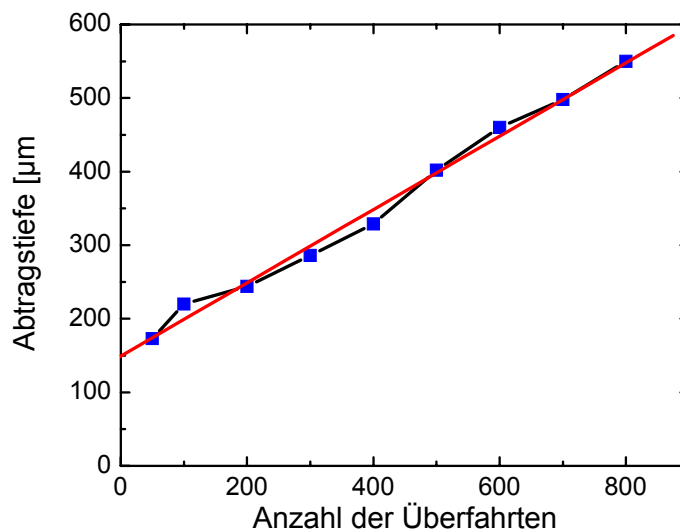


Abbildung 7.5: Abtragstiefe als Funktion der Anzahl der Überfahrten Power Gator 532 nm (Scangeschwindigkeit 100 mm/s) [17]

Abbildung 7.6 und 7.7 zeigen die Schnittqualitäten eines Kreuzes in einen Wafer der Dicke 550 µm und 230 µm, geschnitten mit dem Gator UV. Bedingt durch den geringeren Wärmeeintrag pro Volumen beim Schneiden dünneren Materials können Wandqualitäten mit wesentlich geringerer Schmelzbildung erreicht werden (Abbildung 7.7). Ein ausgedehnter Schmelzbereich entsteht beim Schneiden mit dem Power Gator Grün (532 nm).

Die erreichten Schnittbreiten bei Fokussierung des Laserstrahles auf die Oberfläche liegen bei ca. 40 µm für den GATOR UV und ca. 100 µm für den POWER GATOR 532 nm. Der beim POWER GATOR UV gemessene Fokusradius ist 11,45 µm und der des Power GATOR 532 nm 18 µm. Kürzere Wellenlängen bieten den Vorteil einer besseren Fokussierbarkeit. Der Strahlradius berechnet sich nach [14]:

$$r_f = \frac{2\lambda f}{\pi D} \quad (\text{Gl.Nr. 7.4}) [14]$$

(D = Durchmesser des Strahls auf der Fokussieroptik)

Gleichung 7.4 zeigt, dass ein kleinerer Fokusradius durch kürzere Wellenlängen, Verringerung der Brennweite oder Aufweitung des zu fokussierenden Laserstrahls zu erzielen sind. Ein kleinerer Fokusradius infolge kürzerer Wellenlängen erlaubt ein Einkoppeln von höheren Leistungsdichten in kleinere Volumina, was schmalere Schnittfugen ermöglicht.

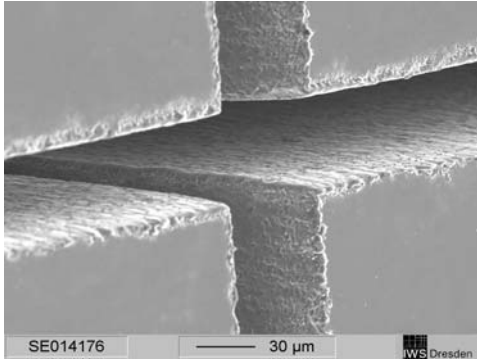


Abbildung 7.6: Lasereintrittseite des 230 µm dicken Wafer

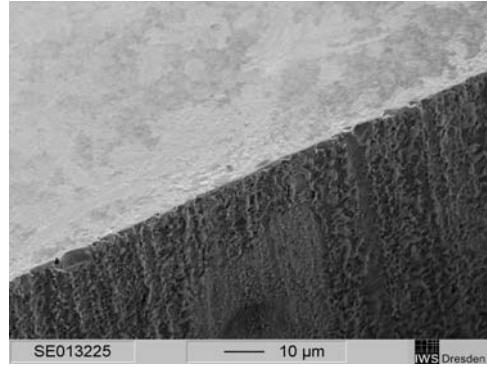


Abbildung 7.7: Lasereintrittseite des 550 µm dicken Wafer

Zusammenfassung

Die Ergebnisse zeigen, dass frequenzvervielfachte Festkörperlaser zur Bearbeitung von Silizium geeignet sind. Die mit vergleichbarem optischen Aufwand erreichbaren Strukturgenauigkeiten und Abtragsraten mit der Wellenlänge von 355 nm sind der Wellenlänge 532 nm vorzuziehen.

7.2. Polarisation

Erfahrungen aus dem Bereich des Schneidens von Stahlblech mit CO₂- Laser zeigen, daß die Strahlungspolarisation (Abbildung 7.8) zu richtungsabhängigen Ergebnissen führt. Die maximale Schneidgeschwindigkeit besitzt eine eindeutige Abhängigkeit der Schneidrichtung zur Polarisation des Laserstrahls [3]. Ziel dieser Untersuchungen ist es Zusammenhänge zwischen der Polarisationsrichtung des Laserstrahls und der Schnittfugenbreite zu finden.

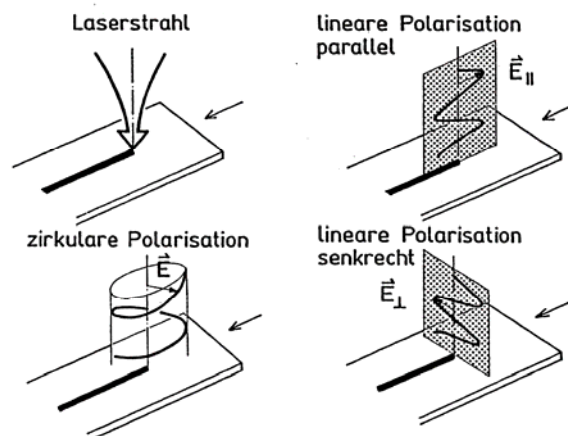


Abbildung 7.8: Orientierung der Polarisationsrichtung zur Schneidrichtung [27]

Ursachen für diesen Zusammenhang ist die Abhängigkeiten des Reflexionsgrades und Absorptionsgrades vom Einstrahlwinkel und der Polarisationsrichtung des Laserstrahls (Abbildung 7.9) [53]. Abbildung 7.9 zeigt dies für die Anwendung von CO₂ Lasern an Stahl. Die Polarisationsabhängigkeit der Strahlungsabsorption führt zu einem Ansteigen des Absorptionsgrades unter wachsendem Einstrahlwinkel.

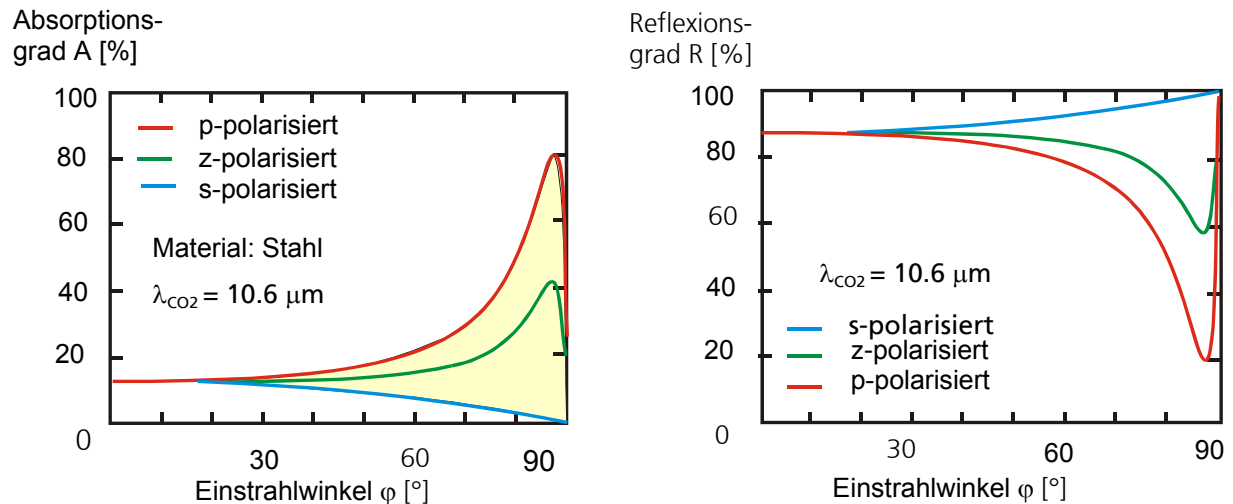


Abbildung 7.9: Abhängigkeiten der Polarisation und Einstrahlwinkel auf Reflexion und Absorption [53]

Bei zunehmenden Materialdicken, sowie durch Ausbildung der Schnittfuge des Laserstrahlschneidens, liegt die Schneidfront nicht immer senkrecht zur Werkstückoberfläche. Aus dem unterschiedlichen Absorptionsvermögen in Abhängigkeit von paralleler bzw. senkrechter Polarisationsrichtung ergeben sich unterschiedliche Schneidgeschwindigkeiten und Schnittfugenbreiten ([3],[10],[14],[28],[39]).

Für die Untersuchungen an Siliziumwafern wurden Rechtecke von 4 mm x 10 mm Kantenlänge ausgeschnitten. Die Untersuchungen zum Polarisations Einfluss wurden entlang der Kantenlänge von 10 mm durchgeführt. Diese gibt die Schneidrichtung im Verhältnis zu einem bestimmten Winkel der Polarisationsrichtung an. Die Abhängigkeit der Kristallorientierung ist durch das synchrone Drehen des Siliziumwafer in Scanrichtung vermieden worden.

Verwendet wurden <111>- Siliziumwafer mit einer Materialdicke von (210 +/- 10) µm. Konstante Verfahrensparameter sind: Laserparameter (P = 3 W; f_{Rep} = 10 kHz), Brennweite f = 100 mm, Fokusslage: +/- 0 mm auf Werkstückoberseite, Scangeschwindigkeit (v_{scan} = 50 mm/s) und Atmosphäre Luft.

Die Änderung der Polarisationsrichtung wurde durch eine Lambda-Viertel-Platte im Strahlengang realisiert (mit λ/4 Platte zirkulare Polarisation, ohne λ/4 Platte lineare Polarisation). Die Versuchsergebnisse sind in Anhang B.5 zusammengestellt. Abbildung 7.10 zeigt die erzielten effektiven Schneidgeschwindigkeiten über dem Strahlablenkwinkel. Der Strahlablenkwinkel ist der Winkel zwischen der Kristallorientierung (Orientierung rel. zum Flat) und der Vorschubrichtung beziehungsweise Scanrichtung.

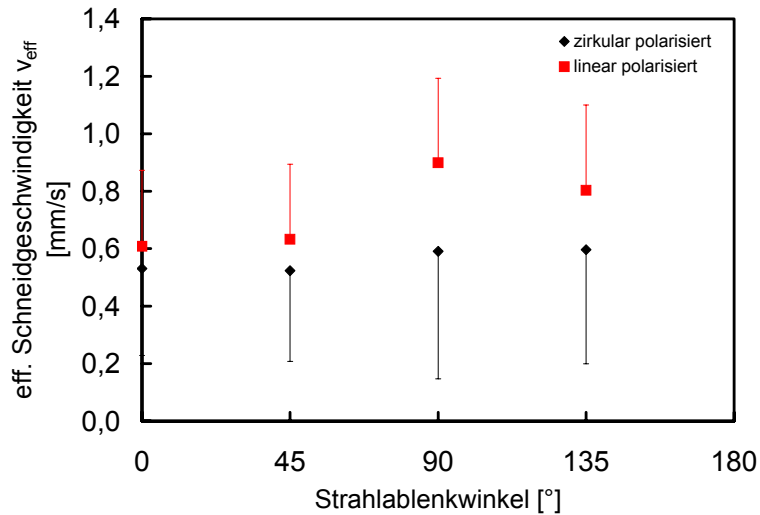


Abbildung 7.10: effektive Schneidgeschwindigkeiten für zirkular und linear polarisierte Laserstrahlung in Abhängigkeit vom Strahlablenwinkel [39]

Die Auswertung der Ergebnisse (Abbildung 7.10) zeigen, dass für linear und zirkular polarisierte Laserstrahlung und einem Strahlablenwinkel von 90° bzw. 135° Schneidgeschwindigkeit von 0,60 mm/s und 0,90 mm/s erzielt wurden.

Die Experimente zeigen, dass mit zirkular polarisierter Strahlung die maximal erreichbaren Schneidgeschwindigkeiten durchschnittlich ca. 0,18 mm/s (ca. 24 %) niedriger liegen als mit linear polarisierter Strahlung.

Der Vergleich der Abhängigkeiten von Strahlablenwinkel und Polarisation weist einen stärkeren Bezug beim Schneiden mit linear polarisierter Strahlung ($\Delta v_{\text{eff.}} = 0,29 \text{ mm/s}$) auf, als mit zirkular polarisierter Strahlung ($\Delta v_{\text{eff.}} = 0,08 \text{ mm/s}$).

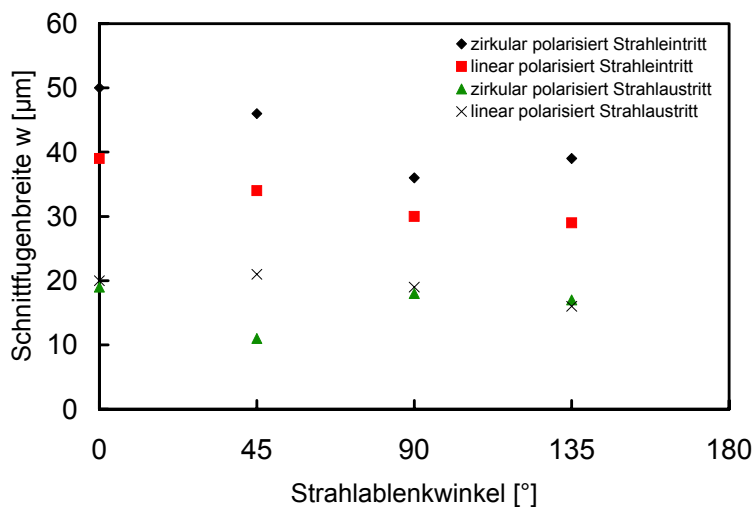


Abbildung 7.11: Schnittfugenbreiten für zirkular und linear polarisierte Laserstrahlung in Abhängigkeit des Strahlablenwinkels

Die Abbildung 7.10 und 7.11 zeigen die Abhängigkeit von Schnittfugenbreite und effektiver Schneidgeschwindigkeit vom Strahlablenkwinkel. Mit zunehmender Schneidgeschwindigkeit sind schmalere Schnittfugen erzielbar. Abbildung 7.12 zeigt eine Schnittfuge mit linear polarisierter Laserstrahlung. Messungen ergeben eine Schnittfugenbreite am Strahleintritt von $39\ \mu\text{m}$. Der Vergleich der Schnittfugenbreite zirkular polarisierter Laserstrahlung und linear polarisierter Strahlung ergibt eine um ca. $10\ \mu\text{m}$ breitere Schnittfuge mit zirkular polarisierter Laserstrahlung (Abbildung 7.12 und 7.13). Die Ausbreitung des Debris ist bei linear polarisierter Laserstrahlung geringer.

Die Versuche zeigen weiterhin Abhängigkeiten von Strahlablenkwinkel und Schnittfugenbreite (Vergleich von Abbildung 7.12 mit Abbildung 7.14 sowie Abbildung 7.13 mit Abbildung 7.15). Für beide Polarisationsrichtungen ergeben sich beim Schneiden in vertikaler Richtung (Strahlablenkwinkel: 90°) kleinere Schnittfugenbreiten als beim Schneiden in horizontaler Richtung (Strahlablenkwinkel 0°). Die Bearbeitung mit linear polarisiertem Strahl ergab Unterschiede in der Schnittfugenbreite von $\Delta w = 9\ \mu\text{m}$.

Bei der Bearbeitung mit zirkular polarisiertem Strahl wurden Unterschiede von $\Delta w = 14\ \mu\text{m}$ festgestellt.

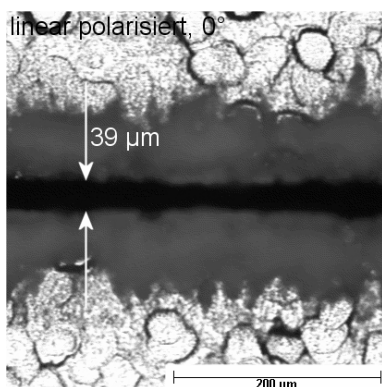


Abbildung 7.12: Schnittfugenbreiten (Strahleintritt) bei horizontaler Strahlablenkung (Strahlablenkwinkel 0°) für linear polarisierte Laserstrahlung

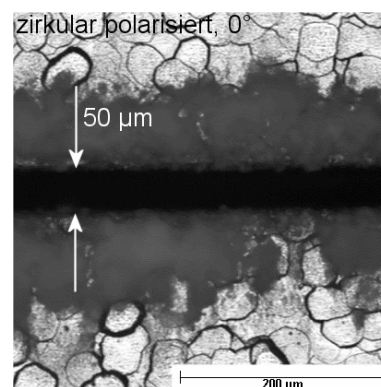


Abbildung 7.13: Schnittfugenbreiten (Strahleintritt) bei horizontaler Strahlablenkung (Strahlablenkwinkel 0°) für zirkular polarisierte Laserstrahlung

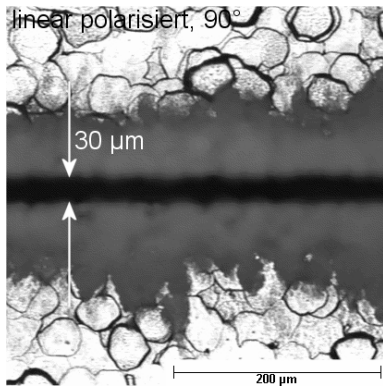


Abbildung 7.14: Schnittfugenbreiten (Strahleintritt) bei vertikaler Strahlableitung (Strahlableitungswinkel: 90°) für linear polarisierte Laserstrahlung

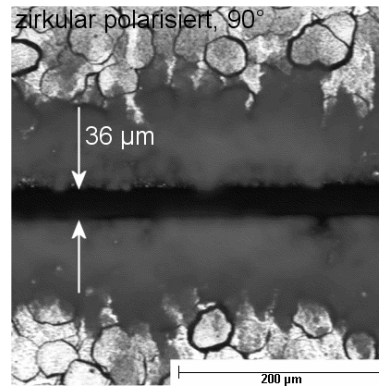


Abbildung 7.15: Schnittfugenbreiten (Strahleintritt) bei vertikaler Strahlableitung (Strahlableitungswinkel: 90°) für zirkular polarisierte Laserstrahlung

Die Schnittfugenbreiten am Strahlaustritt sind sowohl bei linearpolarisierter als auch bei zirkularpolarisierter Strahlung unabhängig vom Strahlableitungswinkel im Rahmen der Messtoleranzen als konstant zu betrachten.

Die Messungen der Ausdehnung des Debris ergaben einen direkten Zusammenhang von der Schnittfugenbreite und damit von dem auszutreibenden Material. Die gemessenen Ausdehnungen des Debris am Strahleintritt betrug bei allen Messungen $280 \pm 50 \mu\text{m}$.

Der Wandwinkel beim Schneiden mit linear polarisiertem Laserstrahl beträgt ca. $1,8^\circ$ (Abbildung 7.16). Der Wandwinkel bei der Bearbeitung mit zirkular polarisierter Strahlung variiert stärker in Abhängigkeit von der Strahlableitung und beträgt im Durchschnitt $3,5^\circ$.

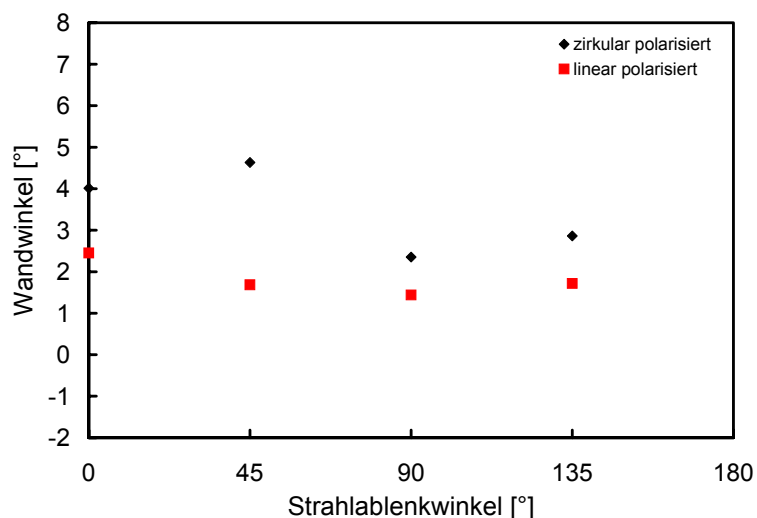


Abbildung 7.16: Wandwinkel für zirkular und linear polarisierte Laserstrahlung

Diese zum Teil stärkere Abhängigkeit der Schnittqualität von der Schneidrichtung bei zirkular polarisiertem Laserstrahl ist auf eine nicht exakte linear polarisierte Laserstrahlung am Ausgang der Laserquelle zurück zu führen. Der Laserquellenhersteller Lambda Physik spezifiziert ein Verhältnis der lineare Polarisationsrichtung innerhalb der Lichtwelle von 25:1 an. Damit schwingen 1/25 der Lichtwelle nicht in der angegebenen Polarisationsrichtung.

Zusammenfassung:

Maximale Prozessgeschwindigkeiten, schmalste Schnittfugenbreiten am Strahleintritt und kleinste Wandwinkel beim Schneiden werden mit linear polarisierter Laserstrahlung, d.h. ohne Lambda-Viertel-Platte, und einer Strahlableitrichtung von 90° (vertikale Schneidrichtung) erzielt. Die Abbildungen 7.12 bis 7.15 belegen die These, dass die Vorzugsrichtung (Polarisationsrichtung) bei dem Laserstrahlschneiden mit einem Strahlableitwinkel von 90° parallel zur Schneidrichtung liegt.

7.3. Leistung

Beim Sublimationsschneiden wird der Werkstoff in der Schnittfuge verdampft. Voraussetzung sind dabei sehr hohe Leistungsdichten ($> 10^8 \text{ W/cm}^2$ für Metalle). Mit geringen Leistungsdichten und großen Bestrahlungszeiten wird durch Wärmeleitung ein großes Materialvolumen erwärmt. Bei hohen Leistungsdichten und kurze Bestrahlungszeiten wird das Material nur am Ort des auftreffenden Laserstrahls erhitzt und die Verluste durch Wärmeleitung reduziert. Diese werden im allgemeinen durch Kurzpulslaser (ns- Laser) oder Ultrakurzpulslaser (fs- Laser) erzeugt. Aus den Erfahrungen beim Laserstrahlschneiden von Stahl mit CO₂-Lasern ist bekannt, dass die Laserleistung auf die Schneidgeschwindigkeit und die Schnittspaltbreiten Einfluss hat. Übertragen auf das Sublimationsschneiden mit Kurzpulslaser ergibt sich eine Abhängigkeit der Schneidgeschwindigkeit und damit der Abtragsrate von der mittleren Laserleistung (Pulsenergie). Mit höheren Laserleistungen sind größere Schneidgeschwindigkeiten zu erzielen. Diese sind verbunden mit breiteren Schnittfugen und Zunahme des Debris ([3],[8],[10],[11],[14],[28]).

Verwendet wurden <111> Siliziumwafer mit einer Materialdicke von (210 +/- 10) µm. Es wurde mit zwei Festkörperlaser unterschiedlicher Leistung (3 W, 10 W) geschnitten. Konstante Verfahrensparameter sind: Laserparameter ($f_{\text{Rep}} = 10 \text{ kHz}$; zirkular polarisiert), Brennweite $f = 100 \text{ mm}$, Fokuslage: +/- 0 mm auf Werkstückoberseite und

Scangeschwindigkeit ($v_{\text{scan}} = 50 \text{ mm/s}$) und Atmosphäre Luft. Die Versuchsergebnisse sind in Anhang B.6 zusammengestellt.

Die pro Puls übertragene Energiemenge pro Flächeneinheit (Fluenz) beträgt – Herstellerangaben – für das 3 Watt System 383 J/cm^2 und für das 10 Watt System 1273 J/cm^2 im Fokus (Fokusbereich $12 \mu\text{m}$).

