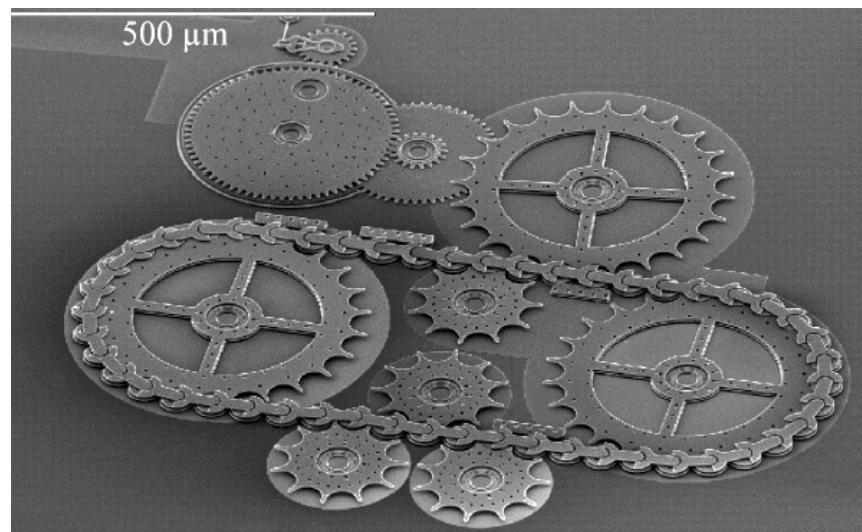
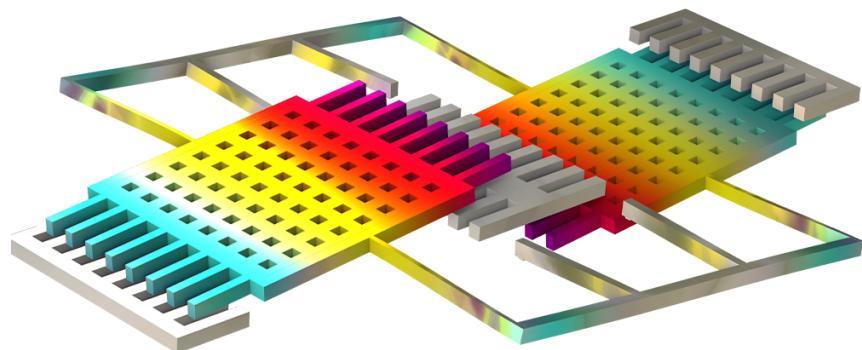


# Zusammenfassung von MEMS-Herstellungsverfahren (TU Wien)

Omar Filip El Sendiouny  
e1616023@student.tuwien.ac.at



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Pysical Vapour Deposition</b>	<b>2</b>
1.1	Begriffsklärung für PVD . . . . .	2
1.2	PVD-Verfahren . . . . .	3
1.3	Aufdampfen . . . . .	4
1.3.1	Funktionsweise . . . . .	4
1.3.2	Schichtdickenmessung . . . . .	5
1.3.3	Erwärmung mittels Elektronenstrahlquelle (E-Beam-Verfahren) . . . . .	5
1.4	Sputtern (Zerstäubung) . . . . .	5
1.4.1	Funktionsweise . . . . .	5
1.4.2	Sputterverfahren . . . . .	7
1.5	Vergleich Aufdampfen - Sputtern . . . . .	9
<b>2</b>	<b>Chemical Vapour Deposition</b>	<b>11</b>
2.1	Begriffsklärung für CVD . . . . .	11
2.2	Funktionsweise . . . . .	12
2.3	CVD-Anlagen . . . . .	13
2.3.1	Verbrauch an Reaktanden . . . . .	14
2.3.2	Reaktionsort . . . . .	14
2.3.3	Energiezufuhr . . . . .	14
2.3.4	Erwärmte Anlagenteile . . . . .	15
2.3.5	Druck . . . . .	16
2.4	Atomlagenabscheidung . . . . .	17
<b>3</b>	<b>Lithographie</b>	<b>19</b>
3.1	Begriffsklärung für die Lithographie . . . . .	19
3.2	Photoresist . . . . .	20
3.3	Funktionsweise . . . . .	23
3.4	Belichtungsverfahren . . . . .	25
3.4.1	Kontaktbelichtung (Schattenprojektion) . . . . .	25
3.4.2	Proximity-Belichtung (Schattenprojektion) . . . . .	26
3.4.3	Projektionsbelichtung (abbildende Projektion) . . . . .	28
3.5	SU-8 Photoresist . . . . .	29
3.6	Lift-Off-Verfahren . . . . .	31
<b>4</b>	<b>Ätztechnik</b>	<b>33</b>
4.1	Begriffsklärung für die Ätztechnik . . . . .	33
4.2	Ätzrate . . . . .	36
4.3	Ätzprofile . . . . .	36
4.3.1	Anisotropiefaktor . . . . .	36
4.3.2	Selektivität . . . . .	37
4.4	Ätzgraben bei anisotroper KOH-Ätzung von {100}- und {110}-Si-Wafern . . . . .	37
4.5	Ätzstoppebenen mit p <sup>+</sup> -Dotierung . . . . .	38
4.6	Trockenätzverfahren . . . . .	40

# Tabellenverzeichnis

1	Vergleich Audampfen - Sputtern [1] . . . . .	10
2	Vergleich Positiv- und Negativresist Teil 1 [2,3] . . . . .	21
3	Vergleich Positiv- und Negativresist Teil 2 [2,3] . . . . .	22