Die Experimente ergaben Schneidgeschwindigkeiten von ca. 1 mm/s mit 10 W Laserleistung und ca. $0,5 \text{ mm/s}$ mit 3 W Laserleistung. Mit etwa dreifacher Laserausgangsleistung ist eine Verdopplung Schneidgeschwindigkeit möglich. Die Schnittfugenbreiten am Strahleintritt sind mit $72 \mu\text{m}$ das 1,5-fache und am Strahlaustritt mit $61 \mu\text{m}$ das 2,3-fache bei Einsatz des 10 W Laser größer als bei Leistungen von 3 W (Abbildungen 7.17 bis 7.22). Die Ausdehnung des Debris am Strahleintritt und Strahlaustritt verdoppelt sich (Abbildungen 7.21 und 7.22).

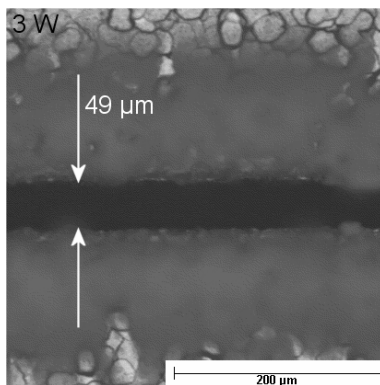


Abbildung 7.17:
Schnittfugenbreiten (Strahleintritt)
für 3 W Laserleistung

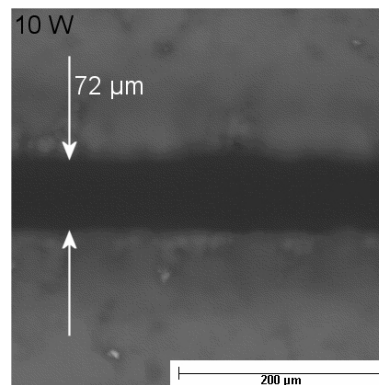


Abbildung 7.18:
Schnittfugenbreiten (Strahleintritt)
für 10 W Laserleistung

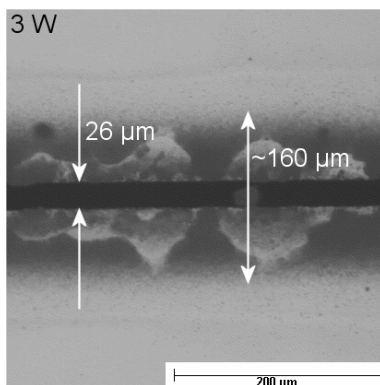


Abbildung 7.19:
Schnittfugenbreiten und Ablagerungen
(Strahlaustritt) für 3 W Laserleistung

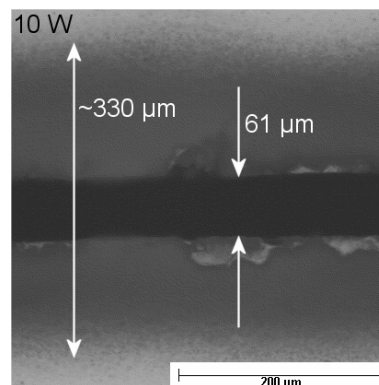


Abbildung 7.20:
Schnittfugenbreiten und Ablagerungen
(Strahlaustritt) für 10 W Laserleistung

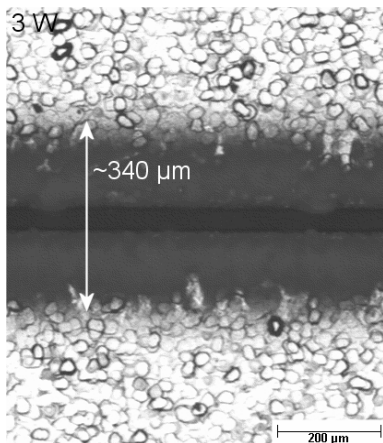


Abbildung 7.21:
Ablagerungen (Strahleintritt) für
3 W Laserleistung

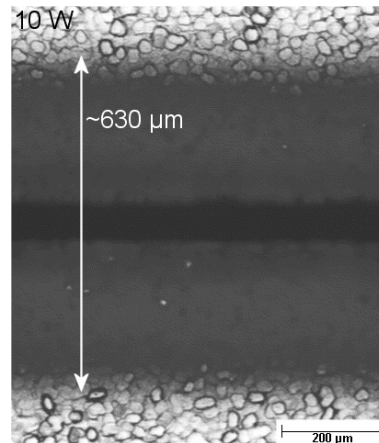


Abbildung 7.22:
Ablagerungen (Strahleintritt) für
für 10 W Laserleistung

Beide Schnittfugen sind positiv konisch. Der Wandwinkel bei Nutzung des 10 W Systems beträgt $1,5^\circ$ und für das 3 W System $3,1^\circ$.

Die Steigerung der Schneidgeschwindigkeit konnte durch eine höhere Laserstrahlintensität bzw. Pulsenergie erzielt werden. Diese basiert auf eine dem Werkstück zugeführte größere Streckenenergie ϵ_{Str} (Gleichung 7.4) die den Prozess des Schmelzens des Materials verkürzt.

$$\epsilon_{Str.} = \frac{P_W}{vS}; \quad (\text{Gl. Nr. 7.4}) [39]$$

(P_W : mittlere Leistung auf dem Werkstück, v : Schneidgeschwindigkeit (entspricht v_{eff}),
s: Materialdicke)

Mit der Nutzung eines leistungsstärkeren Lasersystems und der daraus folgenden höheren Laserstrahlintensität, ergibt sich ein stärkeres Aufheizen der Randbereiche der Wechselwirkungszone im Wafer. Dies führt zu einem größeren Schmelzvolumen pro Laserpuls an der Schneidfront und einem stärkeren Materialaustrieb. Infolge zunehmenden Dampfdrucks in der Schnittfuge werden aus der schmelzflüssigen Phase Silizium aus der Schnittfuge gerissen.

Zusammenfassung

Die Untersuchungen ergaben ähnliche Zusammenhänge bei der Bearbeitung von Silizium wie bei der Bearbeitung von Stahl. Maximale Schneidgeschwindigkeiten von ca. 1 mm/s und geringe Wandwinkel werden mit höheren Leistungen (10 W) erzielt. Negativ wirkt sich dies auf die Schnittfugenbreiten am Strahleintritt und am Strahlaustritt und der entsprechenden größeren Debris aus.

7.4. Pulswiederholffrequenz

Das Schneiden mit gepulsten Laserstrahlquellen erfolgt durch einen Materialabtrag mit einzelnen Laserpulsen. In Abhängigkeit von der Vorschubgeschwindigkeit des Werkstücks relativ zum Strahl werden die Laserpulse mehr oder weniger überlagert.

Die maximale effektive Schneidgeschwindigkeit für Silizium wurde mit der höchsten Pulswiederholffrequenz von 15 kHz erzielt. Systembedingt ergibt sich aus der Erhöhung der Pulswiederholffrequenz bei konstantem Laserstrahldurchmesser eine Reduzierung der Pulsenergie. Daraus folgt eine Minimierung der maximal erreichbaren Schneidgeschwindigkeit ([8],[28],[39]).

Aufgrund dieser Abhängigkeit wurde der Versuchsaufbau wie folgt variiert: Dem 10 W-Lasersystem wurde ein Attenuator (Strahlabschwächer) nachgeschaltet. Damit wurden die Änderungen der Laserausgangsleistung infolge Variation der Pulswiederholffrequenz auf konstant 3 W eingestellt (Abbildung 7.23).

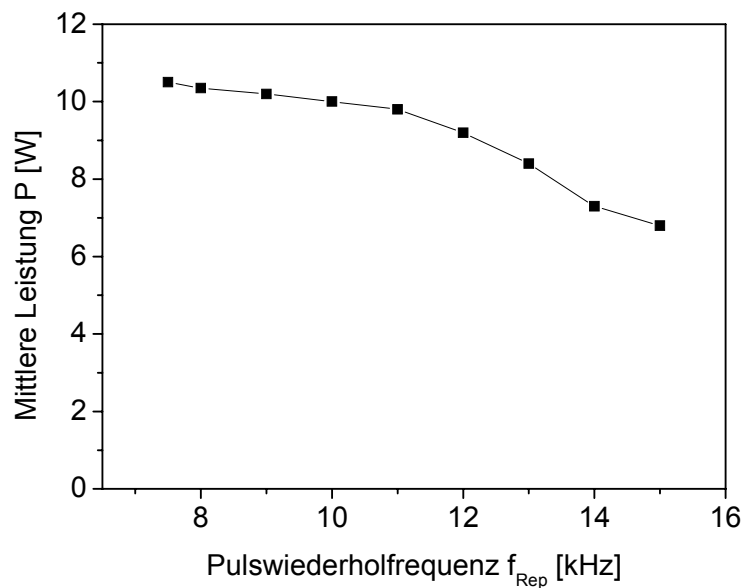


Abbildung 7.23: Gemessene Abhängigkeit der Leistung von der Pulswiederholfrequenz

Verwendet wurden $\langle 111 \rangle$ Siliziumwafer mit einer Materialdicke von $(210 \pm 10) \mu\text{m}$. Konstante Verfahrensparameter sind: Laserparameter ($P = 3 \text{ W}$; zirkular polarisiert), Brennweite $f = 100 \text{ mm}$, Fokusslage: $\pm 0 \text{ mm}$ auf Werkstückoberseite, Scangeschwindigkeit $v_{\text{scan}} = 50 \text{ mm/s}$ und Atmosphäre Luft. Die Repetitionsrate wurde zwischen 8 und 15 kHz in 1 kHz-Schritten variiert. Die Versuchsergebnisse sind in Anhang B.7 zusammengestellt.

Abbildung 7.24 zeigt einen linearen Zusammenhang zwischen der effektiven Schneidgeschwindigkeit und der Pulswiederholfrequenz. Dies zeigt, dass die Abtrage rate eine Funktion der Pulsfolgefrequenz ist. Ursache hierfür ist, dass die gleiche Strecke in gleicher Zeit bei gleicher Scangeschwindigkeit mit einer höheren Anzahl an Laserpulsen beaufschlagt wird. Während dieses Prozesses erfolgt eine Erhöhung der Energie pro Weg oder der Leistung pro Vorschubgeschwindigkeit – allgemein: Streckenenergie.

Für eine Laserleistung von 3 W und der maximalen Pulswiederholfrequenz von 15 kHz wird eine Schneidgeschwindigkeit von 0,65 mm/s erreicht.

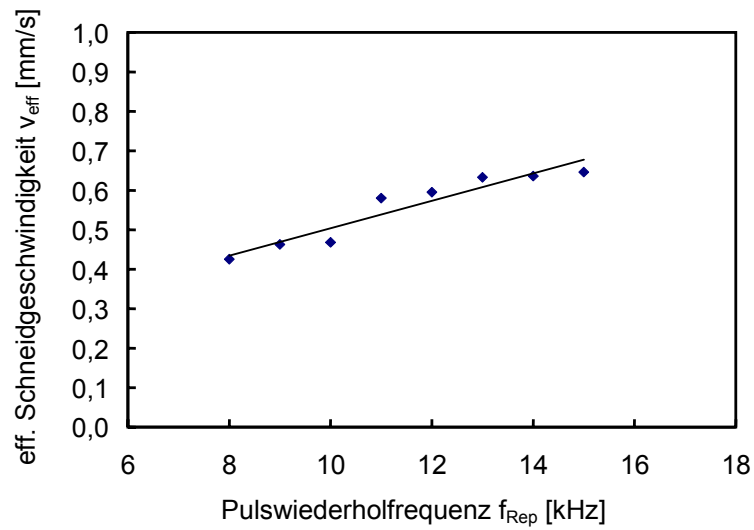


Abbildung 7.24: Schneidgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Pulswiederholfrequenz

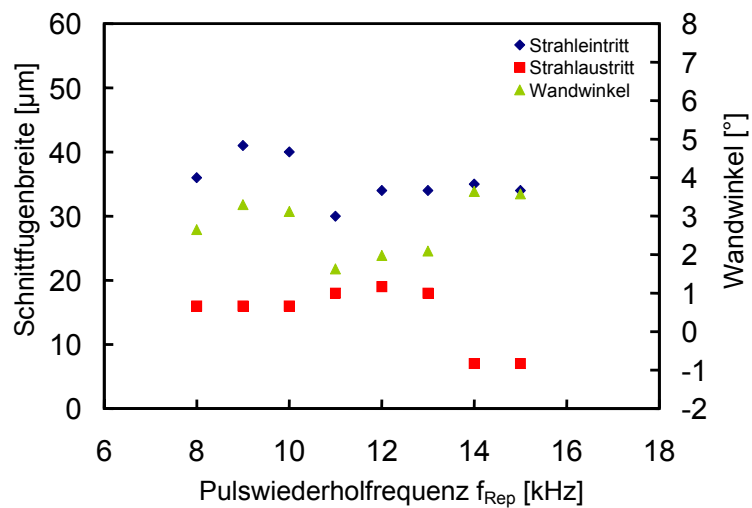


Abbildung 7.25: Schnittfugenbreiten und Wandwinkel in Abhängigkeit der Pulswiederholfrequenz

Abbildung 7.25 zeigt geringe Abhängigkeiten von Schnittfugenbreite und Wandwinkel von der Pulswiederholfrequenz

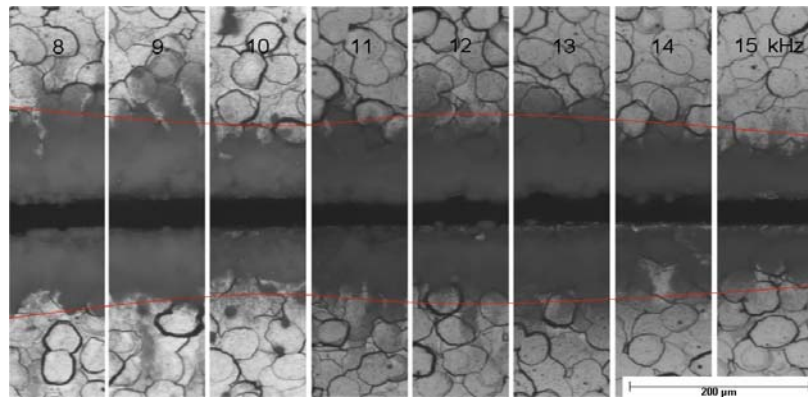


Abbildung 7.26: Schnittfugenbreite und Ablagerungen (Strahleintritt) in Abhängigkeit von der Pulswiederholffrequenz

Die Schnittfugenbreiten betragen am Strahleintritt ca. 30 μm bis 40 μm (siehe Abbildung 7.25 und 7.26). Die Schnittfugenbreiten am Strahlaustritt variieren von 7 μm bis 19 μm (Abbildungen 7.25 und 7.27).

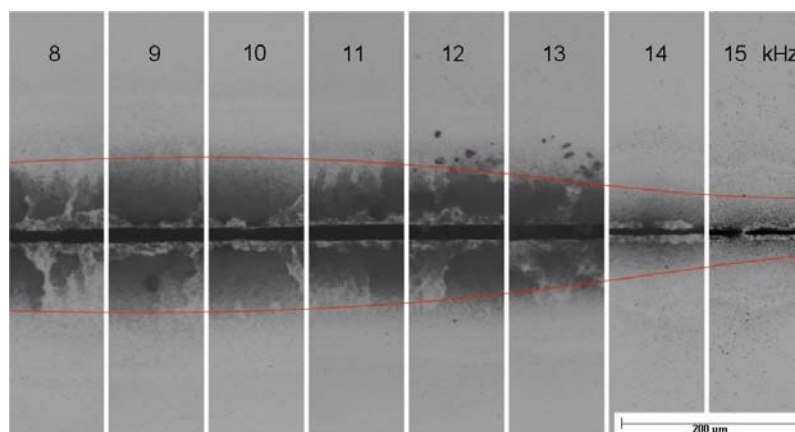


Abbildung 7.27: Schnittfugenbreite und Ablagerungen (Strahlaustritt) in Abhängigkeit von der Pulswiederholffrequenz

Abbildung 7.27 zeigt für 14 kHz und 15 kHz keine vollständige Trennung des Siliziumwafers. Ursache hierfür ist der Einsatz einer Brennweite von 100 mm mit einem sehr großen Schärfentiefebereich sowie Schwankungen der Laserleistung und Strahlqualität.

Der Wandwinkel verhält sich analog der Schnittfugenbreiten am Strahleintritt (siehe Abbildung 7.25). Für eine Pulswiederholffrequenz von 11 kHz besitzt dieser einen Wert von $1,6^\circ$. Die Fläche des Debris sinkt mit steigender Pulswiederholffrequenz am Strahleintritt um ca. 100 μm und am Strahlaustritt um ca. 180 μm (siehe Abbildung 7.27).

Die Experimente zeigen, dass die Abtragsrate eine Funktion der Pulswiederholffrequenz ist. Dieser Zusammenhang basiert darauf dass, bei gleicher Strecke in gleicher Zeit die Schnittfuge mit einer höheren Anzahl an Einzelpulsen beaufschlagt wird.

Der Überdeckungsgrad der Einzelpulse beeinflusst die Ausbildung der Schnittfuge und des Debris. Hierbei werden drei Möglichkeiten der Pulsüberdeckung betrachtet:

- es erfolgt eine prozentuale Überdeckung der Laserpulse,
- die Laserpulse reihen sich aneinander;
- die Pulspausen zwischen den Laserpulsen sind so lang, dass eine Art Perforation entsteht und ihre Verteilung beim wiederholten Abtrag stochastisch ist.

Mit einem gemessenen Strahldurchmesser von 23 μm und einer konstanten Relativgeschwindigkeit von 50 mm/s zwischen Laserstrahl und Werkstück tritt eine Verschiebung der Laserpulse von 3 μm bei einer Pulswiederholffrequenz von 15 kHz und 6 μm bei einer Pulswiederholffrequenz von 8 kHz zwischen zwei aufeinander folgenden Pulsen auf.

Zusätzliche Untersuchungen zeigen, dass das Schneiden von dickeren Siliziumwafern durch aufsprühen eines Wasserfilms auf die Oberfläche des Wafers weiter optimiert werden kann. Der Wasserfilm wurde mit einer Sprühvorrichtung auf einen 620 μm dicken Wafer aufgetragen. Parallel zu dem Aufsprühen des Wasserfilms wurde die Lage des Fokus während der Experimente verändert.

Abbildung 7.28 zeigt die Ergebnisse mit einer Brennweite von 75 mm, einer Pulswiederholffrequenz von 8 kHz und einer Leistung von 9,2 Watt auf der Waferoberfläche. Es wurde mit einer negativen Defokussierung von $-1,75$ mm begonnen. Die Versuchsergebnisse sind in Anhang B.7a zusammengestellt.

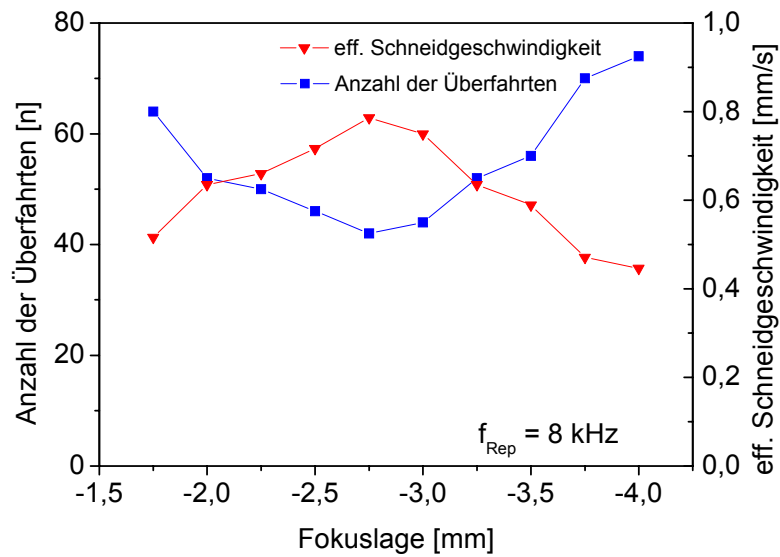


Abbildung 7.28: Einfluss eines Wasserfilms und Fokuslage auf die Schneidgeschwindigkeit

Die lichtmikroskopischen Aufnahmen (Abbildung 7.29 und 7.30) zeigen ein Chipping am Strahleintritt und Strahlaustritt.

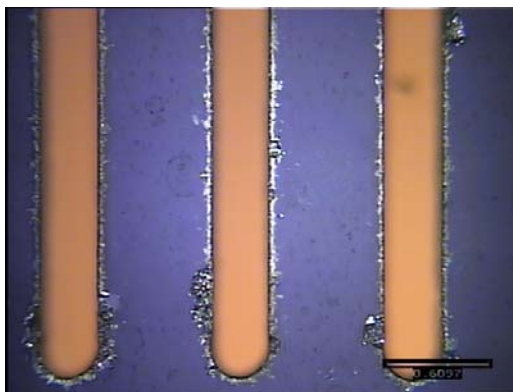


Abbildung 7.29: Chipping am Strahleintritt
($P_1 = 9,2 \text{ W}$; $f_{\text{Rep}} = 8 \text{ kHz}$)

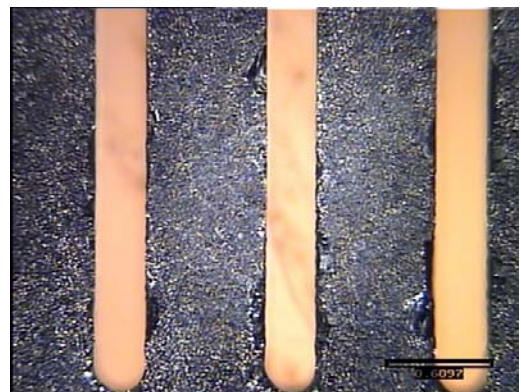


Abbildung 7.30: Chipping am Strahlaustritt
($P_1 = 9,2 \text{ W}$; $f_{\text{Rep}} = 8 \text{ kHz}$)

Abbildung 7.31 zeigt die Ergebnis mit einer Brennweite von 75 mm, einer Puls wiederhol frequenz von 11 kHz und einer Leistung von 8,3 Watt auf der Waferoberfläche. Die Versuchsergebnisse sind in Anhang B.7a zusammengestellt.

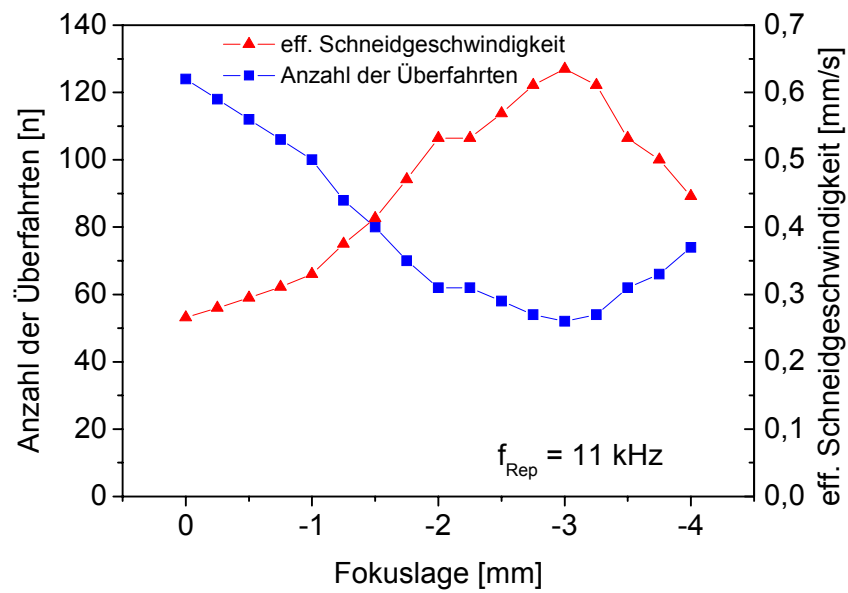


Abbildung 7.31: Einfluss eines Wasserfilms und Fokuslage auf die Schneidgeschwindigkeit

Die lichtmikroskopischen Aufnahmen (Abbildung 7.32 und 7.33) zeigen eine geringere Neigung zum Chipping am Strahleintritt und Strahlaustritt bei höheren Pulswiederholfrequenz und dem Einsatz eines Sprühwasserfilmes auf dem Wafer.

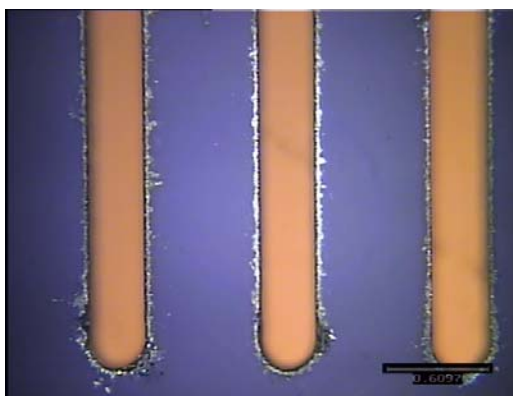


Abbildung 7.32: Chipping am Strahleintritt
($P_1 = 8,3 \text{ W}$; $f_{\text{Rep}} = 11 \text{ kHz}$)

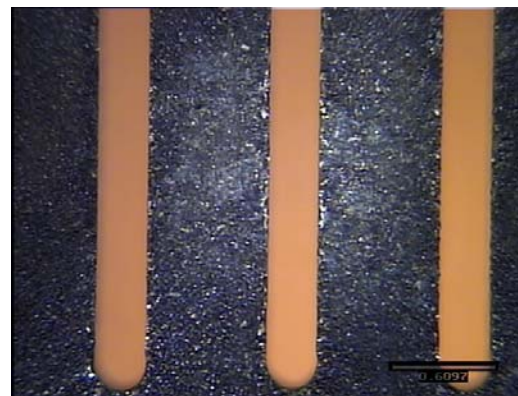


Abbildung 7.33: Chipping am Strahlaustritt
($P_1 = 8,3 \text{ W}$; $f_{\text{Rep}} = 11 \text{ kHz}$)

Weitere Untersuchungen zum Einfluss eines Wasserfilms auf der Oberfläche eines Siliziumwafers auf das Schneidergebnis wurden im Rahmen dieser Arbeit nicht durchgeführt.

Zusammenfassung:

Die Untersuchungsergebnisse zeigen in Bezug auf die effektive Schneidgeschwindigkeit eine Analogie zur Bearbeitung von Stahl. Eine maximale Schneidgeschwindigkeit von ca. 0,65 mm/s wurde mit der maximalen Pulswiederholfrequenz von 15 kHz erzielt. Die schmalste Schnittfuge am Strahleintritt sowie ein kleinster Wandwinkel ergaben sich mit einer mittleren Pulswiederholfrequenz von 11 kHz.

8. Fokusslage

Die Fokusslage ist definiert als der Abstand des Fokus des Laserstrahls relativ zur Werkstückoberfläche. Dabei werden folgende Positionen unterschieden:

- Negative Defokussierung: Position des Fokus über dem Werkstück ($z_f > 0$),
- Positive Defokussierung: Position des Fokus im Werkstück ($z_f < 0$),
- Wert ‚0‘ für die Defokussierung: Position des Fokus genau auf der Werkstückoberfläche ($z_f = 0$), ([3],[8],[28]).

Für die Untersuchungen wurde ein 336 μm dicker $\langle 111 \rangle$ Siliziumwafer verwendet. Konstante Verfahrensparameter sind: Laserparameter ($P = 3 \text{ W}$; $f_{\text{Rep}} = 10 \text{ kHz}$; zirkular polarisiert), Brennweite $f = 100 \text{ mm}$, Scangeschwindigkeit ($v_{\text{scan}} = 50 \text{ mm/s}$) und Atmosphäre Luft. Der Wertebereich der Defokussierung wurde variiert zwischen $-0,2 \text{ mm}$ und $+0,6 \text{ mm}$ in Schritten zu $0,05 \text{ mm}$. Für die Experimente wurde zu Beginn eine exakte Bestimmung der Fokusslage durchgeführt. Die Versuchsergebnisse sind in Anhang B.8 zusammengestellt.

Abbildung 8.1 zeigt eine deutliche Abhängigkeit zwischen Schneidgeschwindigkeit und Fokusslage. Im Wertebereich der Fokusslage von $+0,05 \text{ mm}$ bis $+0,25 \text{ mm}$ konnte eine maximale Prozessgeschwindigkeit von ca. $0,22 \text{ mm/s}$ erzielt werden. Dieser Wertebereich von ca. $0,20 \text{ mm}$ Länge ist identisch mit der Rayleighlänge ($0,18 \text{ mm}$) des Laserstrahls bei Nutzung eines Scannersystems mit einer Brennweite von 100 mm .

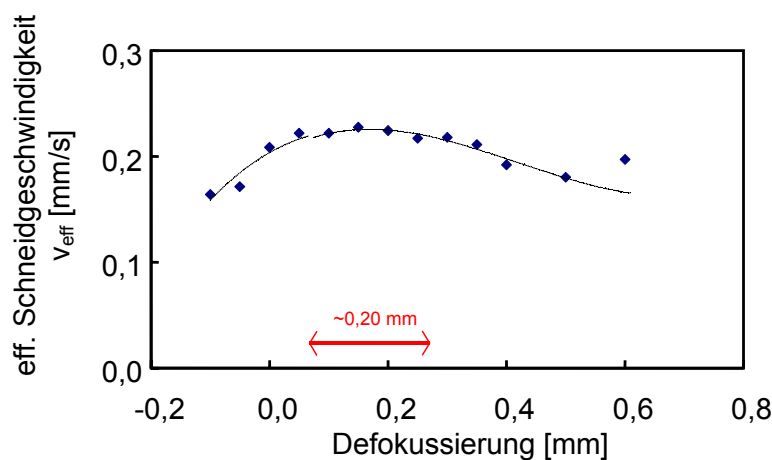


Abbildung 8.1: effektive Schneidgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Fokusslage

Mit zunehmender positiver Defokussierung reduzieren sich die Schnittfugenbreiten von 51 μm auf 38 μm am Strahleintritt und von 30 μm auf 19 μm am Strahlaustritt kontinuierlich, (Abbildung 8.2).

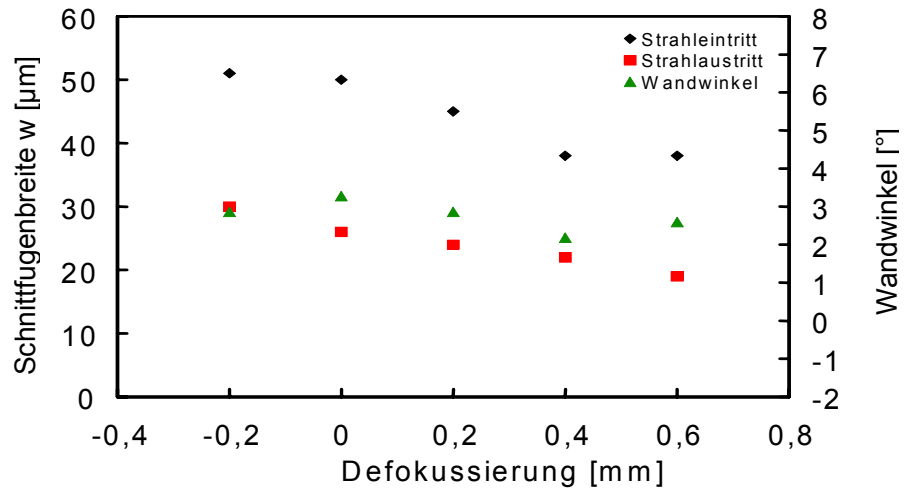


Abbildung 8.2: Schnittfugenbreite und Wandwinkel in Abhängigkeiten der Fokusslage

Analoges Verhalten wurde für den Debris beobachtet. Am Strahleintritt reduzieren sich die Ausdehnungen des Debris von 340 μm auf 240 μm und am Strahlaustritt von 180 μm bis 170 μm . Der Debris auf der Strahleintrittsseite (Abbildung 8.3) zeigt einen stark oxidierten Schmelzaufwurf. Die Ablagerungen auf der Strahlaustrittsseite (Abbildung 8.4) sind feine Partikel.

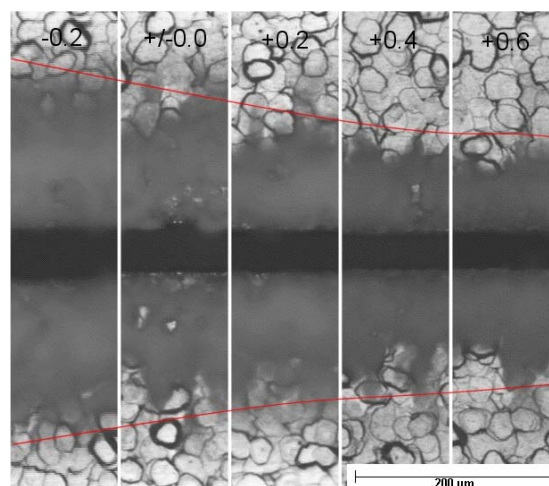


Abbildung 8.3: Schnittfugen am Strahleintritt in Abhängigkeit von der Defokussierung

Untersuchungen des Wandwinkels ergaben Werte zwischen $2,2^\circ$ und $3,2^\circ$ (Abbildung 8.2). Der kleinste Wandwinkel von $2,2^\circ$ wurde mit einer negativen Defokussierung von 0,40 mm erzielt. Dies entspricht einer Fokussierung unterhalb des Wafers – Waferdicke $336 \mu\text{m}$. Basierend auf den Isophoten unter Verwendung einer negativen Defokussierung eines Laserstrahles mit TEM_{00} Mode, hat die Fokusslage nur geringen Einfluss auf die Konizität der Schnittfuge.

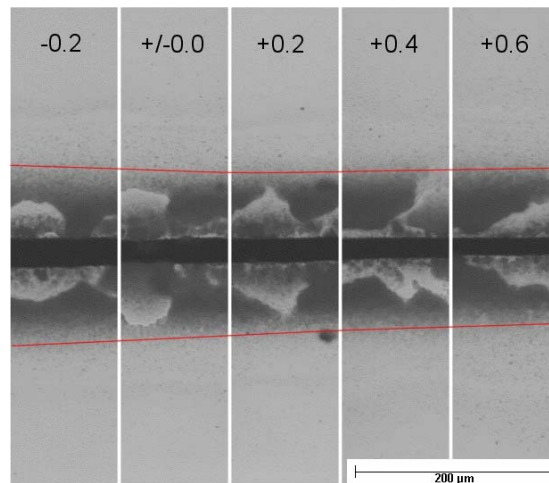


Abbildung 8.4: Schnittfugen am Strahlaustritt in Abhängigkeit von der Defokussierung

Der Einfluss der Fokusslage auf das Schneidergebnis basiert auf der Änderung der Strahlintensität in Abhängigkeit vom Strahldurchmesser (Isophoten). Bei konstanter Fokusslage auf der Materialoberfläche und steigender Schnitttiefe erfolgt eine Reduzierung der Abtragsrate infolge geringerer Strahlintensität. Dies führt bei Überschreitung eines materialabhängigen Schwellwertes zum Abbrechen des Abtragsprozesses (Versacken des Strahles). Aus diesem Grund erfolgt bei Schneidapplikationen mit größeren Materialstärken eine Fokussnachführung in das Material.

Maximale Abtragsraten beim Laserstrahlschneiden von Silizium werden mit negativer Defokussierung erreicht. Daraus ergibt sich, dass ein hoher Anteil der Strahlungsleistung im Materialinneren absorbiert wird. Die Wirkung von Absorptionseffekten längs der Strahlbreitungsrichtung im zu schneidenden Material (z.B. an den Schnittfugenwänden, in der Schmelze, im Plasma) führt zu zusätzlichem Materialabtrag. Mit negativer Defokussierung auf die Unterseite des Wafers liegt der maximale Intensitätswert des Laserstrahls ebenso auf der Unterseite (Abbildung 8.5). Damit können parallele Schnittkanten bei negativer Defokussierung erzielt werden ([3],[8],[28], [39]).

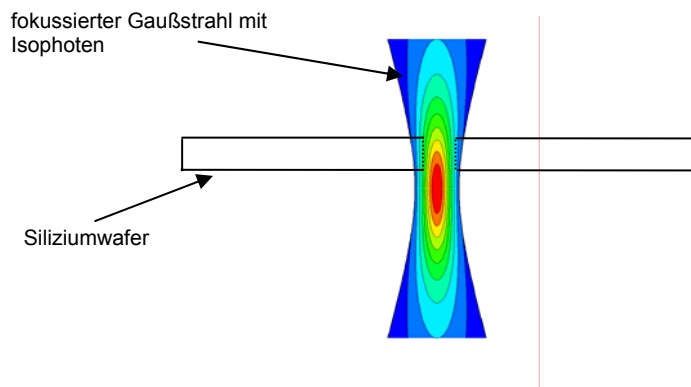


Abbildung 8.5: Lage der Isophoten bei negativer Defokussierung

Diese wurde mit den Versuchen unter Verwendung eines frequenzverdoppelten Laser mit 532 nm und einer Brennweite von 34 mm bestätigt. Die optimale Fokusslage ergab sich mit einer negativen Defokussierung von - 0,3 mm. Mit dieser konnten nahezu senkrechte, parallele Schnittflächen erzielt werden [8]. Aufgrund der für verschiedenen Wellenlängen unterschiedlichen optischen Eindringtiefen ist davon auszugehen, dass gleiches für Laser der Wellenlängen 1064 nm gilt. Die Brennweite bestimmt dabei über die Rayleighlänge hauptsächlich den Toleranzbereich für die optimale Fokusslage.

Zusammenfassung:

Eine optimale Fokusslage mit einer maximalen Prozessgeschwindigkeit von ca. 0,23 mm/s ergibt sich für eine negative Defokussierung bei - 0,15 mm. Optimierung auf geringe Schnittfugebreiten am Strahlein- und am Strahlaustritt und kleinen Wandwinkel sind mit einer negativen Defokussierung von - 0,40 mm erzielbar.

9. Optik

9.1. Scanner

Dieses Kapitel zeigt die Abhängigkeiten der Qualität der Schnittfugen von der Scangeschwindigkeit des Laserstrahls.

Durch Erhöhung der Scangeschwindigkeit kann die Breite der Schnittfuge minimiert werden und umgekehrt. Bei sehr hohen Scangeschwindigkeiten stellt sich ein minimaler Schnittspalt ein, der jedoch infolge des Dampfdruckes im Schnittspalt größer als der Fokusbereich des Lasers ist. Am Strahleintritt wurden dabei breitere Schnittfugen gemessen als am Strahlaustritt. Höhere Scangeschwindigkeiten verursachen einen stärkeren Materialauswurf auf der Strahleintrittsseite, ([2],[3],[11],[26],[28], [39]).

Da die aufeinander folgenden Pulse mit einem zeitlichen Abstand von 0,1 ms und einem Strahldurchmesser von ca. 20 μm gerade noch nebeneinander liegen sollen, ergibt sich eine Scangeschwindigkeit von 200 mm/s. Die Experimente wurden mit Scangeschwindigkeiten bis 300 mm/s durchgeführt.

Verwendet wurden <111>- Siliziumwafer mit einer Materialdicke von (210 +/- 10) μm . Konstante Verfahrensparameter sind: Laserparameter ($P = 3 \text{ W}$; $f_{\text{Rep}} = 10 \text{ kHz}$; zirkular polarisiert), Brennweite $f = 100 \text{ mm}$, Fokusbereich: +/- 0 mm und Atmosphäre Luft. Systemtechnisch bedingt ist die minimale Scangeschwindigkeit 0,1 mm/s. Die Versuchsergebnisse sind in Anhang B.9 zusammengestellt.

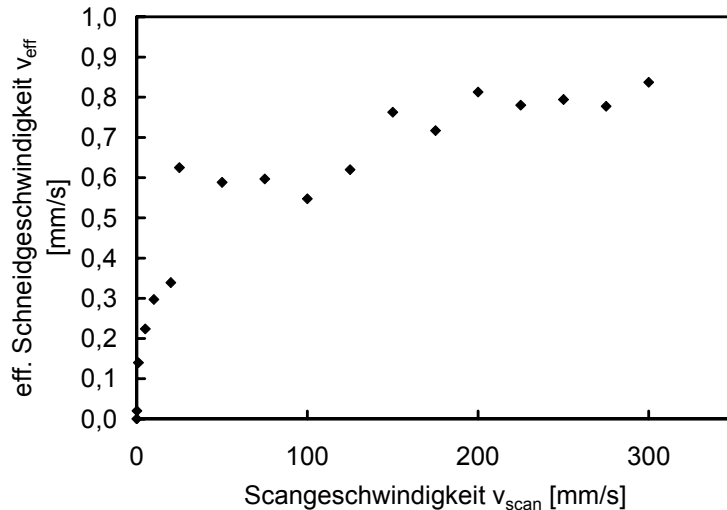


Abbildung 9.1: effektive Schneidgeschwindigkeit mit Scanneroptik in Abhängigkeit der Scangeschwindigkeit

Abbildung 9.1 zeigt, dass die effektive Schneidgeschwindigkeit mit der Scangeschwindigkeit für kleine Werte (bis ca. 50 mm/s) schnell und für größere (> 50 mm/s) langsam und kontinuierlich steigt. Bei Scangeschwindigkeiten von ca. 100 mm/s existiert eine 50prozentige Pulsüberlappung. Eine maximal effektive Schneidgeschwindigkeit von ca. 0,84 mm/s wurde mit einer Scangeschwindigkeit von 300 mm/s gemessen.

Aufgrund der berechneten Fehlergrößen für niedrige Scangeschwindigkeiten und Schneidgeschwindigkeiten (Anhang B.9 und B9a) wurden weitere Experimente in einem kleineren Geschwindigkeitsfenster (Abbildung 9.2) durchgeführt.

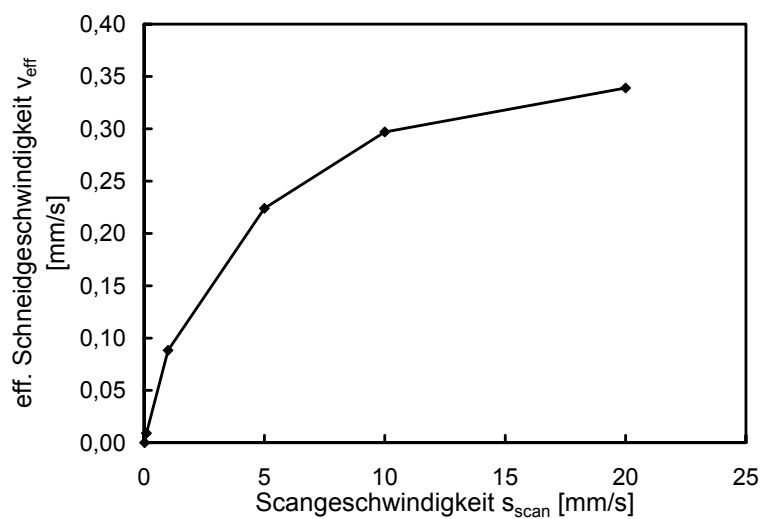


Abbildung 9.2: effektive Schneidgeschwindigkeit für Scangeschwindigkeiten $v_{scan} < 20$ mm/s

Die für niedrigere Scangeschwindigkeiten - $v_{scan} < 20$ mm/s - ermittelten Schneidgeschwindigkeiten unterliegen einer geringeren Diskontinuitäten.

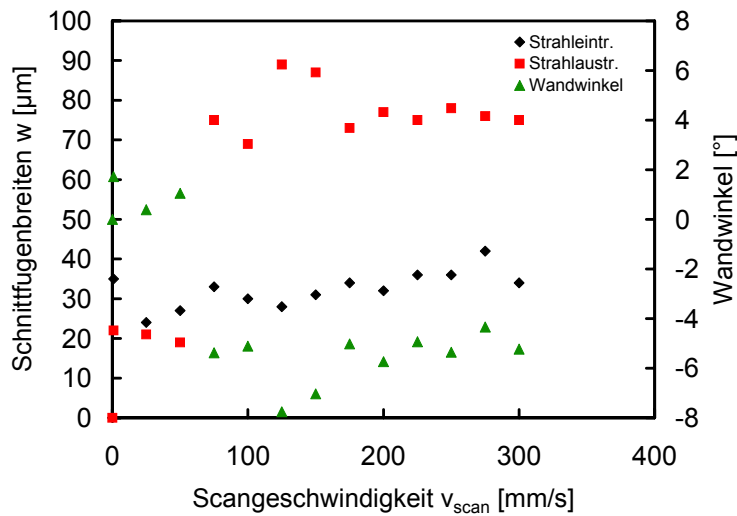


Abbildung 9.3: Schnittfugenbreite und Wandwinkel in Abhängigkeit der Scangeschwindigkeit

Für vergleichbare Aussagen zur Qualität der Schnittfuge wurden für das vollständige Trennen der Wafer zum Mittelwert der notwendigen Überfahrten 50 Überfahrten addiert. Die Experimente zeigen, dass mit steigender Scangeschwindigkeit die Schnittfuge am Strahleintritt zunimmt (Abbildungen 9.3 und 9.4). Am Strahlaustritt zeigt sich ab einer Scangeschwindigkeit von ca. 75 mm/s eine einseitige Schnittfugenverbreiterung um ca. 57 μm (Ausgangswert ca. 20 μm). Diese Verbreiterung erstreckt sich über 2/3 der Schnittlänge und bewirkt eine Negation der Konizität (Flankenwinkel: ca. $-5,6^\circ$) (Abbildungen 9.3 und 9.5).

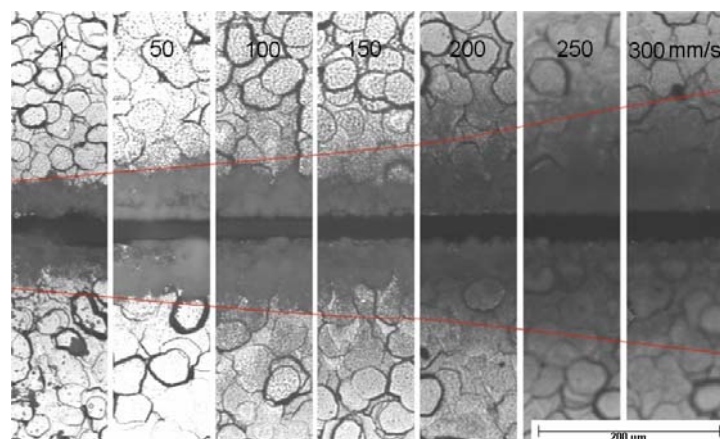


Abbildung 9.4: Schnittfugen am Strahleintritt in Abhängigkeit von der Scangeschwindigkeit

Die Auswertung der Experimente zeigt, dass am Strahleintritt (Abbildung 9.4) mit zunehmender Scangeschwindigkeit bis ca. 100 mm/s die Ausdehnung von grobkörnigen Oxiden zunimmt (ca. 170 μm).

Eine weitere Steigerung der Scangeschwindigkeit erzwingt eine geringe Reduzierung dieser Oxide um ca. 20 μm . Es kommt jedoch zu einer vermehrten Formierung von feinkörnigem Siliziumstaub mit größerer Ausdehnung (ca. 260 μm). In Auswertung dieser und vorangegangener Untersuchungen ergibt sich auch hier die Abhängigkeit von Breite der Schnittfuge und Ausdehnung des Debris bzw. Ablagerungen.

Dies wird auch am Strahlaustritt ersichtlich. Die Ausdehnung des Debris steigt sprunghaft mit der Schnittfugenbreite von ca. 180 μm auf ca. 360 μm (Abbildung 9.5)

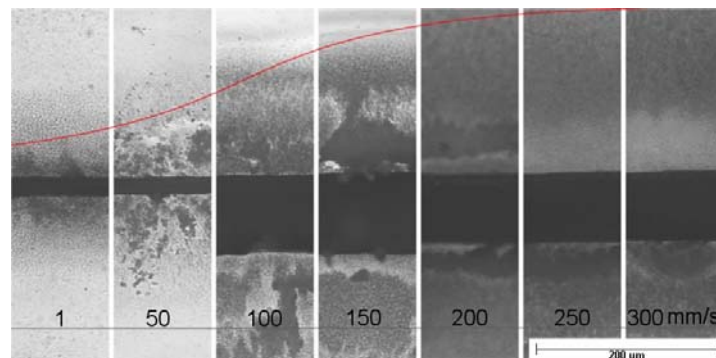


Abbildung 9.5: Schnittfugen am Strahlaustritt in Abhängigkeit von der Scangeschwindigkeit

Zusammenfassung

siehe Kapitel 9.3. Scanner versus Festoptik

9.2. Festoptik

Für diese Experimente wurden die Siliziumwafer unter dem fest stehenden Laserstrahl bewegt.

Verwendet wurden $\langle 111 \rangle$ - Siliziumwafer mit einer Materialdicke von (210 \pm 10) μm . Konstante Verfahrensparameter sind: Laserparameter ($P = 3 \text{ W}$; $f_{\text{Rep}} = 10 \text{ kHz}$; zirkular polarisiert), Brennweite $f = 100 \text{ mm}$, Fokusslage: $\pm 0 \text{ mm}$ und Atmosphäre Luft. Die Versuchsergebnisse sind in Anhang B.10 zusammengestellt.