# Abbildungsverzeichnis

1	Schematischer Aufbau einer PVD Aufdampfanlage [1]. . . . .	4
2	a) Aufdampfschiffchen, mit Aluminiumoxid (milchige Bereiche) beschichtet, um das Benetzen durch das Aufdampfmaterial zu minimieren. b) Schematischer Aufbau einer Elektronenstrahlquelle: S...Spule, A...Anode, K...Kathode, W...Wehneltzylinder, T...Tiegel mit Aufdampfmateriel, L...Wasserkühlung, M...Permanentmagnet. c) Elektronenstrahlquelle im Inneren der Vakuumkammer (Rezipient). d) Vierlochiegel für die Elektronenstrahlquelle, der Beschichtungen aus bis zu vier verschiedenen Materialien ermöglicht [1]. . . . .	6
3	Schematischer Aufbau einer Sputteranlage [1]. . . . .	6
4	Herauslösen eines Targetatoms durch die vom Sputterion ausgelöste Stoßkaskade [1].	7
5	Schematischer Aufbau einer Magnetron-Sputteranlage [1]. . . . .	8
6	Zykloiden [4] . . . . .	9
7	Prozesse der Schichtbildung bei der CVD-Methode: 1...Gaszufuhr von SiH <sub>4</sub> und NH <sub>3</sub> , 2...Diffusion der Reaktanten durch die Grenzschicht, 3...Adsorption der Reaktanten an der Waferoberfläche, 4...chemische Reaktion, 5...Oberflächendiffusion der Reaktionsprodukte, 6...Desorption der Nebenprodukte und 7...Abtransport durch den Gasstrom [5]. . . . .	12
8	Schematischer Aufbau einer PECVD-Anlage, bei der das Plasma durch eine Gaseentladung erzeugt wird (Parallelplattenanlage). Die Elektronentemperatur beträgt $T_{el} = 10\,000\text{--}90\,000\,\text{K}$ (1–8 eV), die Ionentemperatur $T_{ion} = 500\text{--}1\,000\,\text{K}$ , und der Druck liegt bei $p = 0.1\text{--}10\,\text{mbar}$ [5]. . . . .	15
9	Laser-unterstützte CVD: Der Laser erwärmt das Substrat punktuell, wodurch die chemische Reaktion und Schichtabscheidung nur im Bereich des Laserflecks stattfinden [5]. . . . .	15
10	Schematische Anordnung beim Hot-wall-Reaktor [5]. . . . .	16
11	Schematischer Aufbau des Cold-wall-Reaktors [5]. . . . .	16
12	Abscheidung von Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (Aluminiumoxid) mittels ALD [5]. . . . .	18
13	Vergleich Positiv- und Negativresist [6]. . . . .	20
14	Kohlenstoff-MEMS-Strukturen mit hohem Aspektverhältnis (Höhe zu Breite) [7]. . . . .	22
15	Vereinfachter Ablauf des Lithographieprozesses mit Negativresist [8]. . . . .	23
16	Das Auftragen des Photoresists erfolgt mittels “Spin-Coating”: a) Der Photoresist wird mittig auf den ruhenden Wafer aufgetragen. b) Der Wafer wird beschleunigt – die zeitliche Änderung der Winkelgeschwindigkeit $\omega$ ist ungleich Null. c) Bei konstanter Winkelgeschwindigkeit wird der Photoresist aufgrund der Zentrifugalkräfte gleichmäßig an die Ränder des Wafers gedrückt und so auf der Oberfläche verteilt. d) Schließlich wird das Lösungsmittel mittels “Softbake” im Photoresist verdampft [9].	25
17	Die drei Belichtungsverfahren in der Lithographie: a) Kontaktbelichtung, b) Proximity-Belichtung und c) Projektionsbelichtung. Die zu strukturierende Schicht ist hier leider nicht eingezeichnet. Diese befindet sich zwischen Wafer und Resist (z.B. Siliziumdioxid SiO <sub>2</sub> ) [10]. . . . .	26
18	Kontaktbelichtung im Detail [11]. . . . .	26
19	Proximity-Belichtung im Detail. Der Abstand zwischen Resist und Maske ist mit $g$ (gap) bezeichnet, und $b$ steht für die (minimale) Linienbreite des Absorbers [11]. . . . .	27
20	Projektionsbelichtungssystem mit Öffnungswinkel $\alpha$ der Optik [11]. . . . .	28
21	Nach Lithographie mit SU-8 Photoresist entstandene Wände mit sehr hohem Aspektverhältnis [12]. . . . .	29
22	Nach Lithographie mit SU-8 Photoresist entstandene Säulen [13]. . . . .	30
23	Nach Lithographie mit SU-8 Photoresist entstandene Strukturen und entstandenes Logo von KemLab Inc. [14]. . . . .	30
24	Vergleich des Standardverfahrens in der Lithographie mit Negativresist (links) und dem Verfahren mittels Lift-Off (rechts) [15]. . . . .	31
25	Mit dem Lift-Off-Verfahren hergestellte Kupferbahn auf einem Wafer. Links: Wafer mit strukturiertem Photoresist, wobei die negativen Flanken gut zu erkennen sind. Mitte: Querschnitt der gleichen Anordnung nach dem Sputtern. Auf dem Photoresist und dem Wafer wurde Kupfer abgeschieden. Rechts: Endresultat nach dem Strippen – eine Kupferbahn [16]. . . . .	32

26	Metallbahnen auf einem Wafer, hergestellt durch das MLO-Verfahren (MLO, Metal-Lift-Off, entspricht dem klassischen Lift-Off-Verfahren). Im oberen Bild ist der Photoresist mit negativen Flanken zu sehen, der mit Metall beschichtet wurde. Das untere Bild zeigt das Endresultat nach dem Entfernen des Photoresists mit einem geeigneten Lösungsmittel [17]. . . . .	32
27	Elementarzelle des Siliziumkristalls [18]. . . . .	35
28	Wichtige Richtungen im kubischen Kristallsystem: Die Richtung [111] entsteht durch die vektorielle Zusammensetzung aus jeweils einem Schritt in x-, y- und z-Richtung [19]. . . . .	35
29	Darstellung wichtiger Ebenen in kubischen Elementarzellen. Beispiel: Die (100)-Ebene schneidet die x-Achse bei 1 und verläuft parallel zur y- und z-Achse, da sie diese in der Unendlichkeit ( $\infty$ ) schneidet. Die Miller'schen Indizes dieser Ebene ergeben sich aus den Kehrwerten der Schnittpunkte mit den Achsen: 1/1 für x, 1/ $\infty$ für y und 1/ $\infty$ für z, woraus die Indizes (100) resultieren [19]. . . . .	35
30	Darstellung der verschiedenen Ätzprofile: ① isotrop, ② anisotrop durch Trockenätzen und ③ anisotrop durch KOH-Ätzen [20]. . . . .	36
31	Veranschaulichung des Anisotropiefaktors [20]. . . . .	37
32	Veranschaulichung der Selektivität [20]. . . . .	37
33	KOH-Ätzgräben in einer a) {100}- und b) {110}-Siliziumscheibe. . . . .	38
34	Veranschaulichung einer Ätzstoppebene (rot) in einem Silizium-Wafer (weiß). Der Ätzprozess wird an dieser Ebene stark verlangsamt [20]. . . . .	39
35	Barrel-Ätzverfahren: Das Plasma ist vom Ätzbereich getrennt, sodass nur reaktive Teilchen in die Ätzkammer gelangen. Hauptanwendung ist das Entfernen (Veraschen, Strippen) von Photoresist im Sauerstoffplasma [20]. . . . .	40
36	Plasma-Ätzverfahren: Das Plasma wird direkt im Ätzbereich erzeugt, wodurch eine hohe Reaktivität erzielt wird [20]. . . . .	41
37	Sputterätzen: Prozessdruck im Bereich von 1 – 10Pa [20]. . . . .	41
38	Ionenstrahlätzen (IBE): Hochvakuumbereich von $< 10^{-2}$ Pa, bei dem die Ionen durch einen Glühfaden neutralisiert werden. Typische Ätzraten liegen im Bereich einiger 10 nm/min [20]. . . . .	42
39	Typen von RIE-Reaktoren: Oben - Parallelplattenreaktor, Unten - Barrelreaktor [20]. . . . .	42
40	Prozessablauf des Deep Reactive Ion Etching (DRIE): Schrittweise Darstellung der abwechselnden Passivierungs- und Ätzzyklen, die zu tiefen und hochgradig anisotropen Strukturen führen [21]. . . . .	43
41	Ein Silizium-Mikropfeiler, hergestellt mittels Bosch-Prozess [22]. . . . .	44
42	Gewellte Seitenwand einer Siliziumstruktur, hergestellt mit dem Bosch-Prozess [22]. . . . .	44

# Einleitung

Diese Zusammenfassung von MEMS-Herstellungsverfahren, die in der Vorlesung *Sensorik und Sensorsysteme* (366.071) an der TU Wien behandelt werden, dient als umfassende Lernhilfe und wurde sorgfältig erstellt. Nach dem Durcharbeiten sollten Leserinnen und Leser die prüfungsrelevanten theoretischen Fragen zu diesem Thema beantworten können und ein vertieftes Verständnis der vermittelten Inhalte gewinnen.