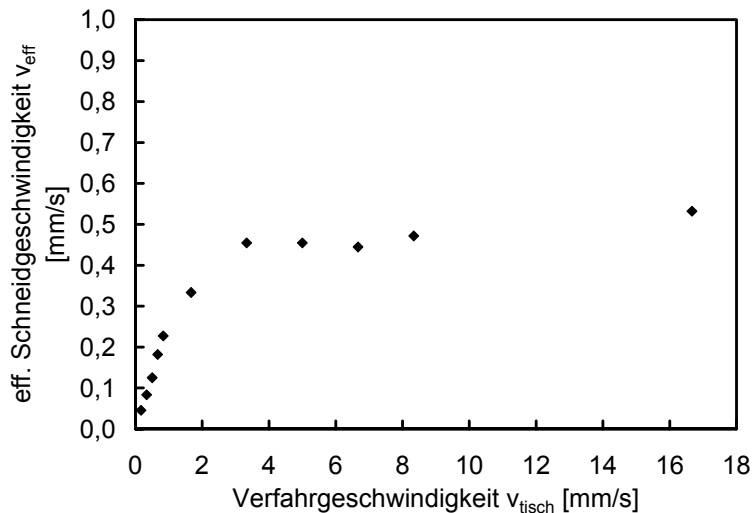


Abbildung 9.6: effektive Schneidgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Verfahrensgeschwindigkeit

Abbildung 9.6 zeigt, dass bis zu einer Verfahrensgeschwindigkeit von 4 mm/s die effektive Schneidgeschwindigkeit stark zunimmt. Höherer Verfahrensgeschwindigkeiten zeigen keine signifikanten Änderungen der effektiven Schneidgeschwindigkeit. Die Auswertung der Experimente zeigen Parallelen zum Schneiden mit Scanner. Im Vergleich zur Scanneranwendung endet der steile Anstieg der Schneidgeschwindigkeit bei ca. 10 mm/s

Die gewonnen Aussagen zu Schnittfugenbreite an Strahleintrittsseite und Strahlaustrittsseite sowie der sich daraus ergebende Wandwinkel zeigen keine größeren Änderungen. Dies belegen Abbildungen 9.7 und 9.8 und 9.9. Der Wandwinkel beträgt maximal $1,3^\circ$.

Anhand der Abbildung 9.7 ist ersichtlich, dass die Schnittfugenbreiten auf der Strahleintrittsseite (ca. $36 \mu\text{m}$) und am Strahlaustritt (ca. $25 \mu\text{m}$) bis zu Geschwindigkeiten von ca. 2 mm/s nur gering variieren. Größere Verfahrensgeschwindigkeiten führen zu Minimierung der Schnittbreiten am Strahlaustritt. Die Berechnung der Wandwinkel ergaben einen durchschnittlichen Wert von $1,7^\circ$. Damit wurden nahezu parallele Schnittflächen erzielt.

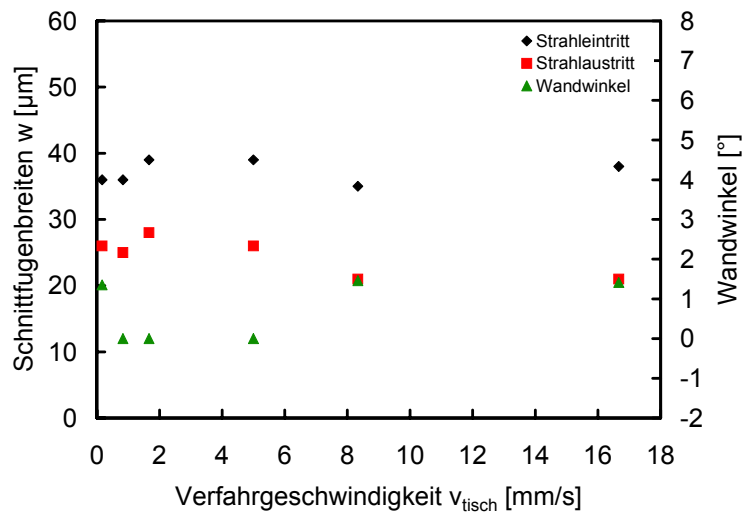


Abbildung 9.7: Schnittfugenbreite und Wandwinkel in Abhängigkeit der Verfahrensgeschwindigkeit

Mit zunehmender Verfahrensgeschwindigkeit steigt der Debris am Strahleintritt in Form von stark oxidiertem Schmelzauswurf von ca. 190 μm auf ca. 270 μm (Abbildungen 9.8).

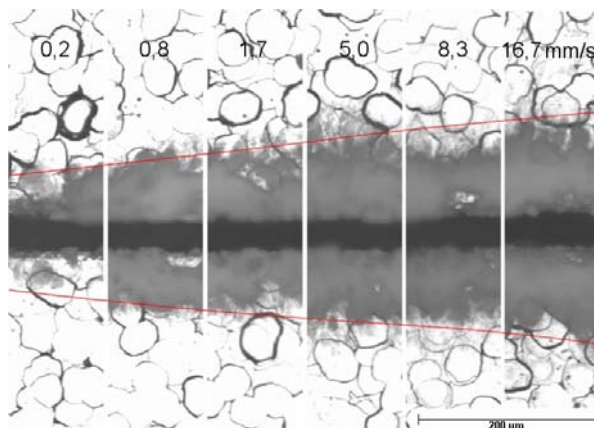


Abbildung 9.8: Schnittfugen am Strahleintritt in Abhängigkeit von der Verfahrensgeschwindigkeit

Gleiches gilt für die Strahlaustrittsseite. Dort vergrößert sich die Ausdehnung von ca. 160 μm auf ca. 190 μm . Im Unterschied zur Strahleintrittsseite sind als Debris feine Siliziumpartikel vorzufinden (Abbildung 9.9).

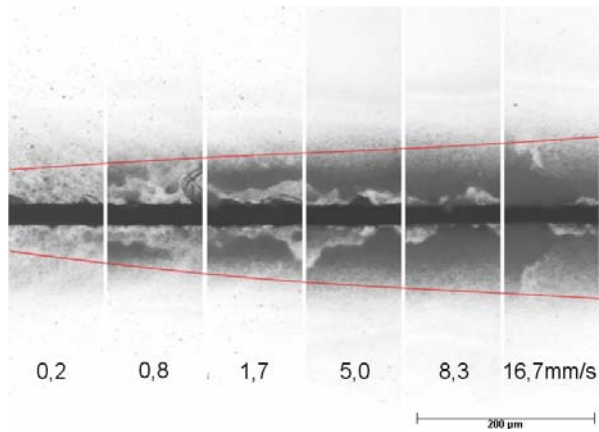


Abbildung 9.9: Schnittfugen am Strahlaustritt in Abhängigkeit von der Verfahrensgeschwindigkeit

Zusammenfassung

siehe Kapitel 9.3 Scanner versus Festoptik

9.3. Scanner versus Festoptik

Geringe Relativgeschwindigkeiten zwischen Laserstrahl und Werkstück, führen infolge einer Zunahme der lateralen Pulsüberlappung zu einer höheren eingebrachten Streckenenergie. Diese bewirkt ein stärkeres Aufheizen der Wechselwirkungszone und führt damit zu einem schnelleren Aufschmelzen bzw. Verdampfen des Materials. Daraus folgt eine Steigerung des pro Überfahrt abgetragene Volumen.

Wegen geringer Relativgeschwindigkeiten bildet sich eine stark geneigte Schneidfront aus. Diese reflektiert das geschmolzene und verdampfte Material in die Schnittfuge. Dort rekondensiert das Material an den Bearbeitungsoberflächen und wird dadurch nicht vollständig aus der Schnittfuge ausgetrieben. Dies führt zu geringeren tatsächlichen Abtragsraten und einer Reduzierung der Schneidgeschwindigkeit.

Eine Erhöhung der Verfahrensgeschwindigkeit führt zu geringeren lateralen Pulsüberdeckung und einer weniger starken Neigung der Schneidfront (Abbildung 9.10 und 9.11). Damit erfolgt ein nahezu vollständiger Materialaustrieb aus der Schnittfuge und folglich eine Erhöhung der Schneidgeschwindigkeit.

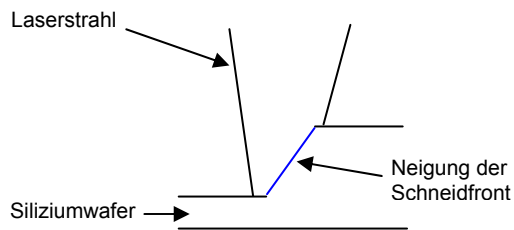


Abbildung 9.10: Neigung der Schneidfront bei geringen Verfahrensgeschwindigkeiten

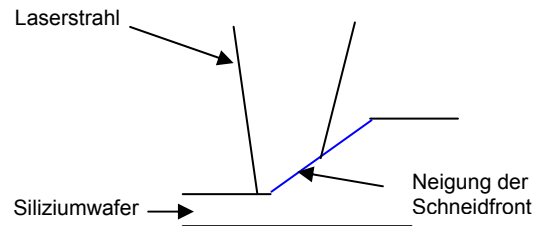


Abbildung 9.11: Neigung der Schneidfront nach Erhöhung der Verfahrensgeschwindigkeiten

Durch niedrige Scan- oder Verfahrensgeschwindigkeiten erwärmt sich der Werkstoff in einem größeren Volumen. Dies führt zu breiten Schnittfugen. Höhere Scan- oder Verfahrensgeschwindigkeiten bewirken eine Reduzierung des Wärmeinflussbereiches und damit eine Verkleinerung der Schnittfuge. Bei sehr hohen Geschwindigkeiten kann diese dem Durchmesser des fokussierten Laserstrahls entsprechen ([3],[11],[28],[39]).

Mit steigender Scan – oder Verfahrensgeschwindigkeit nimmt die Korngröße sowie die Porosität des Debris ab [8]. Die Ablagerungsausdehnung reduziert sich bei mittleren Scangeschwindigkeiten von ca. 150 mm/s. Bei größer werdenden Scangeschwindigkeiten nimmt die Ausdehnung des Debris zu. Dabei erscheint dieser als feine Partikel.

Der Debris ist folgenden Geschwindigkeitsbereichen zuzuordnen:

- 1 mm/s - 50 mm/s; effektive Schneidgeschwindigkeit: 0,03 mm/s - 0,58 mm/s
hohe Laserstrahlungseinwirkdauer infolge geringer Relativgeschwindigkeit
hoher Anteil an Schmelze, explosionsartiges Verdampfen des Materials verbunden mit Bildung von Dampfblasen
- 100 mm/s - 150 mm/s; effektive Schneidgeschwindigkeit: 0,55 mm/s - 0,76 mm/s
mittlerer Laserstrahleinwirkdauer infolge mittlerer Relativgeschwindigkeiten
schlechter Schmelzaustrieb aus der Schnittfuge, geringere Porosität nach der Erstarrung aufgrund geringen Anteils an Schmelze

- 200 mm/s - 300 mm/s; effektive Schneidgeschwindigkeit: 0,81 mm/s - 0,84 mm/s
kurze Laserstrahlwirkdauer infolge hoher Relativgeschwindigkeiten
sehr feinkörniger und breit ausgehnter Debris aufgrund eines hohen Dampfdrucks in
Bezug auf eine geringere Gesamtmenge an Schmelze [8]

Kleine Relativgeschwindigkeiten der Tischsteuerung (in der Größenordnung des Verfahrbereiches der Tischsteuerung; < 17 mm/s) und daraus folgend hohe Pulsüberlappungen führen zu einem vollständigen Verdampfen des Fugenmaterials.

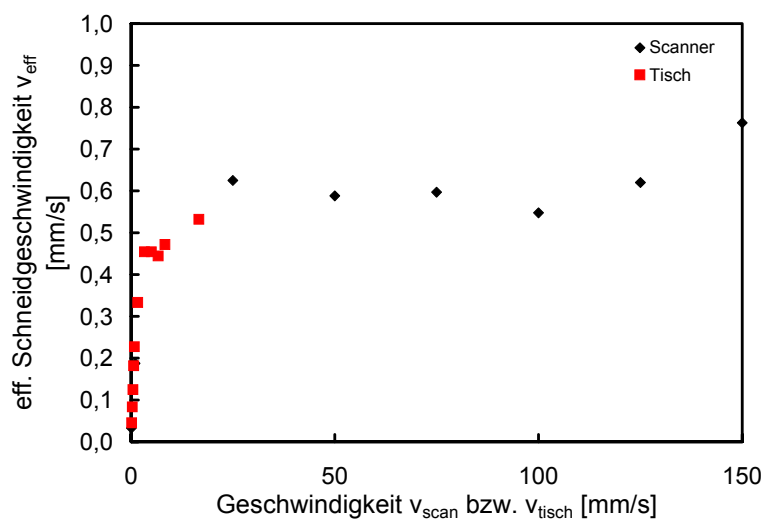


Abbildung 9.12: effektive Schneidgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Relativgeschwindigkeit für Scanner- und Tischsteuerung

Entsprechend den Anforderungen ist es für große Relativgeschwindigkeiten (> 16 mm/s) günstiger mit Scanneroptik, für kleine Relativgeschwindigkeiten (< 0,25 mm/s; konturabhängig) günstiger mit Tischsteuerung zu schneiden (Abbildung 9.12).

Eine maximale Schneidgeschwindigkeit von 0,83 mm/s wurde mit Scanner und einer Scangeschwindigkeit von 300 mm/s erzielt (Abbildung 9.1).

10. Einfluss der Gasatmosphäre

10.1. Allgemeine Parameterzusammenhänge

Mit dem Einsatz von Inertgas soll eine Reduzierung der Überfahrten des Lasers auf dem Wafer – und damit eine Steigerung der effektiven Schneidgeschwindigkeit - erzielt werden. Die Ergebnisse wurden anhand qualitativer Aussagen zu Schnittqualität, Schnittfugenbreite und Debris verglichen.

Zur Herstellung einer definierten Gasatmosphäre dient eine Vakuumkammer.

Untersucht wurden Atmosphären mit folgenden Gasen:

Tabelle 10.1: Übersicht zu Ionisierungsenergie und Wärmeleitfähigkeit eingesetzter Gase [9]

Gasart	Ionisierungsenergie [eV]	Wärmeleitfähigkeit [$Wm^{-1}K^{-1}$]
Sauerstoff (O ₂)	13,62	0,026
Stickstoff (N ₂)	14,53	0,026
Argon (Ar)	15,62	0,017
Helium (He)	24,59	0,150

Verwendet wurden <111> Siliziumwafer mit einer Materialdicke von (210 +/- 10) µm. Konstante Verfahrensparameter sind: Laserparameter (P = 3 W; f_{Rep} = 10 kHz; zirkular polarisiert), Brennweite f = 100 mm, Fokusslage: +/- 0 mm und einer Scangeschwindigkeit v_{scan} = 50 mm/s. Bestrahlt wurde durch ein Quarzglasfenster in der Vakuumkammer. Alle Versuche wurden mit Scannersystem durchgeführt. Die Versuchsergebnisse sind in Anhang B.11 zusammengestellt.

Die Fokusslage +/- 0 mm wurde vor Beginn der Experimente für die Probenkammer bestimmt. Eine Änderung des Fokus wurde wegen kleiner Brechzahländerung im gasförmigen Medium und wegen der großen Fokusslänge des Bearbeitungsobjektivs mit einer Brennweite von f = 100 mm nicht berücksichtigt.

Der Austausch der Gasatmosphäre erfolgte über Druckwechselpülung. Zuerst wurde die Vakuumkammer abwechselnd bis auf ca. 0,08 mbar evakuiert und anschließend mit dem jeweiligen Gas gespült. Das Gas wurde nach dreimaligem Spülen mit leichtem Überdruck (nahe Atmosphärendruck) in die Kammer gefüllt.

10.2. Luft

Die Untersuchungen an Luft sind als Referenzmessungen zu betrachten.

Die erzeugten Schnittfugen zeigen geringe Breiten am Strahleintritt von 34 μm und am Strahlaustritt von ca. 8 μm (Anhang B11). Die Ränder der Schnittfuge weisen stark oxidierte Schmelzablagerungen auf. Während des Schneidprozesses kam es beim Auswurf der teilweise grobkörnigen Schmelzpartikel zu einem Zusetzen der Schnittfuge durch diese Partikel. Daraus ergibt sich eine Varianz der Schnittfugenbreite nach unten. Unter dem Stereomikroskop sind lose helle oder transparente Ablagerungen zu erkennen (Abbildungen 10.1 und 10.2).

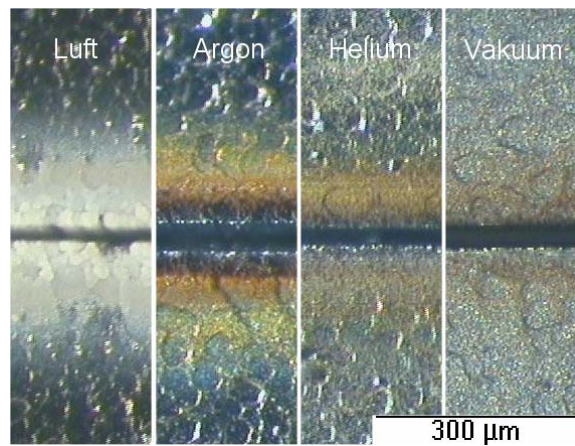


Abbildung 10.1: Ablagerungen am Strahleintritt für verschiedene Prozessgase

Die Ausdehnung dieser losen Ablagerungen ist mit ca. 180 μm vorwiegend lokal auf den Bereich der Schnittfuge begrenzt. Die Strahlaustrittseite zeigt weniger stark ausgeprägte Ablagerungen. Diese sind durch feinkörnige Partikel bestimmt.

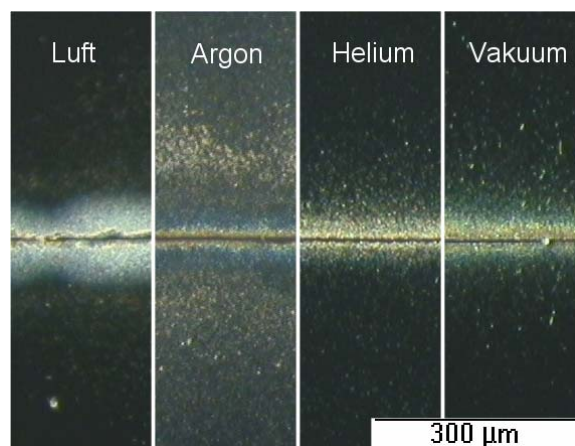


Abbildung 10.2: Ablagerungen am Strahlaustritt für verschiedene Prozessgase

Die grobkörnigen Schmelzpartikel an den Schnittkanten wurden mit Hilfe eines Rasterelektronenmikroskop (REM) analysiert. Abbildung 10.3 zeigt eine Rasterelektronenaufnahme einer Schnittkante mit den grobkörnigen Schmelzpartikeln. Die Auswertung mit EDX (Energy-Dispersive-X-Ray) zeigt Abbildung 10.4. Die Oberflächenmorphologie zeigt, dass die Ablagerungen in Form einer oberflächlichen, lockeren, aber dicken Oxidschicht vorliegen.

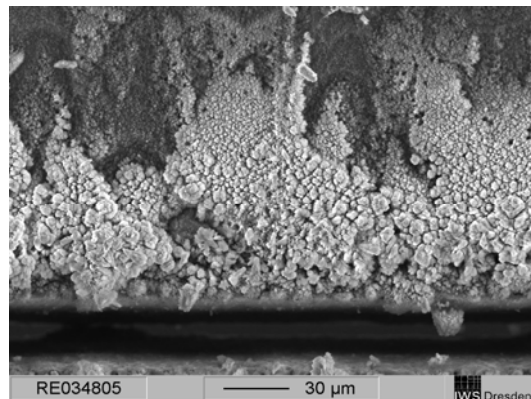


Abbildung 10.3: Sekundärelektronen (SE)-Bild (Strahleintritt) für Luft

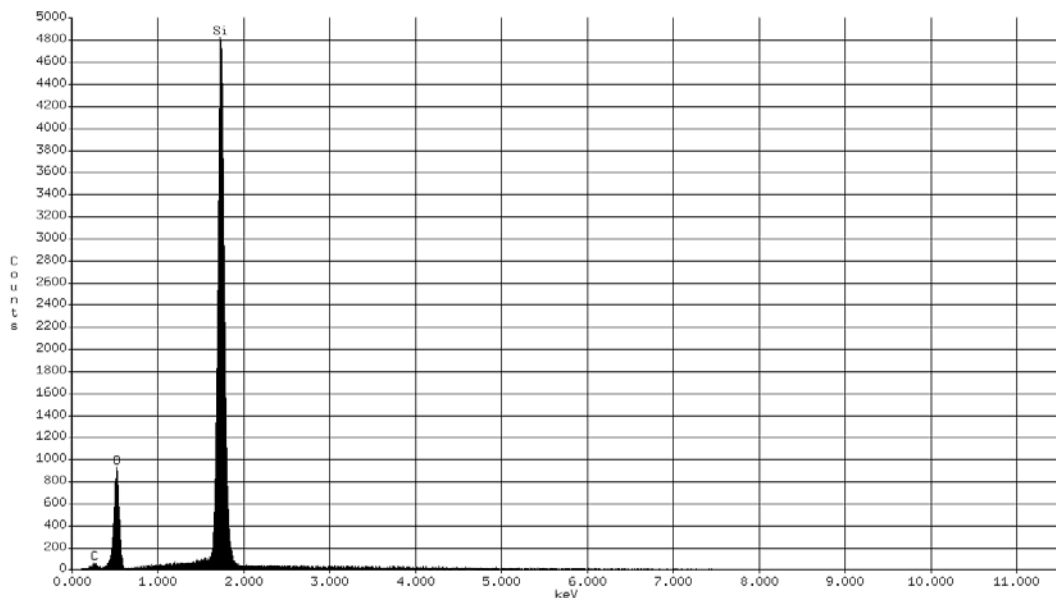


Abbildung 10.4: Quantitative EDX-Analyse der Schmelzablagerungen (Strahleintritt) für Luft

Die quantitative EDX-Analyse der Ablagerungen ergibt einen hohen Sauerstoff- Peak. Beim Schneiden an Luft entsteht ein breiter oxidiertes Streifen von Silizium an der Schnittfuge des Strahleintrittes. Exakte Messungen zeigen, dass die Ablagerungen sich über ca. 260 μm

erstrecken (Messungen über Linienanalyse/ linescan) (Abbildung 10.5 und 10.6). Die Berechnung des Wandwinkels ergibt eine leicht konische Schnittfugen Geometrie mit $3,5^\circ$.

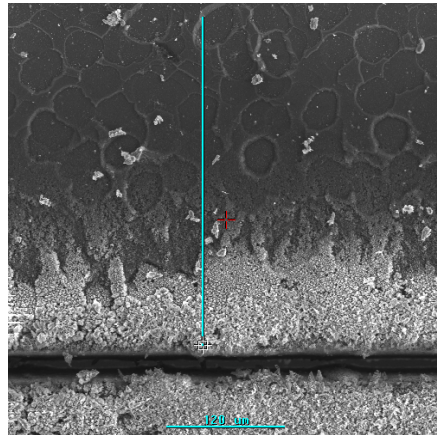


Abbildung 10.5: Sekundärelektronen-Bild (Strahleintritt) für Luft (Bezugmaße linescan)

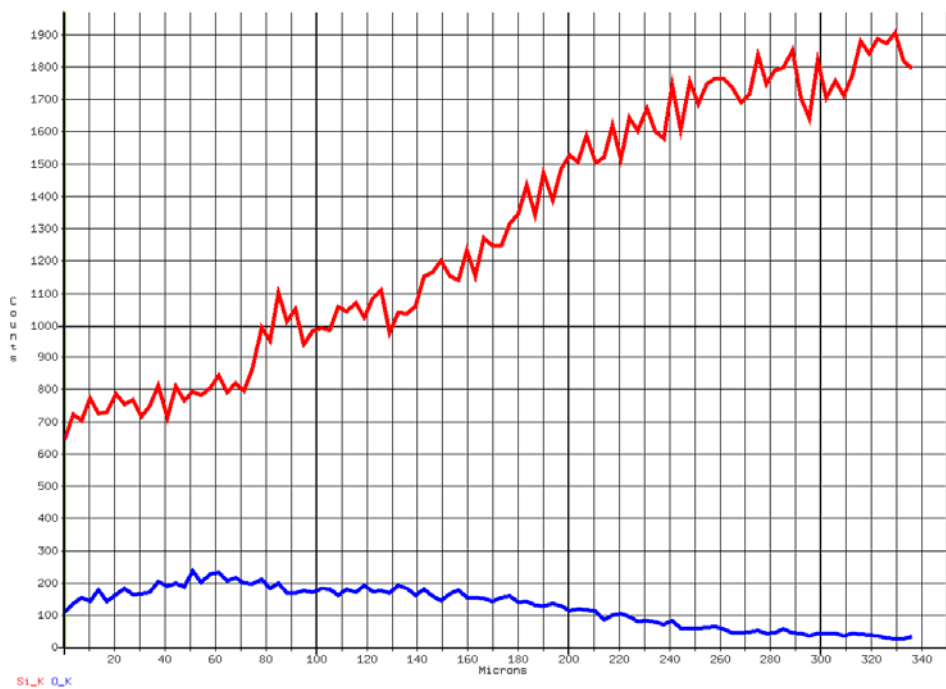


Abbildung 10.6: Linienanalyse (linescan) der Ablagerungen (Strahleintritt) für Luft

Zusammenfassung:

Siehe Kapitel 10.6 Zusammenfassung Schneiden unter Gasatmosphäre

10.3. Argon

Die Schnittfugen am Strahleintritt betragen ca. $39\ \mu\text{m}$ und am Strahlaustritt sind die durchschnittliche Breite der Schnittfugen $7\ \mu\text{m}$. Im Vergleich zur Gasatmosphäre Luft ist der Strahleintritt etwas breiter und der Strahlaustritt geringfügig kleiner (Anhang B11). Daraus ergibt sich ein Flankenwinkel von $4,3^\circ$. Die Messwerte der Schnittfugenbreite verschiedener Schneidexperimente unter Argon zeigen eine geringe Varianz. Alle Experimente zeigen schärfere Schnittkanten als unter Luft. Ursache hierfür ist eine wesentlich stärkere Formierung des ablatierten Materials von feinem Siliziumstaub. Mikroskopaufnahmen zeigen hier einen feinen bräunlichen Staub (Abbildungen 10.7 und 10.8).