Da trotz sorgfältiger Erstellung Fehler vorkommen können, sind Leserinnen und Leser herzlich eingeladen, auf mögliche Unstimmigkeiten zu achten und diese an [e1616023@student.tuwien.ac.at](mailto:e1616023@student.tuwien.ac.at) zu melden. Alternativ können Korrekturen direkt im Repository auf GitHub vorgenommen werden: <https://github.com/ofes/sensorik-und-sensorsysteme>. Falls eine Zugriffsberechtigung benötigt wird, kann eine Anfrage an <https://github.com/ofes> gesendet werden. Gute Lernunterlagen sind mir besonders wichtig, da sie die Motivation beim Lernen erheblich steigern – daher bin ich für jedes Feedback dankbar.

Viel Erfolg beim Lernen!

# 1 Physical Vapour Deposition

PVD (Physical Vapour Deposition) umfasst alle **physikalischen Verfahren zur Abscheidung dünner Schichten aus der Dampfphase**. Dabei werden die Ausgangsmaterialien der Schichten durch physikalische Prozesse wie Erhitzen in die Dampfphase überführt und anschließend auf dem Zielobjekt abgeschieden. Die **typischen Schichtdicken** liegen **zwischen 1 nm und 1 µm** und können **in Ausnahmefällen bis zu 10 µm** erreichen [1].

## 1.1 Begriffsklärung für PVD

Dieser Abschnitt bietet eine Einführung in wichtige, häufig verwendete Begriffe. Es empfiehlt sich, zunächst die nachfolgenden Abschnitte zu lesen und bei Bedarf hier nach unbekannten Begriffen zu suchen.

- **Monolage:** Eine Monolage (auch Monoschicht genannt) beschreibt eine Schicht, die nur aus einer einzelnen Lage von Atomen oder Molekülen besteht [23].
- **Freie Weglänge:** Die freie Weglänge eines Atoms oder Moleküls in einem Plasma oder Gas ist die durchschnittliche Strecke, die ein Teilchen (wie ein Atom, Ion oder Molekül) zurücklegt, bevor es mit einem anderen Teilchen kollidiert. Diese Weglänge hängt stark von der Teilchendichte und dem Durchmesser der beteiligten Teilchen ab [23].
- **Verdampfen:** Bezeichnet den Übergang eines Stoffes vom flüssigen in den gasförmigen Zustand [23].
- **Sublimieren:** Beschreibt den direkten Übergang eines Stoffes vom festen in den gasförmigen Zustand, ohne eine flüssige Phase zu durchlaufen [23].
- **Rezipient:** Vakuumkammer [1, 24].
- **Substrat:** Trägerschicht in der Mikroelektronik und Halbleiterfertigung. Der Begriff Substrat bezieht sich allgemein auf das Material oder die Oberfläche, auf der ein Herstellungs- oder Beschichtungsprozess stattfindet [24].
- **Wafer:** Dünne Scheibe aus einem Halbleitermaterial, wie z.B. Silizium, und dient als Substrat [25].
- **Tiegel (Aufdampfen):** Ein Behälter, in dem das Aufdampfmaterial lokal geschmolzen wird, häufig aus Materialien wie Graphit, Keramik oder Wolfram, die hohen Temperaturen standhalten [24, 26]. Beim Elektronenstrahlverdampfen (E-Beam-Verfahren) wird das Aufdampfmaterial im Tiegel erhitzt und verdampft, ohne dass der gesamte Tiegel erhitzt werden muss [26]. Siehe Abbildung 2 b), c) und d).
- **Schiffchen (Aufdampfen):** Ein kleiner, meist bootförmiger Behälter (daher der Name), der ebenfalls zur Aufnahme des Aufdampfmaterials dient, jedoch direkt beheizt wird, häufig durch Widerstandsheizung. Schiffchen bestehen oft aus Materialien wie Molybdän oder Wolfram, da sie hohe Temperaturen aushalten können [24, 27]. Siehe Abbildung 1 und Abbildung 2 a).
- **Target (Sputtern):** Materialquelle für die Schicht, die auf das Substrat abgeschieden werden soll [1].
- **Inerte Gase:** Auch als **Edelgase** bekannt, sind chemisch reaktionsträge Gase, die unter normalen Bedingungen kaum mit anderen Elementen oder Verbindungen reagieren. Zu den Edelgasen zählen Helium, Neon, Argon, Krypton, Xenon und Radon. Diese geringe Reaktivität ist auf ihre stabile, vollständig besetzte Elektronenkonfiguration in der äußersten Schale zurückzuführen, die sie energetisch stabil und widerstandsfähig gegenüber chemischen Reaktionen macht [28–30].

- **Gasentladung:** Bezeichnet einen physikalischen Prozess, bei dem ein elektrisches Feld in einem gasförmigen Medium zur Ionisation der Gasmoleküle führt, wodurch leitfähige Plasmen entstehen. Die dabei entstehenden freien Elektronen und Ionen ermöglichen den Stromfluss durch das Gas, was zu sichtbaren Leuchterscheinungen führen kann. Solche Entladungen treten beispielsweise in Leuchtstofflampen, Neonröhren und in der Plasmatechnologie auf [31–33].
- **Ionen:** Elektrisch geladene Atome oder Moleküle, die durch den Verlust oder Gewinn von Elektronen entstehen. **Positiv geladene Ionen**, sogenannte **Kationen**, entstehen durch den Verlust von Elektronen, während **negativ geladene Ionen**, sogenannte **Anionen**, durch den Gewinn von Elektronen entstehen. Ionen spielen eine zentrale Rolle in chemischen Reaktionen, da sie die elektrische Ladung transportieren und Reaktionen ermöglichen, die die Bildung oder Trennung von chemischen Bindungen betreffen [34–36].
- **Radikale:** Radikale sind Atome oder Moleküle, die mindestens ein ungepaartes Valenzelektron besitzen, was sie extrem reaktiv macht [37, 38]. Da sie oft instabil sind, neigen sie dazu, mit anderen Molekülen oder Atomen zu reagieren, um eine stabile Elektronenkonfiguration zu erreichen<sup>1</sup>.
- **Valenzelektron:** Valenzelektronen befinden sich in der äußersten Schale eines Atoms und bestimmen die chemischen Eigenschaften eines Elements maßgeblich. Sie ermöglichen die Bindung mit anderen Atomen, wodurch Verbindungen entstehen. Edelgase besitzen volle Valenzschalen, was sie besonders stabil und reaktionsträge macht [34–36].
- **Fraktionale Verdampfung von Legierungen (Aufdampfen):** Tritt auf, wenn die unterschiedlichen Siedepunkte der Metallkomponenten dazu führen, dass zunächst die Elemente mit niedrigerem Siedepunkt verdampfen, wodurch die Zusammensetzung des verbleibenden Materials verändert wird [40, 41]. Dadurch können die Dampfphasen eine andere Zusammensetzung als die ursprüngliche Legierung aufweisen, was zu inhomogenen Beschichtungen führen kann [42, 43].
- **Dampfphasen:** Die gasförmigen Bestandteile, die entstehen, wenn feste oder flüssige Materialien durch Zuführung von Wärme in die Gasphase übergehen, wie es bei der Verdampfung und Sublimation der Fall ist [44–46].
- **UHV:** “Ultra-High Vacuum” bezeichnet ein Vakuum mit einem Druck von unter  $10^{-9}$  mbar [24, 26, 28].