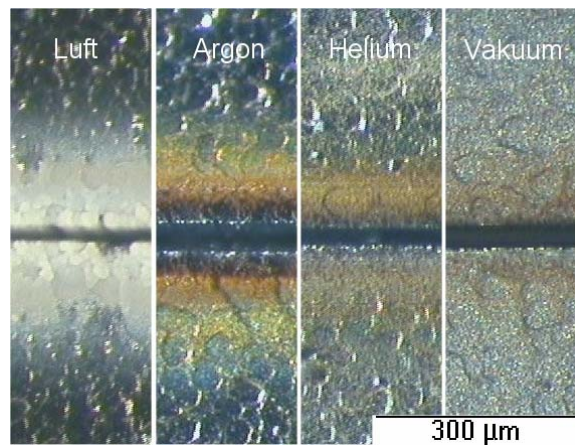


Abbildung 10.7: Ablagerungen am Strahleintritt für verschiedene Prozessgase

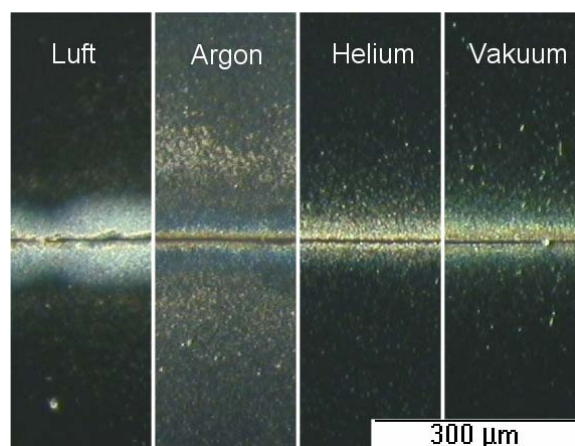


Abbildung 10.8: Ablagerungen am Strahlaustritt für verschiedene Prozessgase

Die Ausdehnung dieses Debris beträgt etwa $350\ \mu\text{m}$ (Abbildung 10.9). Ursache für die große Ausdehnung des Debris ist das sehr geringe Gewicht dieser Partikel, die aufgrund des Ablationsdruckes von der Schnittfuge weit weg fliegen.

Die Dichte des Debris nimmt mit der Entfernung von der Schnittfuge ab und lässt sich in drei Partikelgrößen und den dazugehörigen Ablagerungszonen charakterisieren (Abbildung 10.10):

- feiner Siliziumstaub direkt um die Schnittfuge,
- feine Siliziumpartikel und
- größere Partikel.

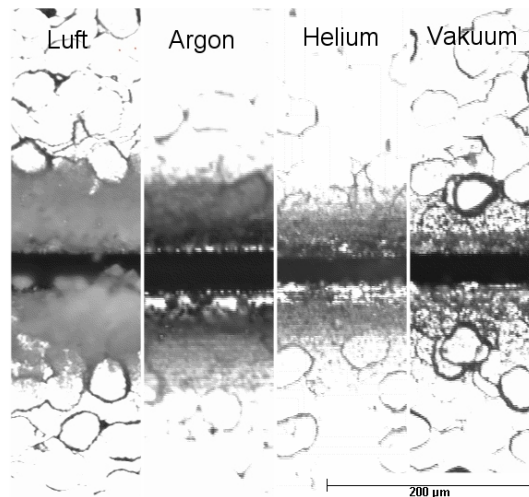


Abbildung 10.9: Ablagerungen am Strahleintritt für verschiedene Prozessgase

Die Oxidation des Siliziums konnte durch die Verwendung des Inertgases Argon nicht vollständig vermieden werden.

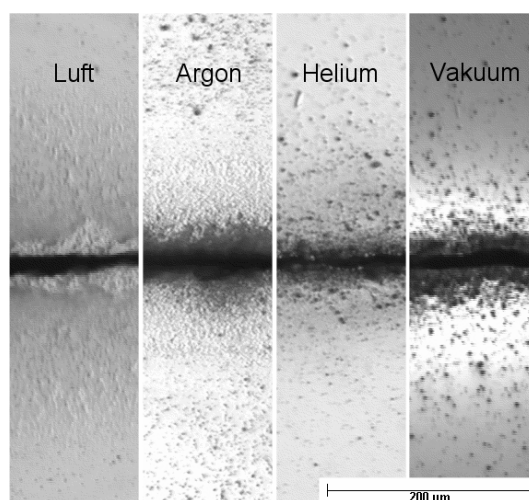


Abbildung 10.10: Ablagerungen am Strahlaustritt für die verschiedene Prozessgase

Die Auswertung des SE-Bildes im Rasterelektronenmikroskop (Abbildung 10.11) zeigt - im Vergleich zur Gasatmosphäre Luft - einen wesentlich kleineren Oxidstreifen sowie die EDX-Analyse (Abbildung 10.12) einen, aufgrund geringerer Oxidation, kleineren Sauerstoff- Peak.

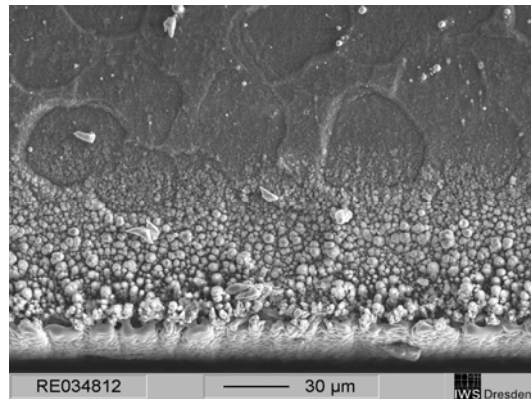


Abbildung 10.11: Sekundärelektronen (SE)-Bild (Strahleintritt) für Argon

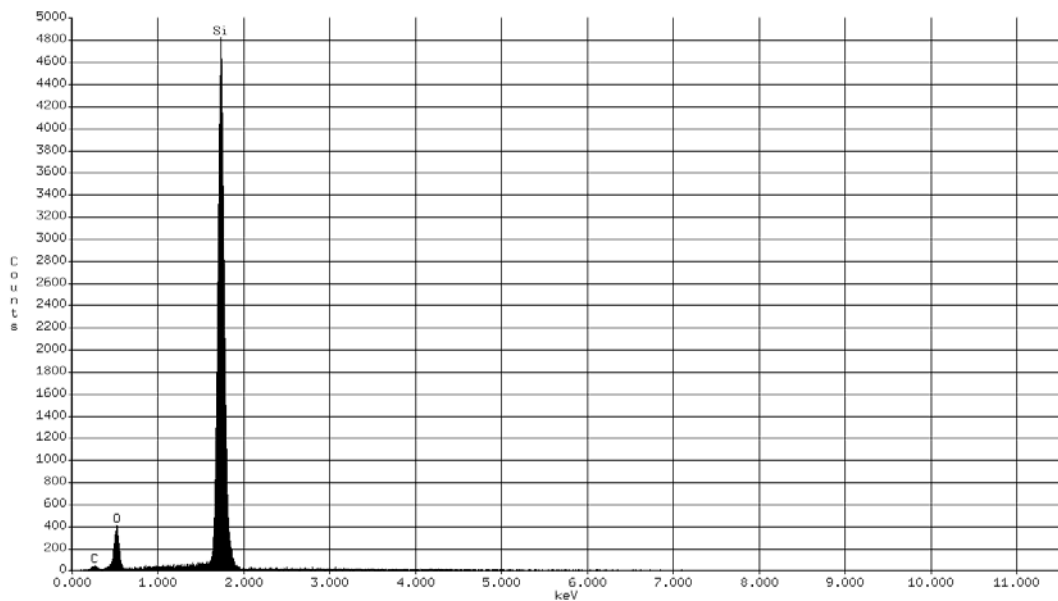


Abbildung 10.12: Quantitative EDX-Analyse der Ablagerungen (Strahleintritt) für Argon

Wie sich anhand des Profils der Linienanalyse (Abbildung 10.13 und 10.14) ableiten lässt, liegt hier eine ausgedehnte, im Vergleich zur Luftumgebung wesentlich dünnere Oxidschicht auf der Waferoberfläche vor.

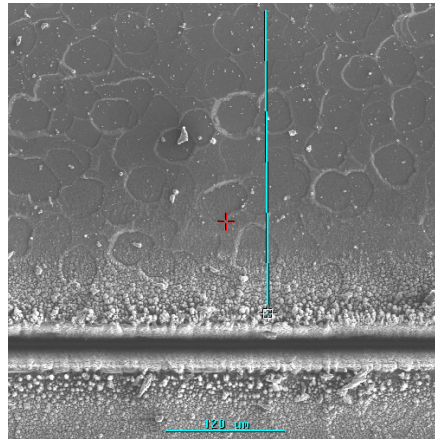


Abbildung 10.13: Sekundärelektronen (SE) –Bild (Strahleintritt) für Argon (Bezugmaße linescan)

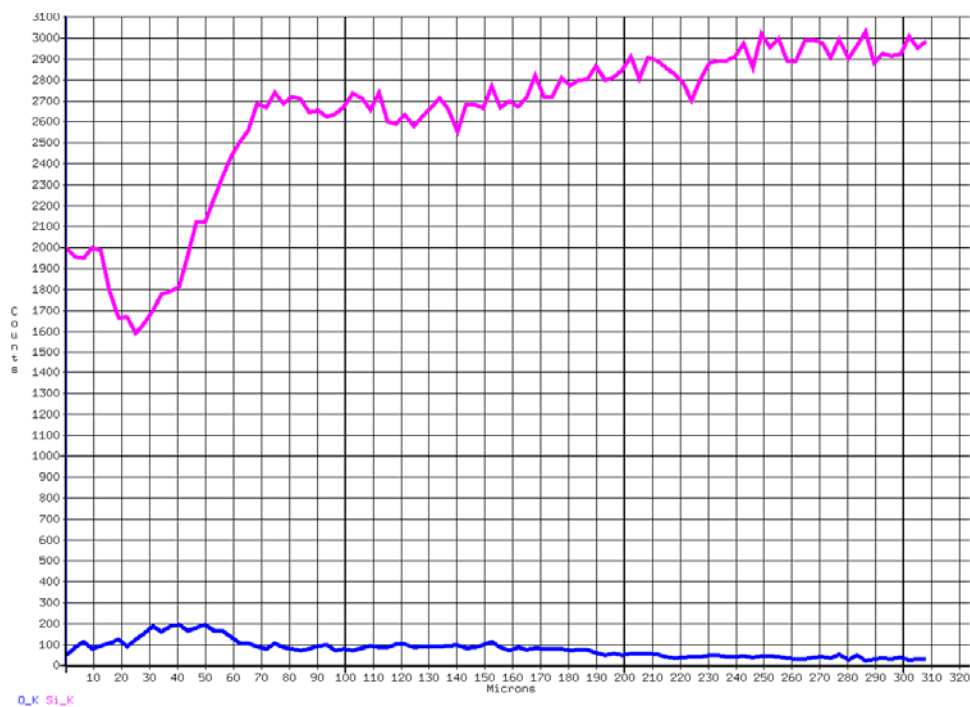


Abbildung 10.14: Linienanalyse (linescan) der Ablagerungen (Strahleintritt) für Argon

In der direkten Umgebung der Schnittkante (ca. $\pm 20 \mu\text{m}$) ist ein sprunghafter Abfall der Siliziumkonzentration zu verzeichnen. Dieser Bereich weist ebenso glatte Strukturen von erstarrter Schmelze auf, die auf einen Plasmaeinfluß hinweisen.

Dieser Plasmaeinfluß führt zu einem stärkeren Schmelzaustrieb, in geringerem Maß zur Verbrennung von Schmelzanteilen und damit zur nachweislichen Existenz von nur wenigen flüchtigen Reaktionsprodukten, d.h. geringen SiO_2 -Anteilen. Zum anderen resultiert daraus

die Entstehung einer breiteren Schnittfuge am Strahleintritt verbunden mit einer deutlichen Zunahme der Ablagerungsmenge auf der Waferoberfläche [39].

Zusammenfassung:

Siehe Kapitel 10.6 Zusammenfassung Schneiden unter Gasatmosphäre

10.4. Helium

Die Schneidexperimente unter Helium zeigen eine Schnittfugenbreite am Strahleintritt von ca. 26 μm und am Strahlaustritt ca. 6 μm . Die Schnittkanten sind im Vergleich zum Schneiden unter Luft- oder Argonatmosphäre sehr scharfkantig. Daraus ergibt sich ein Wandwinkel von minimal 2,6°. Die Schnittfugen zeigen einen geringen Materialabtrag im Silizium und damit wenig Debris. Dieser – in Form von sehr feinen Staubpartikeln - erreicht eine Ausdehnung von 213 μm am Strahleintritt (Anhang B11). Abbildung 10.15 und 10.16 zeigen einen Vergleich der Ablagerungen unter Verwendung verschiedener Prozessgase beim Schneiden.

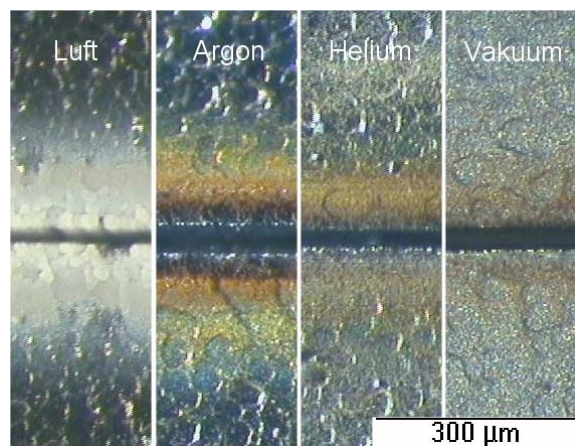


Abbildung 10.15: Ablagerungen am Strahleintritt für verschiedene Prozessgase

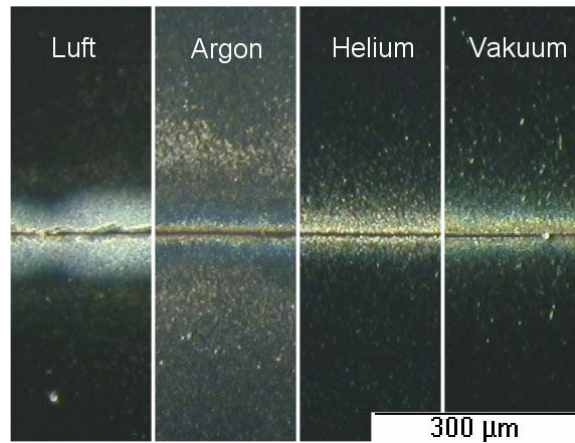


Abbildung 10.16: Ablagerungen am Strahlaustritt für verschiedene Prozessgase

Die Analyse mit REM ergab eine Reduzierung der SiO_2 -Bildung verglichen mit Argon. (Abbildung 10.17). Die Oxidschicht erstreckt sich auf ca. 180 µm und ist wesentlich dünner als unter der Argonatmosphäre.

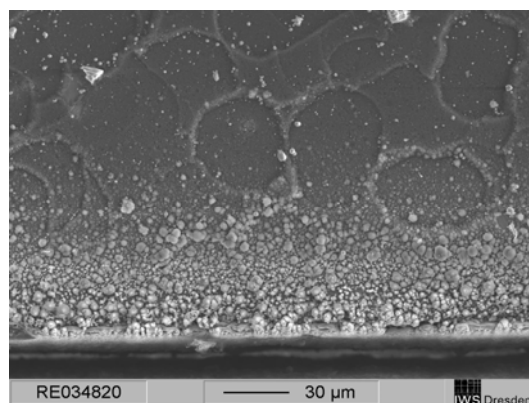


Abbildung 10.17: Sekundärelektronen -Bild (Strahleintritt) für Helium

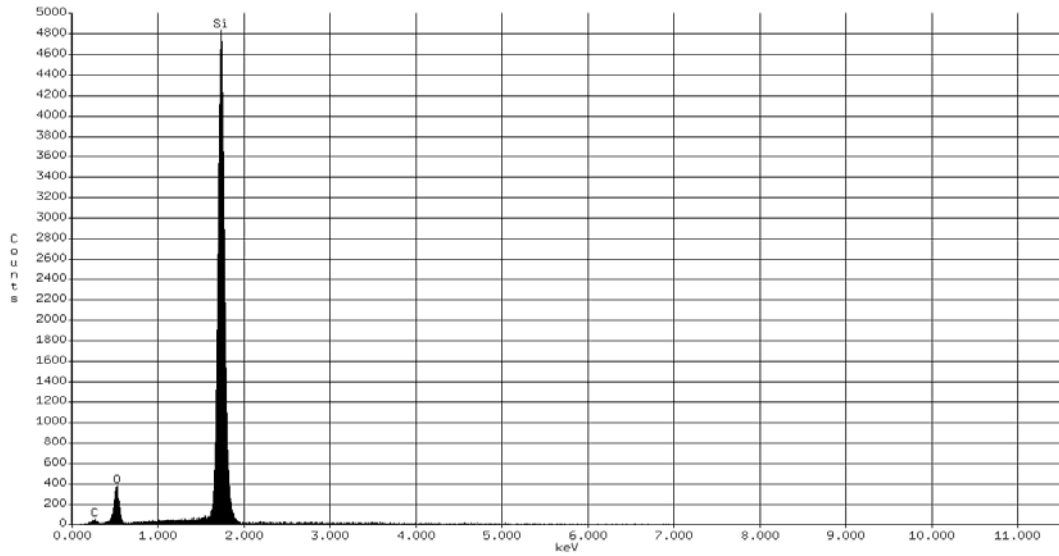


Abbildung 10.18: Quantitative EDX- Analyse der Ablagerungen (Strahleintritt) für Helium

In direkter Nähe der Schnittkante ist die Ausbildung der Oxidschicht gering. Dies zeigt die EDX Analyse mit der Peak-Höhe des O₂-Peaks in Abbildung 10.18.

Die durchgeführte Linienanalyse ergibt verglichen mit Argon eine sehr feine kontinuierliche Schmelzkante von ca. 10 µm, (Abbildung 10.19 und 10.20). Der geringere Schmelzaustrieb aus der Schnittfuge weist auf die Bildung eines Plasmas hin.

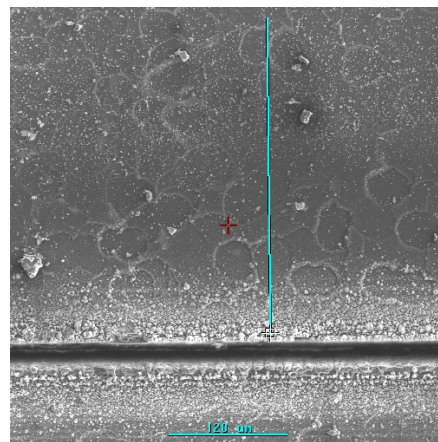


Abbildung 10.19: Sekundärelektronen-Bild (Strahleintritt) für Helium (Bezugsmaße linescan)

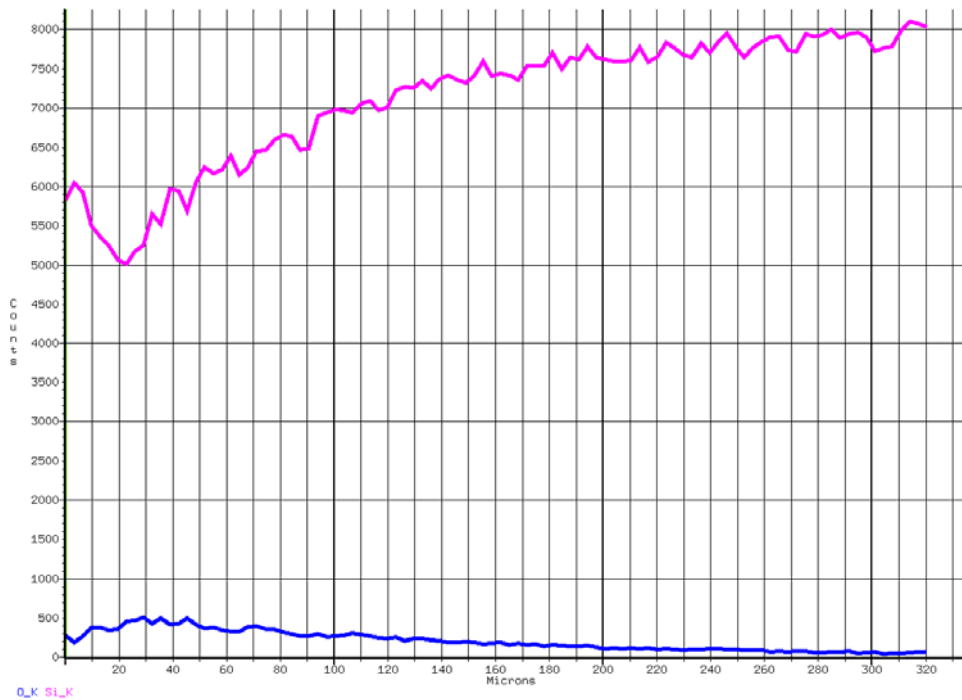


Abbildung 10.20: Linienanalyse (linescan) der Ablagerungen (Strahleintritt) für Helium

Zusammenfassung:

Siehe Kapitel 10.6 Zusammenfassung Schneiden unter Gasatmosphäre

10.5. Vakuum

Die Auswertung der Experimente unter Gasatmosphäre Luft, Argon und Helium und der Kenntnisse zum Sublimationsabtrag von Silizium lassen darauf schließen, dass eine weitere Erhöhung der Schneidgeschwindigkeit bei Unterdruck realisierbar ist. Die Experimente wurden bei einem Druck kleiner als 0,08 mbar (Feinvakuum) durchgeführt.

Die Auswertung der Schneidexperimente unter Vakuum ergaben Schnittfugen am Strahleintritt von ca. 34 μm und ca. 6 μm am Strahlaustritt (Anhang B11). Der errechnete Flankenwinkel beträgt 3,7°. Alle Parameter liegen zwischen den Parametersätzen von Argon und Helium. Die Schnittkanten sind relativ scharfkantig und zeigen geringe Ablagerungen erstarrter Schmelze. Der Debris besteht aus sehr feinen Staubpartikeln. Einige größere Staubpartikel sind am Strahlaustritt zu erkennen (Abbildungen 10.21 und 10.22).

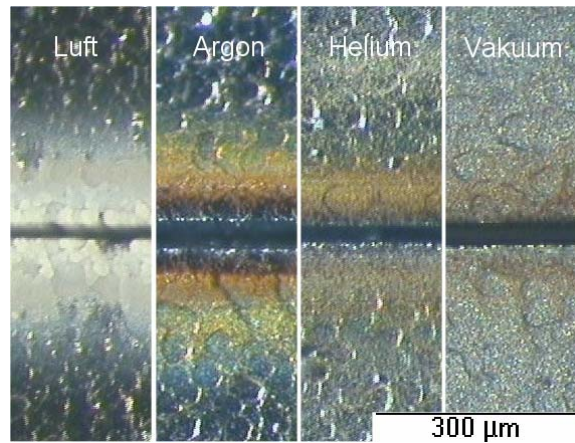


Abbildung 10.21: Ablagerungen am Strahleintritt für verschiedene Prozessgase

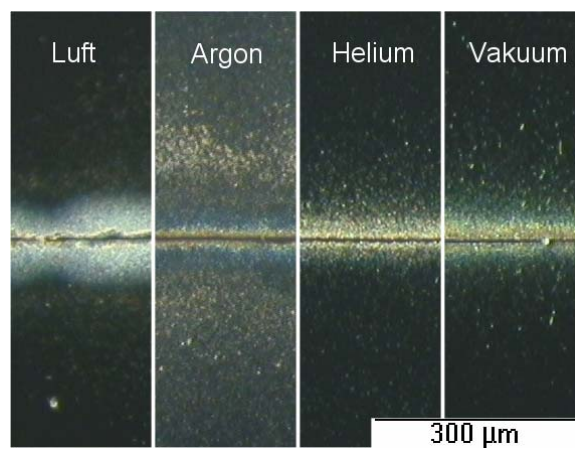


Abbildung 10.22: Ablagerungen am Strahlaustritt für verschiedene Prozessgase

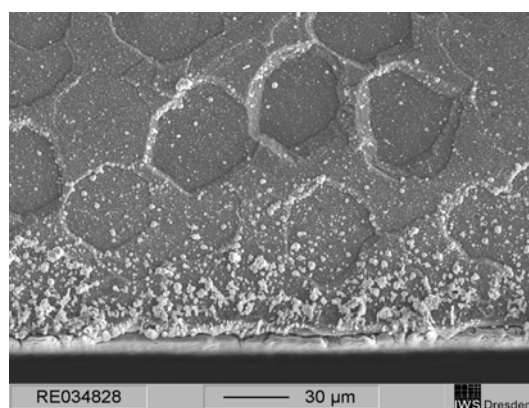


Abbildung 10.23: Sekundärelektronen -Bild (Strahleintritt) für Vakuum

Eine bräunliche Färbung (Abbildung 10.21 und 10.22) der feinen Staubpartikel und geringfügige Schmelzablagerungen im SE-Bild (Abbildung 10.23) lassen trotz der Vakuum-Atmosphäre auf einen Anteil an Sauerstoff im Vakuum schließen.