## 1.2 PVD-Verfahren

Die verschiedenen PVD-Verfahren unterscheiden sich hauptsächlich in der Methode zur Erzeugung des Dampfstrahls [1]:

1. **Thermisches Verdampfen (Aufdampfen)**
2. **Sputtern (Zerstäubung)**
3. **Laserstrahlverdampfen (pulsed laser deposition, PLD)**
4. **Molekularbeamepitaxie (MBE)**

Im Folgenden werden lediglich die ersten beiden Methoden erläutert.

---

<sup>1</sup>Im Kontext von Dünnenschichtprozessen wie dem Sputtern werden Radikale oft durch das energiereiche Plasma gebildet, das Bindungen in Molekülen aufbrechen kann [32, 33]. Diese Radikale können dann auf der Oberfläche der zu beschichtenden Materialien reagieren, wodurch die Schichtzusammensetzung und -struktur beeinflusst wird [39].

## 1.3 Aufdampfen

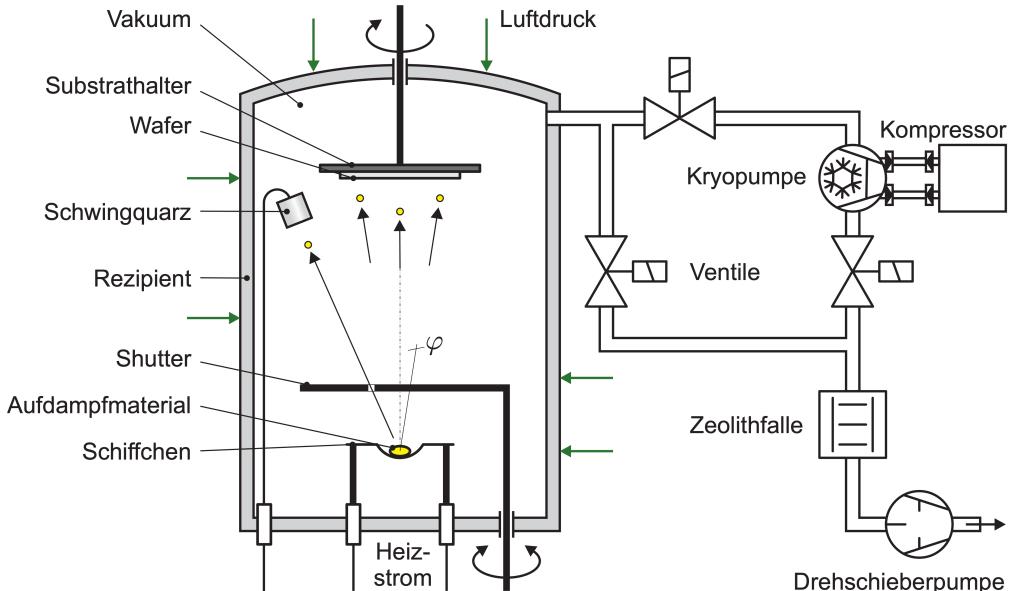
Das thermische Aufdampfen gehört zu den ältesten Methoden zur Herstellung dünner Schichten ([Abbildung 1](#)). Dabei wird das **Material der Aufdampfquelle auf eine Temperatur von 500 bis 3000°C erhitzt**, bis es einen ausreichend hohen Dampfdruck<sup>2</sup> entwickelt [1].

Meist schmilzt das Material dabei, doch einige Stoffe, wie beispielsweise Chrom, erreichen bereits vor dem Schmelzpunkt einen ausreichend hohen Dampfdruck und sublimieren, indem sie direkt aus dem festen Zustand verdampfen [1].

Der **entstehende Dampf** breitet sich aus und **kondensiert an allen kälteren Oberflächen** in der Vakuumkammer, **einschließlich des Substrats**. Der Prozess findet im **Vakuum bei Drücken von typischerweise unter  $10^{-6}$  mbar statt** [1].

Dabei ist die **freie Weglänge der Teilchen deutlich größer als die Distanz zwischen der Aufdampfquelle und dem Substrat**. Dies führt dazu, dass die Teilchen **nur selten mit dem Restgas kollidieren und sich geradlinig von der Quelle zum Substrat bewegen** [1].

Die **kinetische Energie der Teilchen, die auf der Substratoberfläche kondensieren**, beträgt etwa **0,1 bis 0,5 eV**, was im Vergleich zum Sputtern (bis zu 100 eV) sehr gering ist [1].



**Abbildung 1:** Schematischer Aufbau einer PVD Aufdampfanlage [1].

### 1.3.1 Funktionsweise

Basierend auf [Abbildung 1](#) wird im Folgenden die Funktionsweise dieses Verfahrens erläutert [1]:

1. **Vakuum:** Im Rezipienten wird mit dem Pumpensystem ein Vakuum erzeugt.
2. **Aufheizen:** Das Aufdampfmaterial wird auf eine Temperatur von 500 bis 3000 °C erhitzt.
3. **Öffnen des Shutters:** Sobald ein ausreichend hoher Dampfdruck erreicht ist, wird der Shutter weggeschwenkt, um die Bedampfung des Substrats zu ermöglichen. Wird der Shutter zu

<sup>2</sup>Ein hoher Dampfdruck ist beim Aufdampfen entscheidend, da er sicherstellt, dass genügend Atome oder Moleküle des Materials in die Gasphase übertreten und eine dampfartige Wolke bilden. Diese Wolke ermöglicht eine ausreichende Partikelzufuhr zum Zielsubstrat, wodurch sich eine gleichmäßige, dünne Schicht bildet. Bei zu geringem Dampfdruck wären nur wenige Teilchen verdampft, was zu einer ungleichmäßigen und ineffizienten Beschichtung führen würde.

früh geöffnet oder ist er während des Aufheizens nicht vorhanden, kann es zu einer ungleichmäßigen Abscheidung kommen bzw. es können unerwünschte Oxide des Aufdampfmaterials auf das Substrat abgeschieden werden. Der Weg der Teilchen zum Substrat wird daher durch ein Schirmblech (Shutter) blockiert.

4. **Abscheidung am Substrat:** Das Aufdampfmaterial kondensiert nun mit einer konstanten Rate sowohl auf dem Substrat als auch auf dem Schwingquarz. Der Schwingquarz dient zur Messung der Schichtdicke, indem Änderungen seiner Resonanzfrequenz erfasst werden.

### 1.3.2 Schichtdickenmessung

Zur Messung der Schichtdicke wird ein **piezoelektrisches Schwingquarzplättchen** verwendet, das **nahe<sup>3</sup> am Substrat positioniert** ist. Durch Anlegen einer Wechselspannung wird das Quarzplättchen in eine (Scher-)Schwingung versetzt. Wenn das **Aufdampfmaterial auf dem Quarz kondensiert** und seine Masse zunimmt, **sinkt die Resonanzfrequenz** des Quarzes. Diese Abnahme der Frequenz ist **proportional zur Dicke der abgeschiedenen Schicht** und dient als Messgrundlage. Die Resonanzfrequenz startet typischerweise bei etwa 5 MHz und sollte, wenn sie auf 4 MHz fällt, zum Austausch des Quarzplättchens führen, um präzise Messwerte sicherzustellen [1].