Die quantitative Auswertung mittels EDX Analyse zeigt einen relativ hohen Peak für Sauerstoff (Abbildung 10.24). Dieser ist vergleichbar mit den Schneidergebnissen unter Luftatmosphäre.

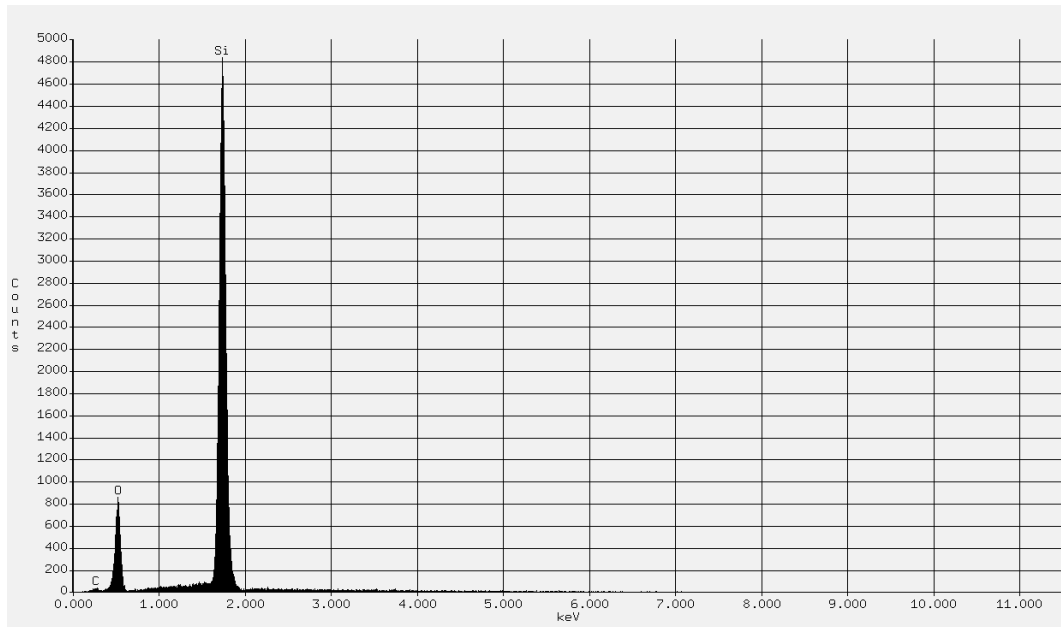


Abbildung 10.24: Quantitative EDX- Analyse der Ablagerungen (Strahleintritt) für Vakuum

Die Linienanalyse (Abbildung 10.25 und 10.26) ergibt, dass die Oxidschicht beginnend an der Schnittkante bis zu einem Abstand von 30 μm anwächst.

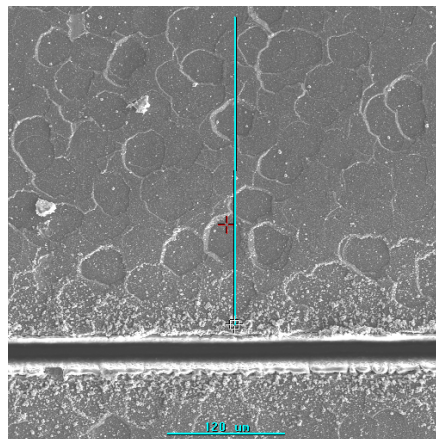


Abbildung 10.25: Sekundärelektronen -Bild (Strahleintritt) für Vakuum (Bezugsmaße linescan)

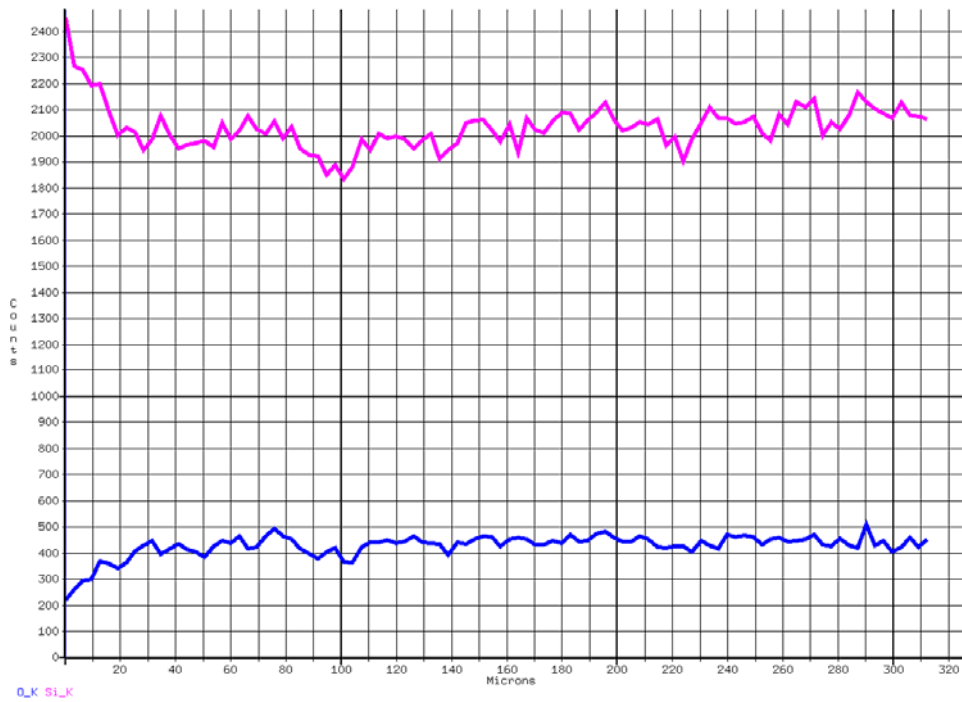


Abbildung 10.26: Linienanalyse (linescan) der Ablagerungen (Strahleintritt) für Vakuum

Zusammenfassung:

Siehe Kapitel 10.6 Zusammenfassung Schneiden unter Gasatmosphäre

10.6. Zusammenfassung Schneiden unter Gasatmosphäre

Die Experimente zeigen, dass das umgebende Atmosphärgas auf die Schneidgeschwindigkeit sowie die Schnittqualität beim Schneiden von Silizium mit Laserstrahlung Einfluss hat (Anhang B.11). Maximale effektive Schneidgeschwindigkeiten konnten unter Heliumatmosphäre und Feinvakuum realisiert werden (Abbildung 10.27). Aufgrund eines kleineren Plasmas unter Heliumatmosphäre – verglichen mit Feinvakuum – wurde infolge einer geringeren Absorption des Laserstrahls im Plasma höhere effektive Schnittgeschwindigkeiten erzielt. Diese bewirkt eine um 8 μm kleinere Schnittfugenbreite unter Heliumatmosphäre.

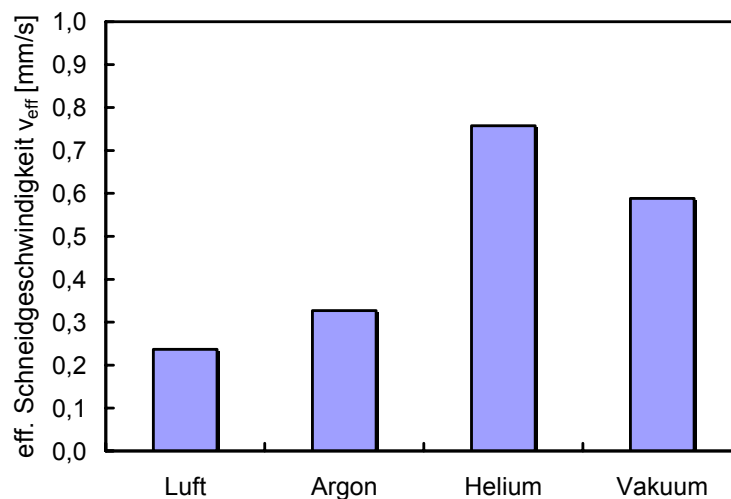


Abbildung 10.27: effektive Schneidgeschwindigkeit unter verschiedenen Gasatmosphären

Alle Experimente zeigen im Ergebnis des Schneidprozesses, dass die Siliziumwaferoberflächen mit Staubpartikeln – auch in größerem Abstand von der Schnittfuge – kontaminiert sind. Diese Staubpartikel bestehen vorwiegend aus Siliziumoxid. Ursache hierfür können in der Unreinheit der Gase oder Restbestandteile von Sauerstoff im Vakuum sein. Ein Nachoxidieren der Proben bei Raumtemperatur kann ausgeschlossen werden.

Ein Vergleich der Schnittqualität zeigt Vorteile für die Gasatmosphären Argon und Helium. Hier beschränkt sich der Debris auf einer Ausdehnung von ca. 30 μm bis 50 μm (im Vergleich Luft ca. 200 μm). Beim Schneiden von Silizium unter Inertgasatmosphäre (Argon, Helium) oder Vakuum entsteht ein sehr feinkörniger Debris, verglichen mit Schneiden unter Luft. An einem unter Luft geschnittenen Wafer beschränkt sich die erstarrte Siliziumschmelze sehr stark auf den Bereich nahe der Schnittfuge.

Bei Verwendung von Inertgasatmosphäre ist festzustellen, dass die Partikelgröße mit Entfernung von der Schnittfuge steigt. Die Dichte der Ablagerungen nimmt mit größer werdender Entfernung von der Schnittfuge ab.

Die Schnittfugenbreiten am Strahlaustritt verhalten sich umgekehrt proportional zur Schneidgeschwindigkeit (Abbildung 10.28). Die kleinste Schnittfugenbreite wurde in Helium erzielt. Alle Schnittgeometrien zeigen positive Konizität.

Der qualitative Vergleich für kleine Schnittfugenbreite, geringe Ablagerungsausdehnung und kleiner Flankenwinkel zeigt, dass eine Heliumatmosphäre geeignet ist (Abbildung 10.21).

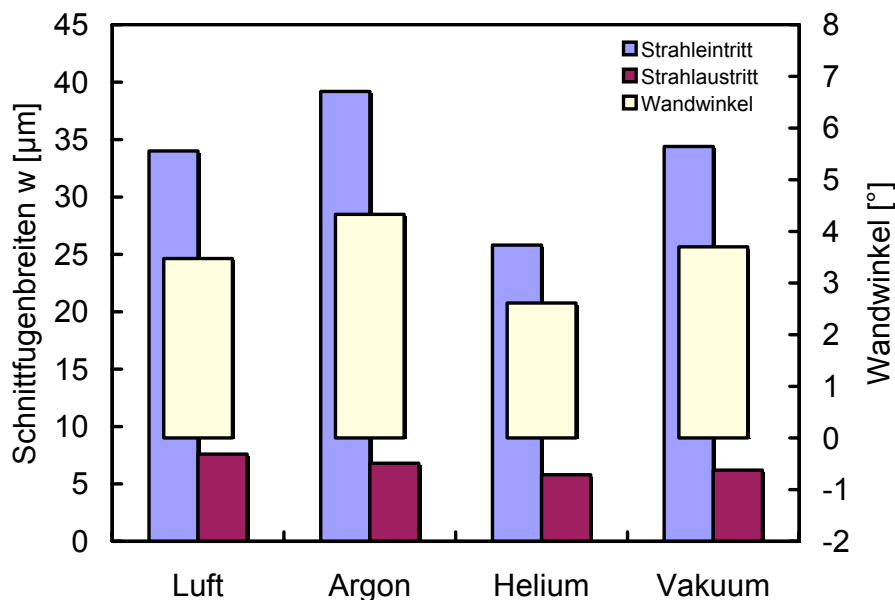


Abbildung 10.28: Schnittfugenbreiten und Wandwinkel in Abhängigkeit der Gasatmosphäre

Die Bearbeitungsergebnisse unter verschiedenen Gasatmosphären basieren auf den jeweiligen thermischen Eigenschaften der verwendeten Gase. Diese beeinflussen den Wärmetransport aus der Wechselwirkungszone und damit den zeitlichen Verlauf des Abkühlungsprozesses.

Das Schneiden unter Vakuum zeigt die Abhängigkeit des Siedepunktes von Silizium vom Umgebungsdruck. Im Feinvakuum sinkt der Siedepunkt auf die Hälfte des ursprünglichen Wertes, was ein schnelleres Verdampfen zur Folge hat.

Helium bietet aufgrund des höchsten Wärmeleitungskoeffizienten beste Voraussetzungen für einen optimalen Schneidprozess ([2],[8],[14],[39]).

Luft

Die Experimente ergaben, dass eine hohe Anzahl an Überfahrten (211) notwendig sind um den Siliziumwafer zu trennen (Anhang B 11). Dabei wurden effektive Schneidgeschwindigkeiten von 0,24 mm/s erzielt werden.

Argon

Unter Argonatmosphäre konnten effektive Schneidgeschwindigkeiten von 0,33 mm/s erzielt werden. Im Vergleich zu Luft ist dies eine Steigerung von 25 %.

Helium

Die höchste effektive Schneidgeschwindigkeit mit 0,76 mm/s wurde unter der Helium Atmosphäre erreicht. Im Vergleich zu Luft bedeutet dies eine Steigerung von ca. 65 %.

Vakuum

Es konnten Schneidgeschwindigkeiten von ca. 0.59 mm/s erzielt werden. Diese liegen 55% oberhalb derer von Luft und nur geringfügig unter der Schneidgeschwindigkeit von Helium

11. Zusammenfassung und Ausblick

Ziel der vorliegenden Arbeit war, den Einfluss verschiedener Laserparameter sowie Prozessparameter zur Steigerung der Schneidgeschwindigkeit von Siliziumwafern mit UV-Kurzpuls-Lasern aufzuzeigen.

Dazu war es erforderlich, die Wirkungsweise der einstellbaren Bearbeitungsparameter des Lasers wie Wellenlänge, Polarisierung, Leistung, Pulswiederholfrequenz und Fokussierung auf das Bearbeitungsergebnis (Schneidgeschwindigkeit, Schnittqualität) zu untersuchen. Weiterhin wurden Experimente mit unterschiedlichen Werkstoffparametern, Verfahrensparametern und der Einfluss der Gasatmosphäre durchgeführt.

Zur Beurteilung der Schnittqualität wurden die oberflächlichen Spuren des Materialabtrags (Schnittfugegeometrie, Erscheinung und Zusammensetzung der Ablagerungen) qualitativ und quantitativ erfasst.

Die Auswertungen der Untersuchungen zeigen, dass sich der UV-Kurzpuls-Laser insbesondere für kleinere Materialdicken von ca. 210 μm zum effizienten Schneiden eignet. Werkstoffeigenschaften wie die Kristallorientierung und die Oberflächenbeschaffenheit zeigen nur einen geringfügigen Einfluss auf Schneidgeschwindigkeit und Qualität.

Das Schneiden mit linear polarisierter Laserstrahlung parallel zur Schneidrichtung ermöglicht höhere Schneidgeschwindigkeiten verbunden mit geringen Schnittfugenbreiten – verglichen mit zirkular polarisierter Laserstrahlung.

Mit Zunahme der Laserleistung steigt auch die Schneidgeschwindigkeit. Parallel dazu erfolgt die Ausbildung breiterer Schnittfugen, was sich negativ auf die Qualität des Schnittes auswirkt.

Die Erhöhung der Pulsfolgefrequenz bewirkt einen Anstieg der Schneidgeschwindigkeit. Auf die Qualität der Schnittfuge hat dieser Parameter geringen Einfluss.

Die optimale Fokussierung in Bezug einer Maximierung der Schneidgeschwindigkeit wurde mit 0,15 mm negativer Defokussierung erreicht. Ist die Qualität (geringe Schnittfugenbreiten, parallele Schnittflächen) ausschlaggebend wurde dies mit einer negativen Defokussierung von ca. 0,40 mm erreicht. Das bedeutet bei einem 336 μm dicken Wafer eine Fokussierung von 36 μm unterhalb des Wafers.

Die Untersuchungen mit Scanner und Festoptik zeigen, dass für große Relativgeschwindigkeiten (> 16 mm/s) der Einsatz von Scannertechnologie günstiger ist. Für kleine Relativgeschwindigkeiten ($< 0,25$ mm/s; konturabhängig) der Einsatz von Festoptik mit einer Tischsteuerung zu bevorzugen ist. Eine maximale Schneidgeschwindigkeit von $0,83$ mm/s wurde mit Scanner und einer Scangeschwindigkeit von 300 mm/s erzielt. Mit zunehmender Scangeschwindigkeit steigt die Schneidgeschwindigkeit. Bei einer Scangeschwindigkeit von 75 mm/s tritt eine einseitige Schnittfugenverbreiterung auf der Strahlaustrittsseite auf. Diese bewirkt einen Paradigmenwechsel des Wandwinkels.

Korngröße, Porosität und Ausdehnung des Debris verhalten sich für beide Technologi in Abhängigkeit der Scan- bzw. Relativgeschwindigkeit ähnlich. Das Verhältnis zwischen Schmelz- und Sublimationsschneiden im Schneidprozess bestimmt die Form des Debris ob dieser als stark oxidiertes Schmelzaufwurf und/oder als feiner Staubpartikel vorliegt. Die Menge der Ablagerungen korrespondiert mit der Waferdicke und der Schnittfugenbreite. Alle Proben weisen auch in größerem Abstand von der Schnittfuge (cm-Bereich) Partikelkontaminationen auf.

Der Einsatz verschiedener Gasatmosphären zeigt, dass ein vollständiges Vermeiden der Oxidbildung nicht erzielt werden kann. Die höchste effektive Schneidgeschwindigkeit mit $0,76$ mm/s und sehr guter Schneidqualität wurde unter der Helium Atmosphäre erreicht. Im Vergleich zu Luft bedeutet dies eine Steigerung von ca. 65% . Die Experimente zeigen weiterhin eine Tendenz zu größeren Schneidgeschwindigkeiten und größeren Schnittfugenbreiten mit Reduzierung des Umgebungsdrucks (Vakuum).

Weiterführend sollten die Auswirkung verschiedener Pulslängen und Brennweiten der Bearbeitungsoptik untersucht werden. Durch eine automatische Fokuspachführung ist eine weitere Steigerung der Schneidgeschwindigkeit denkbar. Dies ist vor allem bei der Bearbeitung dickerer Materialien (> 300 μm) durch konstante Intensitäten in der Schnittfuge zu prognostizieren. Zum Schneiden dickerer Wafer sind verschiedene Scantechnologien (Wobble) und der Einfluss eines Sprühwasserfilmes auf der Waferoberfläche zu untersuchen.

Ein weiterer Schwerpunkt zukünftiger Untersuchungen sollte die Reduzierung des Debris sein. Diese Ablagerungen können erzeugte Halbleiterstrukturen zusetzen und in ihrer Funktion beeinträchtigen oder sich störend auf weitere Technologieschritte wie beispielsweise das Bonden auswirken. Hier könnten die Erfahrungen des Trennens

mit Wafersäge genutzt werden. Bei diesem klassischen Trennverfahren wird die Oberfläche des Wafers mit einer Schutzfolie oder Schutzschicht versehen. Während des Sägens erfolgt ein kontinuierliches Spülen mit Wasser. Diese Erkenntnisse – zur Verbesserung der Schnittqualität - gilt es in weiterführenden Untersuchungen auf die Lasertechnik zu übertragen.

Erste Untersuchungen zum Schneiden von Siliziumwafern mit gepulsten Faserlaser zeigen, dass dieser zum Schneiden von Siliziumwafern geeignet ist. Die Vorteile des Faserlasers sollten in weiterführenden Untersuchungen mit den Ergebnissen dieser Arbeit weiter vertieft werden. Abbildung 11.1 zeigt die Schnittkante eines 550µm dicken Siliziumwafer. Dieser wurde mit einem gepulsten Faserlaser „IPG 1/100/20“ und Scanner-System getrennt. Die Parameter des Lasers sind:

- Wellenlänge: 1060-1070nm
- Leistung: 20 W
- Pulsenergie 1 mJ
- Pulsdauer: 100 ns
- Pulswiederholfrequenz: 20-100kHz
- Strahlqualität: $M^2=1,4$

Die Abtragsraten für diesen Laser betragen 0,29µm pro Überfahrt. Verglichen mit dem Power Gator 355 mit einer Abtragsrate von 0,5µm pro Überfahrt zeigt dies die Notwendigkeit einer Frequenzvervielfachung von Faserlasern mit kürzeren Pulsen als derzeit kommerziell verfügbar.