### 1.3.3 Erwärmung mittels Elektronenstrahlquelle (E-Beam-Verfahren)

Bei dieser Methode wird ein **Elektronenstrahl gezielt auf einen kleinen Bereich des Aufdampfmaterials fokussiert**, sodass das Material **lokal aufgeschmolzen** wird, während der Großteil fest bleibt (**Abbildung 2 b), c) und d)**). Der **Tiegel** selbst wird dabei **nicht auf hohe Temperaturen erhitzt**, was das **Risiko einer Kontamination durch das Tiegelmaterial verringert und höhere Arbeitstemperaturen** als bei herkömmlichen Quellen, wie Schiffchenquellen, ermöglicht (**Abbildung 2 a)**). Um eine **effektive Wärmeableitung** sicherzustellen, besteht der **Tiegel aus Kupfer** und wird direkt vom **Kühlwasser durchströmt**. Das **Aufdampfmaterial** muss **leitfähig** sein, da sich andernfalls elektrische Ladungen ansammeln könnten, die den Elektronenstrahl ablenken könnten [1].

Ein **Permanentmagnet in der Nähe der Elektronenstrahlquelle lenkt den Strahl um 270° ab**, sodass die **Quelle selbst nicht beschichtet wird** (**Abbildung 2 b) und c)**). Die **Steuerung des Systems** ermöglicht zudem ein **Fokussieren oder Defokussieren des Strahls**, eine **präzise Positionierung über Spulen** sowie eine **kontrollierte Leistungsanpassung** bis zu 5 kW. Durch ein leichtes Wobbeln des Strahls kann ein größerer Bereich des Aufdampfmaterials überstrichen werden, was zu einem gleichmäßigen Erhitzen führt [1].

## 1.4 Sputtern (Zerstäubung)

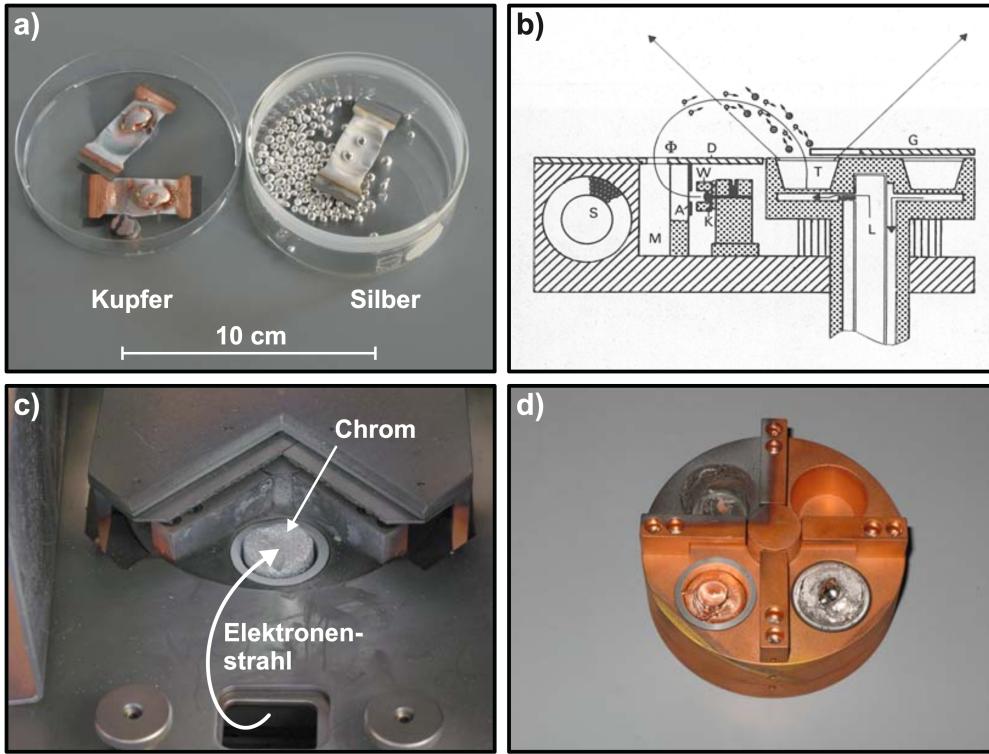
Der Sputterprozess ist ein **Abscheidungsverfahren**, bei dem **Atome aus dem Target**, der Materialquelle für die gewünschte Schicht, **durch energiereiche Ionen herausgeschlagen** und **auf dem Substrat abgeschieden** werden. **Abbildung 3** zeigt den schematischen Aufbau einer Sputteranlage [1].

### 1.4.1 Funktionsweise

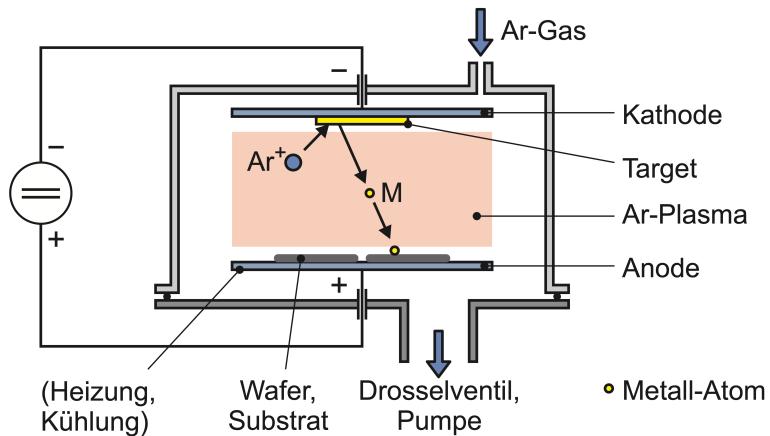
Anhand der **Abbildung 3** wird die Funktionsweise der Sputteranlage näher erläutert [1]:

---

<sup>3</sup>Da Schwingquarz und Substrat unterschiedliche Abstände zur Aufdampfquelle haben und sich zudem unterschiedlich nah an der Achse des Aufdampfstrahls befinden, ergeben sich unterschiedliche Aufdampfraten. Diese Abweichungen werden durch einen experimentell zu bestimmenden Geometriefaktor (Tooling-Factor) korrigiert.



**Abbildung 2:** a) Aufdampfschiffchen, mit Aluminiumoxid (milchige Bereiche) beschichtet, um das Benetzen durch das Aufdampfmaterial zu minimieren. b) Schematischer Aufbau einer Elektronenstrahlquelle: S...Spule, A...Anode, K...Kathode, W...Wehneltzyylinder, T...Tiegel mit Aufdampfmaterial, L...Wasserkühlung, M...Permanentmagnet. c) Elektronenstrahlquelle im Inneren der Vakuumbüchse (Rezipient). d) Vierlochtiegel für die Elektronenstrahlquelle, der Beschichtungen aus bis zu vier verschiedenen Materialien ermöglicht [1].

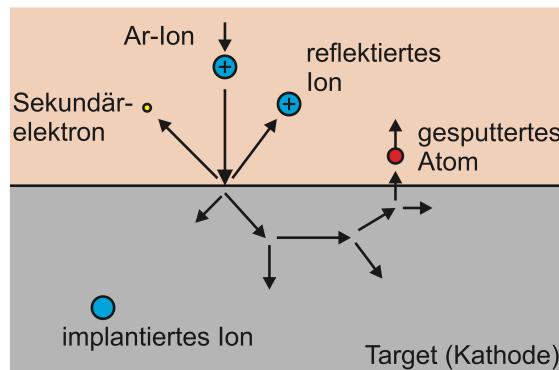


**Abbildung 3:** Schematischer Aufbau einer Sputteranlage [1].

1. In einem **inerten Gas**, typischerweise **Argon** mit einem **Druck von 0,2 bis 10 Pa**, wird durch eine **Gasentladung** ein **Plasma erzeugt**, das die für den **Sputterprozess benötigten Kationen ( $\text{Ar}^+$ ) bereitstellt.**
2. Durch die **Spannung zwischen Plasma und Sputtertarget** (Schichtmaterial) werden die **Ionen zum Target hin beschleunigt** und erreichen dabei **Energien von einigen 10 eV**.
3. Trifft ein **Ar-Ion** auf die **Targetoberfläche**, kommt es zu **elastischen und inelastischen**

schen Stößen mit den Targetatomen. Inelastische Stöße erzeugen Sekundärionen (Sekundärelektronen) für das Plasma, während elastische Stöße eine Stoßkaskade auslösen, die durch Impulsübertragung Atome aus dem Target herausschlagen kann (Abbildung 4). Eine Energie von mindestens 10 bis 30 eV ist dafür notwendig, wobei die Sputtereffizienz mit steigender Energie bis zu einem Maximum von etwa 10 keV zunimmt. Danach sinkt die Effizienz, da die Ionen zu tief eindringen und weniger Energie an die Oberfläche übertragen wird. Die Effizienz dieser Stoßkaskaden hängt zudem vom Massenverhältnis zwischen Sputterion und Targetatom ab.

4. Die herausgeschlagenen Atome bewegen sich in Richtung des Substrats. Auf ihrem Weg stoßen sie mehrfach mit den Atomen des Prozessgases zusammen, wodurch sie einen Teil ihrer Energie verlieren und ihre Winkelverteilung breiter wird.
5. Die Teilchen treffen auf das Substrat (z.B. mit einer Energie von 10 eV) und lagern sich dort ab. Aufgrund der breiten Winkelverteilung werden dadurch nicht nur die Oberseite, sondern auch die Seitenflächen der Strukturen auf dem Substrat beschichtet (daher auch der Name “Sputtern” – *to sputter* = zerstäuben).



**Abbildung 4:** Herauslösen eines Targetatoms durch die vom Sputterion ausgelöste Stoßkaskade [1].

#### 1.4.2 Sputterverfahren

Im Folgenden werden ausgewählte Sputterverfahren näher erläutert und deren Funktionsweise beschrieben.

**DC-Sputtern:** Hier wird die Gasentladung mittels einer Gleichspannung erzeugt. Daher muss das Target leitfähig sein, da es sich sonst auflädt und die Gasentladung unterbrochen würde. Diese Form des Sputterns eignet sich somit nur für Metalle und Halbleiter [1].

**AC-Sputtern:** Ein hochfrequentes elektrisches Feld wird über einen Kondensator an die Elektroden angelegt, wodurch ein Gleichspannungsanteil blockiert wird. Ionen können dem Feldwechsel ab etwa 100 kHz nicht mehr folgen, während Elektronen weiterhin Energie aufnehmen und mehr Gasteilchen ionisieren. Dadurch entsteht eine höhere Plasmarate als beim DC-Sputtern, und der Druck kann bei gleicher Sputterraten auf etwa  $10^{-1}$  bis  $10^{-2}$  Pa gesenkt werden<sup>4</sup> [1].

Die **Vorteile** umfassen [1]:

<sup>4</sup>Da die herausgeschlagenen Targetatome aufgrund der geringeren Anzahl an Kollisionen mit den Prozessgasatomen weniger gestreut werden, erreichen sie das Substrat direkter. Dadurch werden die Seitenflächen der Strukturen auf dem Substrat weniger beschichtet als beim DC-Sputtern.

- Auch Isolatoren wie  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (Aluminiumoxid) und Halbleiter können gesputtert (zerstäubt) werden.
- Das Substrat erhitzt sich weniger als beim DC-Sputtern.
- Sputterraten sind bis zu zehnmal höher als beim DC-Sputtern.

Ein Nachteil ist der höhere apparative Aufwand [1].

**Magnetronsputtern:** Beim Magnetronsputtern sind Permanentmagnete hinter der Kathode angebracht, die ein Magnetfeld erzeugen (Abbildung 5). Dieses bewirkt, dass sich die Elektronen in Zykloidenbahnen bewegen (Abbildung 6) und länger in der Nähe des Targets bleiben<sup>5</sup>, wodurch mehr Gasatome ionisiert werden und die Plasmadichte steigt. Dies erhöht die Sputterraten und ermöglicht es, den Druck bei gleicher Sputterraten deutlich zu senken, was dichtere Schichten erzeugt. Aufgrund der kürzeren Beschichtungszeit wird das Magnetronsputtern in industriellen Anlagen häufig verwendet [23].

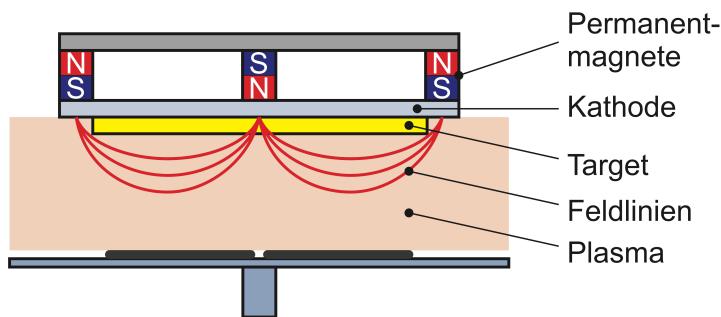


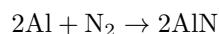
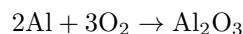
Abbildung 5: Schematischer Aufbau einer Magnetron-Sputteranlage [1].