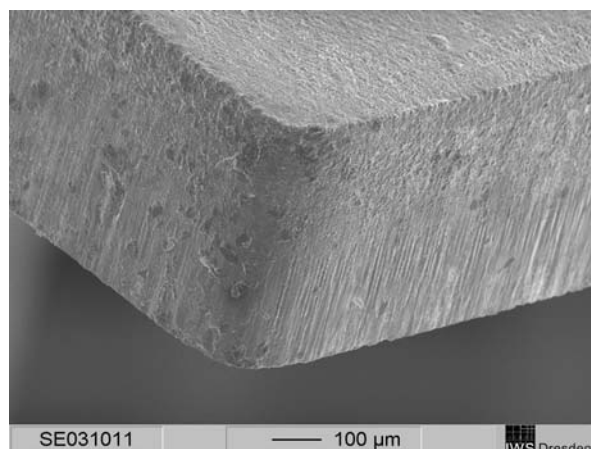


Abbildung 11.1: Schnittkante eines 550 µm dicken Siliziumwafers

Literaturverzeichnis

Bücher, Tagungsbände, Zeitschriftenbände, Hochschulschriften, Forschungs- und Entwicklungsberichte

- [1] BENEKING, HEINZ: *Halbleiter-Technologie : eine Einführung in die Prozesstechnik von Silizium und III-V-Verbindungen*. Stuttgart : Teubner, 1991. - ISBN 3-519-06133-3

- [2] BERGMANN, H. W. (Bearb.): *Laser in der Materialbearbeitung Bd. 5 : Präzise optische Bearbeitung von Festkörpern : Oberflächenbearbeitung*. Düsseldorf : VDI-Verl., 1996. - ISBN 3-18-401599-8

- [3] BEYER, ECKHARD (Red.): *Laser in der Materialbearbeitung. Bd. 1 : Schneiden mit CO₂-Lasern*. Düsseldorf : VDI-Verl., 1993. - ISBN 3-540-62246-2

- [4] BIMBERG, DIETER (Mitverf.): *Kontakt und Studium. Bd. 13 Elektronik : Laser in Industrie und Technik : Grundlagen, Materialbearbeitung, Umweltschutz, Holographische Methoden in Messtechnik und Datenverarbeitung*. Sindelfingen : expert, 1985. - ISBN 3-88508-879-7

- [5] BLIEDTNER, J.; SCHOELE, H.; MÖLLER, K.: Laserstrahltrennen von Siliziumsubstraten. In: DVS-Bericht 221: *Moderne Lasertechnologien und ihre Anwendungen (2002)*, S. 249-251. - ISBN 3-87155-678-5

- [6] CORBOLINE, TOM; REA, EDWARD C.; DUNSKY, COREY: High Power UV Laser Machining of Silicon Wafers. In: Proc. of SPIE Vol. 5063: *Laser Precision Microfabrication (2003)*, S. 495-500. - ISBN 0-8194-4869-9

- [7] DÄNDLIKER, RENÉ: *Eine kurze Einführung in die Physik und Terminologie der Laser (Laser-Kurzlehrgang); Erläuterung der wichtigsten Begriffe aus dem Bereich der Gas-, Festkörper-, Farbstoff- und Halbleiterlaser sowie der Nichtlinearen Optik und der Holographie*. Aarau [u.a.] : AT-Verl., 1989. - ISBN 3-85502-379-4

- [8] DAUER, STEFAN: *Berichte aus der Mikro- und Feinwerktechnik*. Bd. 3 : Nd:YAG-Laserstrukturierung in der Silizium-Mikromechanik. Braunschweig, Technische Universität Braunschweig, Maschinenbau und Elektrotechnik, Dissertation, 1999. - ISBN 3-8265-4978-3/ ISSN 1433-1438
- [9] v. Almen Martin : *Laser Beam Interactions with Materials*; Bern 1984
- [10] ENGEMANN, BERND K.; et al.: *Kontakt und Studium*. Bd. 362 Verfahrenstechnik : *Schneiden mit Laserstrahlung und Wasserstrahl : Anwendung, Erfahrungen, Ausblick*. Ehningen bei Böblingen : expert, 1993. - ISBN 3-8169-0748-2
- [11] GROPP, ARMIN (Red.): *Laser in der Materialbearbeitung*. Bd. 3 : *3D-Bearbeiten mit CO₂-Hochleistungslasern*. Düsseldorf : VDI-Verl., 1995. - ISBN 3-18-401520-3
- [12] HERZIGER, GERD: *Anwendungen und Perspektiven der Lasertechnik*. In: *Vorträge Rheinisch-Westfälische Akademie der Wissenschaften: Natur-, Ingenieur- und Wirtschaftswissenschaften; Vorträge N380*. Opladen : Westdt. Verl., 1990. S. 7-45. - ISBN 3-531-08380-5/ ISSN 0066-5754
- [13] HILLERINGMANN, ULRICH: *Teubner Studienbücher. Elektrotechnik : Silizium-Halbleitertechnologie*. Leipzig : Teubner, 2002. - ISBN 3-519-20149-6
- [14] HÜGEL, HELMUT: *Teubner Studienbücher. Maschinenbau : Strahlwerkzeug Laser: Eine Einführung*. Stuttgart : Teubner, 1992. - ISBN: 3-519-06134-1
- [15] KAMUSELLA, ALFRED: *Vorlesung Konstruktionstechnik : Numerische Optimierung im Konstruktionsprozess*. Dresden, Technische Universität Dresden, Feinwerktechnik und Elektronik-Design, Vorlesungsskript, 2003.
URL: http://www.ifte.de/lehre/konstruktionstechnik/2003_04/index.html
(2004-02-11)
- [16] KAUFMANN, THOMAS; Frauenhoffer, Frank; Dorner, Johann: *Laser water-jet based dicing*. In: *European Semiconductor*, Bd. 22 (2000), Nr. 4, S. S109-S110. - ISSN 0265-6027

- [17] KLOTZBACH, UDO; PANZNER, MICHAEL; KASPAR, JÖRG: Processing of silicon by Nd:YAG-lasers with harmonics generation. In: Proc. of SPIE Vol. 4637: *Photon Processing in Microelectronics and Photonics* (ICALEO 2002, 2002), S. 496-504. - ISBN 0-8194-4376-X
- [18] LEI, WEISHENG; HU, WENTAO; FU, QIANG: Micro-machining applications of green (second harmonic) solid state lasers in the electronics manufacturing industry. In: *ICALEO 2001* (2001), S. 1731-1736. - ISBN 0-912035-730
- [19] MICHL, PETER: *Beschriften mit Lasern*. Düsseldorf : VDI-Verl., 1992. - ISBN 3-18-400990-4
- [20] O'MARA, WILLIAM C.; HERRING, ROBERT B.; HUNT, LEE PHILIP: *Handbook of semiconductor silicon technology*. New Jersey : Noyes Publications, 1990. - ISBN 0-8155-1237-6
- [21] PFLEGING, W.; SCHALLER, TH.: Mikromaterialbearbeitung durch spanabhebende und lasergestützte Verfahren. In: *Nachrichten - Forschungszentrum Karlsruhe*, Jahrgang 34 (2002), S. 21D-22D
- [22] PIKORZ, W.; SCHLÜTER, P.: Siliziumscheiben mit dem Festkörperlaser schneiden. In: *Laser-Praxis*, Juni (1991), S. LS48-LS50. - ISSN 0937-7069
- [23] RICHERZHAGEN, BERNOLD: Cool heat that cuts (laser wafer dicing). In: *European Semiconductor*, Bd. 23 (2001), Nr. 8, S. 89-90. - ISSN 0265-6027
- [24] RICHERZHAGEN, BERNOLD: The waterjet-guided laser in wafer cutting. In: *Future Fab International*, 06/99 (1999). URL: http://www.synova.ch/pdf/2000_Korea_Swit.pdf
- [25] POPRAWE, REINHARDT; TEBBEN, KARSTEN; ZWEYDINGER, PETER: Laseranwendungen in der Mikrotechnik. In: *>>inno<< Innovative Technik - Anwendungen aus Nordrhein-Westfalen : Lasertechnik ; Laser und Mikrosystemtechnik - industrielle Systemlösungen mit Licht*, 6. Jahrgang (2001), Nr. 18, S. 4-19
- [26] RÜHL, F.; TREUSCH, H. G.: *Die Bibliothek der Technik*. Bd. 5 : *Industrielaser* :

Einführung mit Anwendungsbeispielen. Landsberg/Lech : moderne industrie, 1987. - ISBN 3-478-93005-7

- [27] STÜRMER, MARTIN: *Materialabtrag mit Nd:YAG-Lasern.* Düsseldorf : VDI-Verl., 1995 (Fortschr.-Ber. VDI Reihe 2: Fertigungstechnik Nr. 352). - ISBN 3-18-335202-8/ ISSN 0178-9406
- [28] TREUSCH, HANS-GEORG (Bearb.): *Laser in der Materialbearbeitung.* Bd. 7 : *Abtragen, Bohren und Trennen mit Festkörperlasern.* Düsseldorf : VDI-Technologiezentrum Physikalische Technologien, 1997. - ISBN 3-00-002233-3
- [29] TÖNSHOFF, H. K.; OSTENDORF, A.; WAGNER, T.: Structuring silicon with femtosecond lasers. In: Proc. of SPIE Vol. 4274: *Laser Applications in Microelectronic and Optoelectronic Manufacturing VI* (2001), S. 88-97. - ISBN 0-8194-3952-5
- [30] ULIERU, DUMITRU G.: The comparative analysis of silicon wafers micromachining versus nonconventional technology. In: Proc. of SPIE Vol. 4557: *Micromachining and Microfabrication Process Technology VII* (2001), S. 371-377. - ISBN 0-8194-4285-2
- [31] WAGNER, FRANK; RICHERZHAGEN, BERNOLD: Wasserspiele: Wasserstrahlgeführtes Laserlicht bearbeitet empfindliche Materialien. In: *Laser-Praxis*, Juni (2001), Nr. 2, S. 22-24. - ISSN 0937-7069
- [32] ZENGERLE, ROLAND: *Mikrosystemtechnik 2 : Aufbau- und Verbindungstechnik 1.* Freiburg, Universität Freiburg, Mikrosystemtechnik, Vorlesungsskript, 2002 [23]
- [33] ZENGERLE, ROLAND: *Mikrosystemtechnik 1 : 2. Materialien der Mikrosystemtechnik.* Freiburg, Universität Freiburg, Mikrosystemtechnik, Vorlesungsskript, 2002 / 2003 (2003-11-27)
- [34] Fa. DISCO HI-TEC EUROPE:
diverse Herstellerinformationen/Produktdatenblätter
URL:<http://www.discoeuropa.com/en/products/start.asp?lan=en&proid=2&proid1=2>
(2003-11-27)

- [35] Fa. Laser- und Medizin-Technologie Berlin:
diverse Herstellerinformationen/Produktdatenblätter
URL:http://www.lmtb.de/lt/images/pdf_fuer_tabelle/angebotsbeispiele_pdf/mikroritze_n.pdf (2003-11-27)
- [36] Fa. SYNOVA SA: *A bright idea that puts the competition in the shade*; Comparison Water jet - Laser - Microjet®
URL:http://www.synova.ch/pdf/2000_Korea_Swit.pdf (2003-11-27)
- [37] Fa. SYNOVA SA: diverse Herstellerinformationen/Produktdatenblätter:
URL:<http://www.synova.ch> (2003-11-27)
- [38] Fa. ALSI: diverse Herstellerinformationen/Produktdatenblätter
URL:<http://www.alsi-international.com/pages/basis.htm> (2003-11-27)
- [39] Mälzer, Stephanie: Mikromaterialbearbeitung von Siliziumwafern mit diodengepumpten frequenzverdreifachten Nd:YAG-Laser, Westsächsische Hochschule Zwickau FH, Fraunhofer IWS Dresden, Diplomarbeit 04/2004
- [40] Reinert, Wolfgang: Verfahren zur Verarbeitung dünner Siliziumchips, productronic 11/2003
- [41] W. Menz , J. Mohr J. ; Mikrosystemtechnik für Ingenieure, VCH A Wiley company Verlag; 2., erweiterte Auflage 1997
- [42] Martin von Allmen, Laser – Beam Interactions with Materials. Bern: 1994
- [43] Weichenhain Ruth, Einfluss von Pulsdauer und Wellenlänge auf die Laser Mikromaterialbearbeitung von Keramiken, Dissertation RWTH Aachen 2002
- [44] Rofin Sinar Laser: Einführung in die industrielle Lasermaterialbearbeitung. Hamburg: 1997
- [45] J. Eichler: Laser; Bauformen, Strahlführungen, Anwendungen. Springer Verlag 5. Auflage, Berlin: 2003

- [46] Ochélio SIBAILLY, Frank WAGNER, Laetitia MAYOR, and Bernold Richerzhagen, High precision laser processing of sensitive materials by Microjet®, Synova SPIE International Symposium on Laser Precision Micrifabrication
- [47] Synova SA, Innovative Laser Systems Informations- CD, März 2003
- [48] Klotzbach Udo, Panzner Michael, Franke Volker, Kuntze Thomas, Kasper Jörg, Wust Hendrik, Beyer Eckhard
Jenaer Lasertagung 2002, Mikromaterialbearbeitung von Halbleitermaterialien mit frequenzvervielfachten Nd:YAG Laser
- [49] Küchling Horst Taschenbuch der Physik München 1999
- [50] Rutherford Lexikon der Elemente <http://www.uniterra.de/rutherford>
- [51] Rofin Sinar Einführung in die Industrielle Lasermaterialbearbeitung Hamburg 1997
- [52] Eichler J.; Laser, Bauformen, Strahlführungen, Anwendungen; 5. Auflage Springer Verlag Berlin 2001
- [53] Beyer Eckhard, Lasersystemtechnik , Technische Universität Dresden, Vorlesungsskript
- [54] Kaspar Jörg; Vergleichende Untersuchung der beim Bohren mit unterschiedlichen Kurzpulslasern in Silizium-Einkristallen hervorgerufenen Strukturveränderungen; TU Dresden Fakultät Mathematik und Naturwissenschaften Diplomarbeit Dresden 1996
- [55] A. Lenk, Dissertation, Department of mathematics and natural sciences, Technical University Dresden, Dresden 1996
- [56] Fa. Lambda Physik; DPSSL Micro machining for Hard Materials, Göttingen 2002

Normen

- [57] DIN EN ISO 9013:2002 (D) 09.02/07.03. *Thermisches Schneiden : Einteilung*

thermischer Schnitte: Geometrische Produktspezifikation und Qualität

- [58] DIN 2310:1991 Teil 6 02.91. *Thermisches Schneiden - Einteilung, Verfahren*
- [59] DIN EN 12584 06.99/03.99. Unregelmäßigkeiten an Brennschnitten, Laserstrahlschnitten und Plasmaschnitten - Terminologie

Anhang A

Synopse zu Trennverfahren von Siliziumwafern [39]

Eigenschaft	Wafersägen (Trennschleifen)	Laserstrahl-Schneiden (1963)	Wasserstrahl-geführter Laser Laser-MicroJet® (1994)	Wasserstrahl-Schneiden (1970) Hochdruck- Wasserstrahl-Schneiden	Ritzen & Brechen	Laser (Holographie)	Ergebnisse mit dem GATOR UV/ POWER GATOR UV
Energieeintrag bzw. Werkzeug	Kreissäge	Gaslaser (CO ₂ -Laser), Excimer-Laser, Festkörperlaser (Nd:YAG)	Festkörperlaser (Nd:YAG, gepulst, Dauerstrich, multi-mode, mono-mode)	Hochdruckpumpe (3000 - 4000 bar)	entsprechend verwendetem Ritzverfahren (Laserritzen, Diamantritzen, Wafersäge, Ätzen)	Festkörperlaser (Nd:YAG, gepulst)	Festkörperlaser (Nd:YAG, gepulst)
Energiequelle, Energieträger bzw. Werkzeugeigenschaften	rotierendes Sägeblatt mit geringem Durchmesser	Laser-Licht (Nd:YAG: 1064 nm, 532 nm, 355 nm)	Laser-Licht (nicht der Wasserstrahl) (Nd:YAG: 1064 nm, 532 nm, 355 nm)	Hochdruck-Wasserstrahl		Laser-Licht Wellenlänge: 1060 nm Pulsdauer: einige 100 ns	Laser-Licht Wellenlänge: 355 nm Pulsdauer: 15 ns Pulswiederholrate: ca. 10 kHz
Energieübertragung bzw. Verfahren	abrasives Sägen	Faserübertragung, Strahlführung durch Spiegel (fliegende Optik)	Lichtleitung durch Wasserstrahl, optische Faser/Faserübertragung (Länge: 10 m)	Hochdruckschläuche	<u>Laserritzen:</u> kurzgepulste Festkörperlaser hervorragender Strahlqualität mit sehr kleinem Fokusbereich		
Materialaustrieb	durch Wasserspülung	ggf. durch zusätzlichen Gasstrahl	durch laminaren Wasserstrahl Wasserdruck: 20 - 500 bar Wasserstrahlgeschw.: bis zu 300 m/s (bei 500 bar) Flußrate: 5 - 100 ml/min	per Hochdruck-Wasserstrahl			
typische Leistungs-Kenngrößen bzw. Verfahrensmerkmale		typische Strahl-Ausgangsleistungen auf dem Werkstück: Nd:YAG-Laser: 100 - 400 W (bei 1064 nm) CO ₂ -Laser: 1500 - 2800 kW	typische Strahl-Ausgangsleistungen auf dem Werkstück: Nd:YAG-Laser: 100 - 300 W (bei 1064 nm) durchschnittliche Ausgangsleistung: 200 W Pulsdauer: 0.1 - 0.3 ms Nd:YAG-Laser (355 nm): durchschnittl. Ausgangsleistung: 10 W Pulsdauer: 15 +/- 3 ns Wafer-Befestigung/ Fixierung: LaserTape®	typische Strahl-Ausgangs- leistungen auf dem Werk- stück: 4 - 17 kW (bei: 4000 bar)	<u>Diamantritzen:</u> geeignete Wahl der Ritzpara- meter zur Entstehung ausrei- chender Gitterverspannungen, Anpassung von Anstellwinkel (ca. 20°), Andruck des Dia- manten, Ritzgeschwindigkeit	durchschnittliche Laserleistung: 5 W	durchschnittliche Laserleistungen: 3 W, 10 W

maximale Schneidgeschwindigkeit/Abtragrate	0,1 - 300 mm/s beim Schneiden dünner Wafer: 100 - 150 mm/s unter Laborbedingungen: ca. 20 mm/s (bei 200 µm) ca. 100 mm/s (bei 600 µm)	<u>für 1064 nm Wellenlänge:</u> ca. 2,4 mm/s (bei ca. 4,6 W, 3 kHz, ca. 410 µm) ca. 4 mm/s (bei ca. 15 W, 0,1 - 1 ms, 800 µm) ca. 5 mm/s (bei ca. 15 W, 0,1-1ms, 350 µm) <u>für 780 nm Wellenlänge:</u> ca. 0,01 mm/s (bei 400 µJ, 1 kHz, 120 fs, 380 µm) <u>für 532 nm Wellenlänge:</u> ca. 0,2 mm/s (bei 13,5 W, 10 kHz, 15 ns, 400 µm) ca. 4,2 mm/s (bei 100 W, 10 kHz, ca. 1,0 mm PCB-Dicke) ca. 0,69 mm/s (bei 0,9 W, 2 kHz, ca. 180 µm) <u>für 355 nm Wellenlänge:</u> ca. 0,3 - 0,5 mm/s (bei 3 W, 10 kHz, 15 ns, 300 µm) ca. 0,7 mm/s (bei 3 W, 10 kHz, 15 ns, ca. 200 µm)	<u>für 1064 nm Wellenlänge erreichbare Geschwindigkeiten:</u> 1 mm/s (bei 2000 µm) 3 mm/s (bei 1500 µm) 6 mm/s (bei 1000 µm) 10 mm/s (bei 700 µm) 20 mm/s (bei 500 µm) 40 mm/s (bei 300 µm) 80 mm/s (bei 200 µm) 120 mm/s (bei 100 µm) angestrebt: ≥200 mm/s - laserstrahlleistungsabhängig - materialdickenabhängig			250 mm/s (100 µm)	<u>für Wellenlänge 355 nm und Materialdicke ca. 210 µm:</u> Minimum: 0,01 mm/s Mittelwert: 0,4 - 0,8 mm/s Maximum (optimiert): ca. 2,0 mm/s - materialdickenabhängig - kristallorientierungsunabhängig - polarisationsrichtungsabhängig - laserleistungsabhängig - pulsfrequenzabhängig - abhängig von der Fokusslage - scangeschwindigkeitsabhängig - abhängig vom Atmosphärendruck
für die Schneidgeschwindigkeit relevante Abhängigkeiten	- materialabhängig						
Eigenschaft	Wafersägen (Trennschleifen)	Laserstrahl-Schneiden (1963)	Wasserstrahl-geführter Laser Laser-MicroJet® (1994)	Wasserstrahl-Schneiden (1970) Hochdruck- Wasserstrahl-Schneiden	Ritzen & Brechen	Laser (Holographie)	Ergebnisse mit dem GATOR UV/ POWER GATOR UV

minimale Schnittfugenbreiten	25 - 200 µm 40 - 50 µm (bei 25 µm Sägeblatt) gängige Sägeblattbreiten: 15 - 180 µm, 200 µm, 300 µm nahezu alle Abstufungen möglich; angestrebt: 10µm	25 - 40 µm, bis zu 0,15 mm <u>für Wellenlänge 1064 nm:</u> ca. 50 µm (1,9 W, 2 kHz) 40 - 70 µm (1064 nm, ca. 15 W, 0,1 - 1 ms) <u>für Wellenlänge 355 nm:</u> ca. 40 µm (bei 3 W, 10 kHz, 15 ns, 300 µm) Strahleintritt: ca. 40 - 50 µm (bei 3 W, 10 kHz, 15 ns) Strahlaustritt: ca. 25 - 30 µm (bei 3 W, 10 kHz, 15 ns) <u>für Wellenlänge 780 nm:</u> Strahleintritt: 50 - 70 µm (bei 400 µJ, 1 kHz, 120 fs, 380 µm) Strahlaustritt: 20-70µm (bei 400 µJ, 1 kHz, 120 fs, 380 µm) <u>für Wellenlänge 532 nm:</u> ca. 100 µm (bei 13,5 W, 10 kHz, 15 ns, 400 µm)	20 - 40 µm, 50 µm, 0,05 mm, derzeitige Wasserstrahl-Durchmesser: 40, 50, 60, 75 oder 100 µm; angestrebt: 35µm, bis zu 10 µm, 25 µm	ca. 0,5 mm	<u>Diamantritzen:</u> ca. 0,25 mm bestimmt durch die Breite einer industriell polierten Diamantspitze <u>Ätzen:</u> ca. 350 µm bestimmt durch die schrägen (111)-Ebenen des Siliziumeinkristalls <u>Laserritzen:</u> ca. 50 µm; bis unter 10 µm	6 - 12 µm	<u>Strahleintritt:</u> Minimum: 22 µm Mittelwert: 30 - 40 µm Maximum (optimiert): 62 µm, 78 µm <u>Strahlaustritt:</u> Minimum: 6 µm Mittelwert: 10 - 20 µm Maximum (optimiert): 32 µm 70 - 90 µm (bei v _{scan} >75 mm/s)
für die Schnittqualität relevante Abhängigkeiten	- sägeblattabhängig - schneidgeschwindigkeitsabhängig - kristallorientierungsabhängig	- schneidgeschwindigkeitsabhängig - materialabhängig	- schneidgeschwindigkeitsunabhängig - abhängig vom Wasserstrahl-Laserstrahl-Durchmesser	- schneidgeschwindigkeitsabhängig			- geringfügig kristallorientierungsabhängig - polarisationsrichtungsabhängig - laserleistungsabhängig - abhängig von der Fokusslage - scangeschwindigkeitsabhängig - abhängig vom Atmosphärendruck
Schnittqualität, sonstige Charakteristika der Bearbeitung sowie deren Ergebnisse (in Stichworten)	Problem: Chipping (Ausbrüche am Sägerand ca. 5 - 15 µm); keine konstante Schnittqualität Sägeblattabnutzung/ Verschleiß der Sägeblätter; teilweise Partikelkontamination/ Sägestaub in den Zwischenräumen der Chips/ Siliziumstaub-Kühlwassergemisch; stärkere Rückseitenausbrüche, glatte, senkrechte Trennflächen (Rauigkeit: etwa 5 µm), saubere, exakt positionierte Chipkanten, geringe thermische Beanspruchung (Kühlung); hohe mechanische Beanspruchung (Spannungen), Rissbildung im Wafer (Mikrorisse), niedrige Bruchfestigkeit dünner Wafer, z.T. leichte Beschädigung dünner Wafer; Kristallfehler: bis zu 100 µm	konstante Schnittqualität (kein Verschleiß am Werkzeug), wellige Struktur der Schnittflächen (Riefenbildung), parallele bis leicht konische Schnittkanten; teilweise Bart-/ Gratbildung an den Schnittkanten (Schlacke-/ Schmelzeablagerungen von abgekühltem Abtragsmaterial auf der Waferoberfläche), Partikel in der Schnittfuge, strukturelle Veränderungen, Staubbildung; relativ hohe thermische Beanspruchung (hohe Wärmeeinbringung, Wärmeleitung in das Werkstück), keine direkte mechanische Beanspruchung (kraftfreie Bearbeitung), Rissbildung (Mikrorisse); Strukturveränderungen im Material/ Schädigung des Werkstoffes (thermische Verzerrung), Spannungen, wärmebeeinflusste Zone; Gitterstörungen: < 50 µm	konstante Schnittqualität (keine Werkzeugabnutzung); keine Ausbrüche/ Abplatzungen (chipping), Schnittfläche: wie Sand-gestrahlt (erhöhte Oberflächenrauigkeit), saubere, präzise, parallele, glatte Schnittkanten/ Kantenoberfläche (keine offenen Poren); hohe Bruchfestigkeit dünner Wafer, kaum Bart-/ Gratbildung, kaum strukturelle Veränderungen, geringfügige Materialablagerungen/ Partikelkontamination (Staubbildung) Absorption und Abtransport des verdampften Materials durch den Wasserstrahl; keine thermischen Verspannungen, keine Rissbildung (Mikrorisse), sehr geringe thermische Beanspruchung (Kühlung der Schnittfuge zwischen den Pulsen); keine Verformungen, keine sichtbaren Strukturänderungen (minimale thermische und strukturelle Verzerrung), sehr geringe mechanische Beanspruchung (Stress), kaum Defekte/Fehler	Schnittfläche: wie sand-gestrahlt, Schnittqualität, parallele Schnittkanten, „tailliert“ an Kurven/ Krümmungen und Rundungen; keine Bart-/ Gratbildung, keine thermische Beanspruchung/ Materialverspannung, Partikelkontamination, Staubbildung, Wasserspritzer (mit Partikeln verunreinigt); starke mechanische Beanspruchung; Beschädigungen bis zur partiellen Funktionsuntüchtigkeit möglich	schlechtere Schnittkantenqualität/ Bruchkantenqualität (gestörte Bruchkanten im Bereich des Restsiliziums), Einwandern von Versetzungen von den ausgebrochenen Rändern der Chips möglich; nahezu senkrechte Schnittflanken, Ablagerungen entlang der Schnittfuge (in Umfang und Ausdehnung von der Ritztiefe abhängig; unter 100 µm Breite bei Optimierung); konstante Ritztiefen, minierte thermische Belastung Beschädigung der Chips/ integrierten Schaltungen durch das Andrücken an die gewölbte Fläche speziell bei großflächigen Schaltungen möglich	Analog dem Laserstrahlschneiden; geringe thermische Beanspruchung, keine nachteiligen thermischen Effekte, sehr geringe mechanische Beanspruchung	Schnittqualität (Schnittfugenbreite, Parallelität der Schnittflächen) von mehreren Einstellparametern abhängig; kann durch Optimierung eingestellt werden, ohne zusätzlichen Gasstrom, Schutzschichten und Nachbehandlungsschritt starke Partikelkontamination auf der Waferoberfläche (Strahleintrittsseite); geringere Ablagerungen auf der Strahlaustrittsseite, lockere Oxidschichten an den Schnittkanten (in entsprechender Ätzlösung relativ leicht entfernbar)