Die Grundlage für diese Überlegung ist die Lorentzkraft, welche die Kraft beschreibt, die auf eine bewegte elektrische Ladung in einem elektrischen und magnetischen Feld wirkt. Diese Kraft wird durch

$$\vec{F} = e(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$$

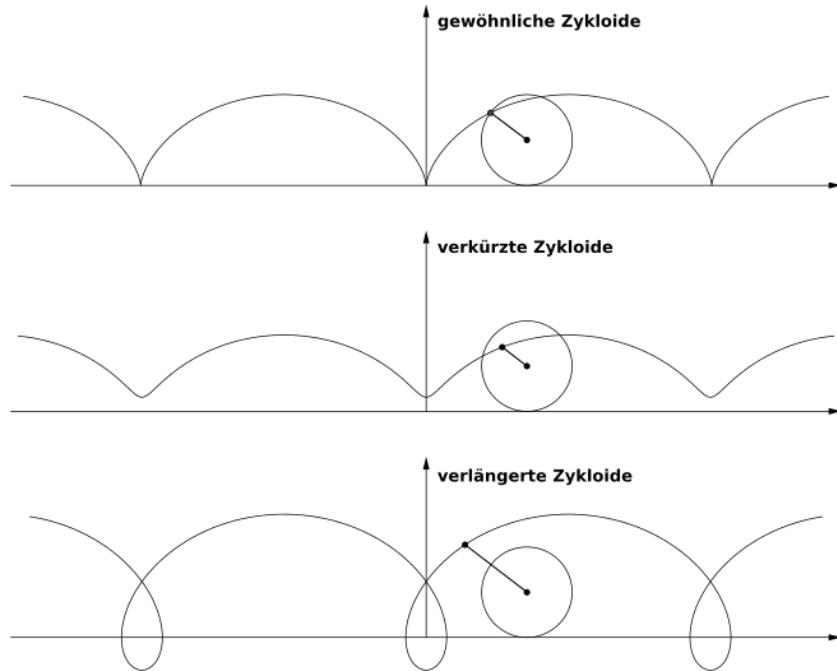
beschrieben. Dabei stellt  $\vec{F}$  die Lorentzkraft in Newton dar,  $e$  ist die Elementarladung mit einem Wert von etwa  $1,602 \cdot 10^{-19}$  C,  $\vec{E}$  das elektrische Feld in Volt pro Meter (V/m),  $\vec{v}$  die Geschwindigkeit der Ladung in Metern pro Sekunde (m/s), und  $\vec{B}$  die magnetische Flussdichte in Tesla (T). Das Kreuzprodukt  $\vec{v} \times \vec{B}$  zeigt, dass die Kraft  $\vec{F}$  senkrecht sowohl zur Bewegungsrichtung  $\vec{v}$  als auch zum Magnetfeld  $\vec{B}$  steht [27, 31, 47–49].

**Reaktives Sputtern:** Obwohl dem Sputterprozess mehr Materialien zur Verfügung stehen als dem Aufdampfen, gibt es dennoch Stoffe, bei denen sich eine Komponente ungenügend niederschlägt. Durch die Zugabe eines Reaktionsgases zum Plasma können jedoch chemische Reaktionen mit den Targetatomen in der Gasphase eingeleitet werden, sodass sich die gewünschten Verbindungen abscheiden. Ein Beispiel ist die Bildung von Aluminiumoxid und -nitrid:



Dieses Verfahren, bekannt als reaktives Sputtern, wird oft zur Herstellung von Oxiden, Nitriden, Oxinitriden (z.B.,  $\text{SiO}_x\text{N}_y$ ) und Carbidern verwendet. Es lässt sich zudem mit anderen Sputterverfahren, wie dem Magnetronsputtern, kombinieren. Ein Vorteil des reaktiven

<sup>5</sup>Dies ist effektiv, wenn die Magnetfeldlinien parallel zur Oberfläche verlaufen. Liegen sie jedoch parallel zur Elektronenflugbahn (senkrecht zur Targetoberfläche), wirkt keine ablenkende Kraft auf die Elektronen.



**Abbildung 6:** Zykloiden [4]

Sputterns besteht darin, dass die **Stöchiometrie<sup>6</sup>** der abgeschiedenen Schicht durch den Gasdruck des Reaktionsgases gezielt beeinflusst werden kann [1].

## 1.5 Vergleich Aufdampfen - Sputtern

Abschließend werden in [Tabelle 1](#) das thermische Aufdampfen und das Sputtern gegenübergestellt.

“Verbindungen dissoziieren” bedeutet, dass chemische Bindungen im Material beim Aufdampfen thermisch zerfallen<sup>7</sup> können, was die Zusammensetzung verändert. Im Gegensatz dazu tritt beim Sputtern nur eine geringe Dissoziation auf, da der Ionenbeschuss die chemische Stabilität der Verbindungen weitgehend erhält [24, 26, 47].

“Strukturieren durch Ätzen oder Lift-off” sind Verfahren zur Formgebung von Dünnschichtstrukturen. Beim Ätzen wird überschüssiges Material selektiv durch chemische oder physikalische Methoden entfernt, wodurch nur die gewünschte Struktur verbleibt. Das Lift-off-Verfahren hingegen nutzt eine Maske, die nach der Beschichtung entfernt wird, sodass das Material nur an den zuvor maskierten Stellen verbleibt [24, 26, 31]. Mehr dazu folgt in den späteren Kapiteln.

---

<sup>6</sup>Stöchiometrie bezieht sich auf das Verhältnis der Atome oder Moleküle in einer chemischen Verbindung. In einem Material wie Aluminiumoxid ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) beschreibt die Stöchiometrie das Verhältnis von Aluminium- zu Sauerstoffatomen, das hier exakt 2:3 ist. Im Kontext des reaktiven Sputterns bedeutet das, dass die Stöchiometrie der abgeschiedenen Schicht – also das Verhältnis der Elemente im abgeschiedenen Material – durch den Druck des zugeführten Reaktionsgases beeinflusst werden kann. Das bedeutet, dass durch die Menge des Reaktionsgases im Plasma das Verhältnis der chemischen Bestandteile in der abgelagerten Schicht gezielt gesteuert wird. Zum Beispiel könnte eine Erhöhung des Sauerstoffdrucks im Plasma die Menge an Sauerstoff in der Schicht erhöhen, was zur Bildung einer Schicht mit einem höheren Anteil an Sauerstoff führt [24, 27, 47, 50].

<sup>7</sup>Thermischer Zerfall beschreibt den Prozess, bei dem chemische Verbindungen bei hohen Temperaturen in ihre Bestandteile zerfallen, da die Bindungsenergie durch zugeführte Wärme überwunden wird. Dieser Zerfall kann beim Aufdampfen auftreten und die Zusammensetzung der Schicht beeinflussen [24, 26].

1. Dampferzeugung	
Aufdampfen	Sputtern
Thermischer Prozess	Ionenbeschuss und Impulsübertragung
Geringe kinetische Energie ( $1500^{\circ}\text{C}$ : $E \approx 0,1 \text{ eV}$ )	Hohe kinetische Energie ( $E = 10 - 40 \text{ eV}$ )
Neutrale Teilchen	Neutrale Teilchen, Kationen, Radikale, (Anionen)
Fraktionierte Verdampfung bei Legierungen	Relativ gleichmäßiges Verdampfen aller Komponenten
Verbindungen dissoziieren	Geringe Dissoziation
2. Transport	
Aufdampfen	Sputtern
Teilchen im Hochvakuum	Teilchen im Plasma
Keine Kollisionen	Viele Kollisionen
Große freie Weglänge	Kleine freie Weglänge
Teilchen bewegen sich geradlinig von der Quelle zum Substrat	Breite Richtungsverteilung der beim Substrat ankommenden Teilchen
3. Kondensation	
Aufdampfen	Sputtern
Wenig Restgasatome in den Schichten	Starker Einbau von Atomen des Plasmas
Kaum Beeinflussung des Substrats	Starke Beeinflussung durch Ionen
Seitenflächen werden nicht beschichtet, ebene Schichten	Alle Flächen werden beschichtet
Mittelmäßige Haftung der Schichten	Gute Haftung
Hohe Beschichtungsraten	Geringe Beschichtungsraten
Lange Prozesszeit durch UHV	Geringe Anforderung an die Vakuumqualität
Strukturieren durch Ätzen oder Lift-off	Strukturieren hauptsächlich durch Ätzen, fallweise durch Lift-off