Eigenschaft	Wafersägen (Trennschleifen)	Laserstrahl-Schneiden (1963)	Wasserstrahl-geführter Laser Laser-MicroJet® (1994)	Wasserstrahl-Schneiden (1970) Hochdruck-Wasserstrahl-Schneiden	Ritzen & Brechen	Laser (Holographie)	Ergebnisse mit dem GATOR UV/ POWER GATOR UV
Einsatzbereiche	Schneiden, Ritzen	Schneiden, Bohren, Gravieren, Abtragen, Strukturieren, Schweißen von nahezu allen Materialien, wie Metall, Plastik, Glas, Holz, Keramik, Halbleiter, auch polierte, mit Gold bedampfte Siliziumsubstrate im endbearbeiteten Zustand;	Komplexes 3D-Schneiden durch faserartige Übertragung und langen Arbeitsabstand möglich; fast jedes Metall, einige Plastik, viele Keramiken (z.B. Aluminiumoxid, Siliziumnitrid, Siliziumcarbid), Halbleiter schneidbar,	Schneiden, Abtragen, Strukturieren; alle Materialien schneidbar, Materialkombinationen ohne Ausnahme schneidbar;	Solarzellen, Silizium-Wafer Waferstärke: bis zu 300 µm unbeschädigter p-n-Übergang gut automatisierbar, hoher Durchsatz;	Bearbeitung sehr dünner Werkstücke	Schneiden/Trennen, Ritzen, Bohren (Löcher, Schlitze, Einschnitte), Markieren/Beschriften, Abtragen, Strukturieren, berflächenbehandlung,
Bearbeitungsformen		Bearbeitung hochfester Materialien (Keramik, mono-, polykristallines Silizium, polykristalliner Diamant);	Schneiden/Trennen, Ritzen, Bohren (Löcher, Schlitze, Einschnitte), Markieren/Beschriften, Abtragen, Strukturieren, Oberflächenbehandlung, Kanten-Schleifen, Abdünnen;				
mögliche Chip-Geometrien	eckige Konturen (z.B. rechteckig, sechseckig), nur eine Kontur und Größe auf einem Wafer möglich;	alle denkbaren Konturen möglich;	multi-direktional: jede 2D-Kontur (z.B. rund, sechseckig, rechteckig, L-Form), verschiedene Größen auf einem Wafer möglich; Anpassung von Chips an eine optimale Ausführung (z.B. runde, L-förmige, sechseckige Chips, etc.);				multi-direktional: jede 2D-Kontur (z.B. rund, sechseckig, rechteckig, L-Form), verschiedene Größen auf einem Wafer möglich;
Beispiele für vorteilhafte Anwendungen	Vereinzeln von Sensoren und Aktoren; Die Materialoberfläche darf mit Oxid oder Nitrid beschichtet sein	Hochspannungsdioden; speziell auch sehr dünne Wafer bearbeitbar; schneidbare Dicke bei Silizium und Keramik: bis zu 5 mm (bei 1,06 µm für Nd:YAG, CO ₂) 100 µm - 6 mm (bei 1064nm) 30 - 50 µm (bei 780nm, 400µJ, 120fs, 1kHz); ökonomisch schneidbare Materialdicke: 0,1 - 10 mm (material-, wellenlängenabhängig) ;	Halbleiter-Materialien (z.B. Silizium, Gallium-Arsenit, Germanium), Material-Kombinationen (beschichtete Wafer), empfindliche, poröse Materialien, transparente Materialien (Silizium-Glas-Verbindungen, Glas- oder Diamant-beschichtete Silizium-wafer), Glas, Diamant, Saphir, transparente Polymere (mit UV-Wellenlänge); besonders effizient beim Schneiden dünner Wafer (25 - 100 µm) z.B. für Chipkarten; Vakuumgreifer- und Düsenherstellung, Schneiden von Luftspalten in Ferritkernen, Schneiden von (Hoch-) Leistungs-Halbleitern aus Silizium, Herstellung schneller optoelektronischer Komponenten, Schneiden von PCB mit flexiblen Glas- oder Kevlar®-Fasern;	ökonomisch effizient für Materialdicken: 10 - 50 mm;			Anpassung von Chips an eine optimale Ausführung möglich (z.B. runde Chips, L-förmige Chips, sechseckige Chips, etc.); Auch Schichtmaterialien wie Metalle, Keramik, Glas etc. schneidbar Ökonomisch schneidbare Materialdicke: < 210 µm

<p>Anwendungseinschränkungen (Nachteile)</p>	<p>Schneiden beschichteter Materialien (Low-k, Kupfer-Wafer), sehr dünne Wafer/ Chips (vor allem bei höheren Geschwindigkeiten), zwischen den zu vereinzeln Chips müssen Ab-stände von 50 - 70 µm für das Säge-blatt belassen werden, z. T. nur bei hermetisch gekapselten Komponenten anwendbar, minimale Chipkan-tenlänge 500 µm, da sich kleinere Chips beim Sägen lösen;</p> <p>nur eindimensionales Schneiden in direkten/geraden Linien/Konturen möglich (rechteckige Chips);</p> <p>eingeschränkte Schneid-Geometrie: Schneiden runder Halbleiterplättchen nicht möglich; geringe Formvielfalt der vereinzelt Elemente;</p> <p>kein 3D-Schneiden möglich;</p> <p>schneidbare Waferdicke < 50 mm</p>	<p>Materialkombinationen/ Materialien mit verschiedenen Schmelzpunkten, Sandwich-Strukturen mit Hohlräumen, effizient nur bei sehr dünnen Wafern (50 µm), Einschränkung/ Begrenzung durch die Materialdicke bzw. Waferdicke: 550 µm;</p> <p>Probleme: Bei dünnen Werkstücken verursacht durch Gasdruck möglich („fluttering“), hoch reflektierende Metalle, 3D-Schneiden schwierig aufgrund starrer/ steife Strahlführung, umgegossenes/ -geschmolzenes Metall an den Kanten erzeugt Kurzschlüsse der p-n-Übergangszone;</p>	<p>hoch-reflektierende Materialien (Kupfer, Gold, Silber); Materialkombinationen nur bei ausreichender Absorption möglich, Sandwich-Strukturen mit Hohlräumen nur bis zu einem Abstand von 50 mm möglich, transparente Materialien (z.B. Glas, Quartz, Saphir);</p> <p>Einschränkung der verwendbaren Laser-Wellenlänge auf den Bereich niedriger Absorption durch das Wasser (Absorptionskoeff. < 1/cm): mögliche Wellenlänge 200 - 1100 nm (UV bis nahes IR);</p> <p>Einschränkung/Begrenzung der Materialdicke: Dicke nicht größer als 0,1 mm</p>	<p>empfindliche Materialien bzw. Strukturen, dünne, kleine Teile nur zu einem eingeschränkten/ begrenzten Grad bearbeitbar wegen hoher Kraftereinwirkung auf das Material während der Bearbeitung (Zerstörung durch restliche Energie), Sandwich-Strukturen mit Hohlräumen;</p> <p>3D-Schneiden nur teilweise möglich</p>	<p>mechanisch sauberes Brechen bevorzugt längs spezieller Kristallrichtungen (z.B. 100-Ebenen), nur bei geraden Brechkanten einsetzbar, freiliegende Siliziumoberfläche im Ritzrahmen Voraussetzung (bereits Oxiddicken von weniger als 100 nm führen zur Zerstörung der Diamantspitze);</p> <p>bei größeren Scheibendurchmessern und Scheibendicken nur bis zu einer Scheibendicke von ca. 375 µm (3“) (Diamantritzen), erforderliche Mindesteindringtiefe/ Grabentiefe für gefahrlos und sicheres Brechen: ca. 30 % der Substratdicke/ Waferdicke (Laserritzen), 50 % (Ätzen);</p> <p>nur bei geradlinigen Schnitten anwendbar</p>	<p>analog Laserstrahlschneiden</p>	<p>große Materialdicken (> 210 µm)</p>
--	---	--	---	---	--	------------------------------------	---

Anhang B

Anhang B.1: Messwerte zur Untersuchung der Materialdickenabhängigkeit und Vergleich mit den berechneten Werten

Materialdicke [µm]	notwendige Anzahl Überfahrten		eff. Schneidgeschwindigkeit [mm/s]		Schnittfugenbreite [µm]		Wandwinkel [°]	Ablagerungsausdehnung [µm]		
	variable Größe	Mittelwert	Standardabw.	berechnete Größe	Fehlergröße	SE		SA	berechnete Größe	SE
223	96,8	5,2	0,517	0,028	36	20	2,1	437	180	237
326	241,0	4,3	0,2075	0,0037	49	17	2,8	480	235	270
525	1108	100	0,0451	0,0041	46	20	1,4	462	185	316

Anhang B.2: Messwerte zur Untersuchung des Einflusses der Kristallorientierung

Kristallorient.	Schneidrichtung/Orientierung	notwendige Anzahl Überfahrten		eff. Schneidgeschwindigkeit [mm/s]		Schnittfugenbreite [µm]		Wandwinkel [°]	Ablagerungsausdehnung [µm]	
		variable Größe	Mittelwert	Standardabw.	berechnete Größe	Fehlergröße	SE		SA	berechnete Größe
<100>/<111>	0	111,3	3,4	0,449	0,014	31	11	2,7	220	176
<111>	90	103,7	1,2	0,4823	0,0058	32	8	3,1	230	164
<111>	45	107,7	7,6	0,464	0,033	34	10	3,1	221	277
<111>	135	03,0	3,3	0,485	0,015	35	9	3,4	229	174
<100>	0	91,0	2,2	0,550	0,013	22	10	1,6	176	155
<100>	90	98,0	3,6	0,510	0,019	24	10	1,9	190	172
<100>	45	95,33	0,94	0,5245	0,0052	29	11	2,4	163	182
<100>	135	103,0	0,82	0,4854	0,0038	23	11	1,6	182	385

Anhang B.3: Messwerte zur Untersuchung des Oberflächeneinflusses

Oberflächenbehandlung	notwendige Anzahl Überfahrten		eff. Schneidgeschwindigkeit [mm/s]		Schnittfugenbreite [µm]		Wandwinkel [°]	Ablagerungsausdehnung [µm]	
	variable Größe	Mittelwert	Standardabw.	berechnete Größe	Fehlergröße	SE		SA	berechnete Größe
geschliffen/geätzt	314	23	0,319	0,023	32	20	1,6	262	254
poliert	330	31	0,303	0,028	40	18	3,0	364	86

Anhang B4 Messwerte zur Untersuchung des Einflusses der Wellenlänge

Wellenlänge [nm]	Scangeschwindigkeit [mm/s]	notwendige Anzahl der Überfahrten	Abtragtiefe [μm]
355	5	5	211,56
355	5	10	305,34
355	5	15	343,18
355	5	20	385,8
355	5	25	433,58
355	5	30	476,75
355	5	35	502,6
355	5	40	502,6

Wellenlänge [nm]	Scangeschwindigkeit [mm/s]	notwendige Anzahl der Überfahrten	Abtragtiefe [μm]
355	100	50	101,00
355	100	100	147,00
355	100	150	182,00
355	100	200	191,00
355	100	250	229,72
355	100	300	268,27
355	100	350	303,51
355	100	400	324,01
355	100	450	347,35
355	100	500	377,09
355	100	600	449,46
355	100	700	484,09
355	100	800	510,61
355	100	900	900,44

Wellenlänge [nm]	Scangeschwindigkeit [mm/s]	notwendige Anzahl der Überfahrten	Abtragtiefe [μm]
532	100	50	120
532	100	100	143
532	100	200	190
532	100	300	242
532	100	450	303
532	100	500	366
532	100	650	424
532	100	700	492
532	100	800	550

Anhang B.5: Messwerte zur Untersuchung des Einflusses der Polarisationsrichtung

Polarisationsrichtung	Schneidrichtung/Ablenkwinkel [°]	notwendige Anzahl Überfahrten		eff. Schneidgeschwindigkeit [mm/s]		Schnittfugenbreite [μm]		Wandwinkel [°]			Ablagerungsausdehnung [μm]	
		Mittelwert	Standardabw.	berechnete Größe	Fehlergröße	SE	SA	berechnete Größe	SE	SA		
zirkular / linear	variable Größe											
zirkular	0	94	47	0,53	0,26	50	19	4,0	243	216		
zirkular	90	85	42	0,59	0,29	36	18	2,4	275	216		
zirkular	45	96	48	0,52	0,26	46	11	4,6	314	97		
zirkular	135	84	42	0,60	0,30	39	17	2,9	283	239		
linear	0	82	41	0,61	0,30	39	20	2,5	251	215		
linear	90	56	27	0,90	0,44	30	19	1,4	253	227		
linear	45	79	39	0,63	0,32	34	21	1,7	254	235		
linear	135	62	31	0,80	0,40	29	16	1,7	230	229		

Anhang B.6: Messwerte zur Untersuchung des Einflusses der Laserleistung

Ausgangsleistung [W]	notwendige Anzahl Überfahrten		eff. Schneidgeschwindigkeit [mm/s]		Schnittfugenbreite [µm]		Wandwinkel [°]	Ablagerungsausdehnung [µm]	
	Mittelwert	Standard abw.	berechnete Größe	Fehlergröße	SE	SA		berechnete Größe	SE
3	111,2	2,5	0,450	0,010	49	26	3,1	340	159
10	51,00	0,63	0,980	0,012	72	61	1,5	630	326

Anhang B.7: Messwerte zur Untersuchung des Einflusses der Pulswiederholfrequenz

Pulswiederholfrequenz [kHz]	Ausgangsleistung [W]	notwendige Anzahl Überfahrten		eff. Schneidgeschwindigkeit [mm/s]		Schnittfugenbreite [µm]		Wandwinkel [°]	Ablagerungsausdehnung [µm]	
		Mittelwert	Standard abw.	berechnete Größe	Fehlergröße	SE	SA		berechnete Größe	SE
8,00	10,80	117,6	5,0	0,425	0,018	36	16	2,7	268	250
9,00	10,36	108,0	2,0	0,4630	0,0086	41	16	3,3	286	211
10,00	10,59	106,8	0,98	0,4682	0,0043	40	16	3,1	218	198
11,00	9,55	86,2	1,9	0,580	0,013	30	18	1,6	268	180
12,00	8,66	84,0	0,63	0,5952	0,0045	34	19	2,0	233	189
13,00	8,34	79,0	1,1	0,6329	0,0088	34	18	2,1	242	159
14,00	7,64	78,6	2,2	0,636	0,017	35	7	3,6	194	80
15,00	7,18	77,4	1,9	0,646	0,016	34	7	3,6	182	74

Anhang B.7 a: Messwerte zur Untersuchung des Einfluss eines dünnen Wasserfilmes

Pulswiederholfrequenz [kHz]	Defokussierung [mm]	notwendige Anzahl Überfahrten	eff. Schneidgeschwindigkeit [mm/s]
8	- 1,75	64	0,516
8	- 2,00	52	0,635
8	-2,25	50	0,660
8	-2,50	46	0,717
8	-2,75	42	0,786
8	-3,00	44	0,750
8	-3,25	52	0,635
8	-3,50	56	0,589
8	-3,75	70	0,471
8	-4,00	74	0,446

Anhang B.7 b: Messwerte zur Untersuchung des Einfluss eines dünnen Wasserfilmes

Pulswiederholfrequenz [kHz]	Defokussierung [mm]	notwendige Anzahl Überfahrten	eff. Schneidgeschwindigkeit [mm/s]
11	0,00	124	0,266
11	-0,25	118	0,280
11	-0,50	112	0,295
11	-0,75	106	0,311
11	-1,00	100	0,330
11	-1,25	88	0,375

11	-1,50	80	0,413
11	-1,75	70	0,471
11	-2,00	62	0,532
11	-2,25	62	0,532
11	-2,50	58	0,569
11	-2,75	54	0,611
11	-3,00	52	0,635
11	-3,25	54	0,611
11	-3,50	62	0,532
11	-3,75	66	0,500
11	-4,50	74	0,446

Anhang B.8: Messwerte zur Untersuchung des Einflusses der Defokussierung

Defokussierung [mm]	notwendige Anzahl Überfahrten		eff. Schneidgeschwindigkeit [mm/s]		Schnittfugenbreite [µm]		Wandwinkel [°]	Ablagerungsausdehnung [µm]	
	variable Größe	Mittelwert	Standardabw.	berechnete Größe	Fehlergröße	SE		SA	berechnete Größe
-0,200	-	-	-	-	51	30	2,9	340	179
-0,100	304,7	2,6	0,1641	0,0014	-	-	-	-	-
-0,050	291,7	6,6	0,1714	0,0039	-	-	-	-	-
0,000	240,0	11	0,2086	0,0093	50	26	3,3	342	156
0,050	225,3	1,7	0,2219	0,0017	-	-	-	-	-
0,100	225,3	1,2	0,2219	0,0012	-	-	-	-	-
0,150	219,7	1,2	0,2276	0,0013	-	-	-	-	-
0,200	222,7	2,6	0,2246	0,0026	45	24	2,9	284	163
0,250	230,3	5,4	0,2171	0,0051	-	-	-	-	-
0,300	229,3	3,7	0,2180	0,0035	-	-	-	-	-
0,350	237,0	13	0,2110	0,0120	-	-	-	-	-
0,400	260,0	11	0,1921	0,0083	38	22	2,2	257	163
0,500	277,3	4,8	0,1803	0,0031	-	-	-	-	-
0,600	254,0	13	0,1971	0,0098	38	19	2,6	244	165

Anhang B.9: Messwerte zur Untersuchung des Einflusses der Scangeschwindigkeit (Scannersteuerung)

Scangeschwindigkeit [mm/s]	notwendige Anzahl Überfahrten		eff. Schneidgeschwindigkeit [mm/s]		Schnittfugenbreite [µm]		Wandwinkel [°]	Ablagerungsausdehnung [µm]	
	variable Größe	Mittelwert	Standardabw.	berechnete Größe	Fehlergröße	SE		SA	berechnete Größe
0,1	3,00	0,00	0,033	0,000	-	-	-	-	-
1	5,33	0,47	0,188	0,017	35	22	2	113	79
25	40,0	1,60	0,625	0,026	24	21	0,4	188	181
50	85,0	8,60	0,588	0,060	27	19	1,0	164	268
75	25,7	9,50	0,597	0,045	33	75	-5,4	173	285
100	183	19	0,547	0,058	30	69	-5,1	174	270
125	202	29	0,620	0,090	28	89	-7,8	153	434
150	197	20	0,763	0,078	31	87	-7,0	157	452
175	244	24	0,717	0,069	34	73	-5,0	183	421
200	246	23	0,813	0,077	32	77	-5,7	245	441
225	288	47	0,780	0,130	36	75	-4,9	325	438

250	315	41	0,790	0,100	36	78	-5,4	299	382
275	354	29	0,778	0,064	42	76	-4,3	205	442
300	358	38	0,837	0,090	34	75	-5,2	255	459

Anhang B.9a: Messwerte zur Untersuchung im engeren Geschwindigkeitsfenster;
vscan = (0,1–20) mm/s

Scangeschwindigkeit [mm/s]	notwendige Anzahl Überfahrten		eff. Schneidgeschwindigkeit [mm/s]		
	variable Größe	Mittelwert	Standardabw.	berechnete Größe	Fehlergröße
0,1		11,00	0,82	0,009	0,0006
1		11,33	0,47	0,088	0,0037
5		22,30	1,30	0,224	0,0130
10		33,70	1,70	0,297	0,0150
20		59,00	2,90	0,339	0,0170

Anhang B.10: Messwerte zur Untersuchung des Einflusses der Verfahrgeschwindigkeit
(Tischsteuerung)

Verfahrgeschwindigkeit [mm/s]	notwendige Anzahl Überfahrten		eff. Schneidgeschwindigkeit [mm/s]		Schnittfugenbreite [µm]		Wandwinkel [°]	Ablagerungsausdehnung [µm]		
	variable Größe	Mittelwert	Standardabw.	berechnete Größe	Fehlergröße	SE		SA	berechnete Größe	SE
0,17		3,67	0,47	0,0455	0,0058	36	26	1,4	187	155
0,33		4,00	0,00	0,0833	0,0000	-	-	-	-	-
0,50		4,00	0,00	0,1250	0,0000	-	-	-	-	-
0,67		3,67	0,47	0,1820	0,0230	-	-	-	-	-
0,83		3,67	0,47	0,2270	0,0290	36	25	1,5	194	132
1,67		5,00	0,00	0,3333	0,0000	39	28	1,4	218	141
3,33		7,33	0,47	0,4550	0,0290	-	-	-	-	-
5,00		11,00	0,00	0,4545	0,0000	39	26	1,8	231	171
6,67		15,00	0,00	0,4444	0,0000	-	-	-	-	-
8,33		17,67	0,47	0,4720	0,0130	35	21	1,9	231	174
16,67		31,33	0,47	0,5319	0,0080	38	21	2,3	273	188

Anhang B.11: Messwerte zur Untersuchung des Einflusses der Gasatmosphäre

Gasatmosphäre	notwendige Anzahl Überfahrten		eff. Schneidgeschwindigkeit [mm/s]		Schnittfugenbreite [µm]		Wandwinkel [°]	Ablagerungsausdehnung [µm]		
	variable Größe	Mittelwert	Standardabw.	berechnete Größe	Fehlergröße	SE		SA	berechnete Größe	SE
Luft		211	14	0,237	0,016	34	8	3,5	180	22
Argon		153	27	0,327	0,058	39	7	4,3	346	21
Helium		66	15	0,760	0,170	26	6	2,6	213	15
Vakuum		85	32	0,590	0,220	34	6	3,7	188	27

Anhang C

Formeln zur Fehlerberechnung

Arithmetischer Mittelwert aus n Messwerten x_i :

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (\text{C.1})$$

Empirische Standardabweichung (Streubreite der Einzelmessung):

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \cdot t \quad (\text{C.2})$$

mit $t=2$ für 95%-ige Sicherheit

Gauß'sche Fehlerfortpflanzung (mittlerer quadratischer Fehler):

$$\Delta y = \sqrt{\sum_{k=1}^m \left(\frac{\partial f}{\partial x_k} \Delta x_k \right)^2} \quad (\text{C.3})$$

mit $y = f(x_1, \dots, x_k, \dots, x_m)$ und $\bar{y} = (\bar{x}_1, \dots, \bar{x}_k, \dots, \bar{x}_m)$

Der Fehler für die effektive Schneidgeschwindigkeit nach Gleichung (11)

$$v_{\text{eff.}} = \frac{v_{\text{scan}}}{n} = v_{\text{scan}} \cdot n^{-1} \quad \text{ergab sich mit:}$$

$$\Delta v_{\text{eff.}} = \sqrt{\sum_{k=1}^1 \left(\frac{\partial v_{\text{eff.}}}{\partial n} \cdot \Delta n \right)^2} \quad \text{somit zu:}$$

$$\Delta v_{\text{eff.}} = \sqrt{\left(-v_{\text{scan}} \cdot \frac{1}{n^2} \cdot \Delta n \right)^2} \quad (\text{C.4})$$

mit $n = x$ und $\Delta n = s$.

Danksagung

Ich möchte mich bei allen bedanken, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Besonders hervorheben möchte ich dabei den Betreuer dieser Arbeit, Herrn Prof. Dr. Ing. habil. E. Beyer, der es mir ermöglicht hat, meine Promotion auf dem Gebiet der Lasertechnik durchführen zu können. Sein stetes Interesse an meiner Arbeit und die von ihm gebotene Möglichkeit der Präsentation der laufenden Ergebnisse auch auf internationalen Kongressen trugen wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit bei.

Herrn Prof. Dr. rer. nat. habil. Schuöcker möchte ich für die freundliche Übernahme des Gutachtens danken.

Mein Dank gilt auch den Herrn Prof. Dr. rer. nat. P. Hartmann und Herrn Dr. Ing. L. Morgenthal, die mir in vielen Diskussionen wichtige Anregungen gegeben haben, sowie den Institutsangehörigen, die mir alle immer freundlich gesonnen waren.

Darüber hinaus gilt mein Dank für deren Beitrag an dieser Arbeit insbesondere meinen Kollegen und Studenten, die ich während meiner Zeit am Institut getroffen habe und die mir über die fachliche Verbundenheit hinaus auch oft privat nahe stehen. Dabei möchte ich besonders Michael Panzner und Thomas Kuntze erwähnen. Beide begleiteten mich in dieser Arbeit von Beginn an.

Aber auch die anderen Kollegen und Studenten haben mit ihrer Arbeit wertvolle Hilfen geleistet, namentlich Stefanie Mälzer und Michael Dötschel.

Zu guter Letzt möchte ich natürlich ganz besonders meinen Eltern, Großeltern und meiner Frau Annett danken, die durch Ihre Unterstützung während der Höhen und Tiefen meiner Ausbildung von der Einschulung bis zum Abitur den Grundstein für den erfolgreichen Abschluss meines Studiums und damit letztendlich auch für diese Arbeit legten.