**Tabelle 1:** Vergleich Audampfen - Sputtern [1]

## 2 Chemical Vapour Deposition

PVD-Verfahren sind essenzielle Prozesse in der Herstellung miniaturisierter Sensoren, vor allem für metallische Schichten und Dielektrika. Diese Verfahren erfordern feste Ausgangsstoffe, sind jedoch problematisch bei Materialien, die im Prozess disproportionieren<sup>8</sup>, etwa durch Schmelzen beim Aufdampfen. Dadurch können wichtige Komponenten unvollständig in die Schicht eingebaut werden. Im Gegensatz dazu werden bei der **Chemical Vapor Deposition (CVD)** Gase in den Rezipienten einer Anlage geleitet, wo sie chemisch reagieren und die Reaktionsprodukte am Substrat, oft ein Wafer, eine Schicht bilden. Diese chemische Reaktion erfordert Energie, die thermisch oder durch Gasentladung zugeführt wird [5].

Die **Unterscheidung** zwischen CVD und PVD ergibt sich durch die **Form der zugeführten Ausgangsstoffe (Precursor)**: Bei **PVD-Prozessen** werden diese **in fester Form** und bei **CVD-Prozessen** als **Gase** zugeführt. Die thermische Oxidation eines Silizium-Wafers wird nicht als CVD-Prozess betrachtet, da nur der Sauerstoff gasförmig ist, während das Silizium bereits fest im Reaktor vorhanden ist [5].

### Vorteile:

- **Hohe Reinheit** der Schichten, da die Ausgangsgase in hoher Reinheit verfügbar sind.
- **Gute Kantenbedeckung**, auch bei ungünstiger Geometrie.
- Herstellung vieler verschiedener **Schichtmaterialien** möglich.
- **Zusammensetzung kann** während des Prozesses **angepasst werden**.
- **Gute Prozesskontrolle** durch eine **Vielzahl leicht beeinflussbarer Parameter**: Gase, Flussraten, Temperatur, Druck, Frequenz und Leistung des Plasmas.

### Nachteile:

- Relativ **hohe Temperaturen** sind oft **erforderlich**, wodurch **mechanische Spannungen** in die Schicht eingebaut werden. Dies führt zu einer **hohen thermischen Belastung des Wafers** und der darauf befindlichen Strukturen, was Dotierprofile ändern oder Metallschichten zerstören kann.
- **Schwierige Handhabung** der häufig **giftigen und brennbaren Gase**.
- Für viele gewünschte Schichten sind keine gasförmigen Precursoren verfügbar.
- Die **Vielzahl relevanter Parameter** erfordert hohe **Sachkenntnis** des Betreibers der Anlage, insbesondere bei Nichtstandard-Prozessen.

### 2.1 Begriffsklärung für CVD

Dieser Abschnitt bietet eine Einführung in wichtige, häufig verwendete Begriffe. Es empfiehlt sich, zuerst die nahfolgenden Abschnitte zu lesen und hier bei Bedarf unbekannte Begriffe nachzuschauen. Begriffe, die bereits in den vorherigen Abschnitten erklärt wurden, sind **hier nicht erneut aufgeführt**.

- **Precursor:** Ausgangsstoffe bzw. Vorläufersubstanzen (Gase) [5].

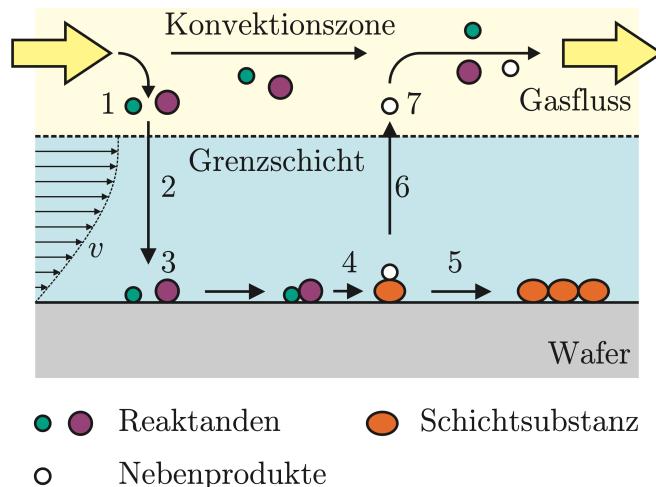
---

<sup>8</sup>Disproportionierung ist ein Prozess, bei dem ein Stoff sich aufteilt: Ein Teil gibt Elektronen ab (Oxidation) und ein anderer Teil nimmt Elektronen auf (Reduktion). Dadurch entstehen zwei neue Stoffe mit dem gleichen Element, aber in verschiedenen Zuständen [34]. In PVD-Prozessen kann dies problematisch sein, weil beim Erhitzen zum Beispiel Metallteile aufbrechen und nicht als ganzes Metall in die Schicht eingebaut werden. Stattdessen bilden sich zwei verschiedene Verbindungen, die nicht alle Eigenschaften des Ausgangsstoffes besitzen, was die Qualität der Schicht beeinflussen kann.

- **Reaktanden:** Stoffe, die bei einer chemischen Reaktion miteinander reagieren, um neue Produkte zu bilden. Man könnte sie als die “Zutaten” einer chemischen Reaktion betrachten [34, 35].
- **Diffusionsprozess:** Ein Diffusionsprozess beschreibt die Bewegung von Teilchen von einem Bereich hoher Konzentration zu einem Bereich niedriger Konzentration, bis die Teilchen gleichmäßig verteilt sind<sup>9</sup> [51, 52]. In der Wissenschaft beschreibt “diffundieren” den Prozess, bei dem Teilchen sich aufgrund eines Konzentrationsgefälles bewegen [53].
- **Erzwungene Konvektion:** Erzwungene Konvektion bedeutet, dass der Transport von Stoffen, wie Gasen, durch eine äußere Kraft unterstützt wird, zum Beispiel durch einen Ventilator oder einen Gasstrom. Dadurch gelangen die Reaktanten gezielt an ihren Bestimmungs-ort [51, 52, 54, 55].
- **Konformität:** Verhältnis der Beschichtungsdicke auf den vertikalen Flächen zu der auf den horizontalen Flächen der Strukturen am Substrat [5].

## 2.2 Funktionsweise

Die Schichtbildung basiert auf einer **Reihe von Teilprozessen**, die je nach Reaktionsgasen komplex ablaufen können (Abbildung 7). Hier werden **beispielhaft** die Teilprozesse zur **Bildung von Siliziumnitrid** beschrieben, das häufig als **Isolationsschicht** dient [5].



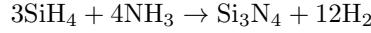
**Abbildung 7:** Prozesse der Schichtbildung bei der CVD-Methode:  
1...Gaszufuhr von SiH<sub>4</sub> und NH<sub>3</sub>, 2...Diffusion der Reaktanten durch die Grenzschicht, 3...Adsorption der Reaktanten an der Waferoberfläche, 4...chemische Reaktion, 5...Oberflächendiffusion der Reaktionsprodukte, 6...Desorption der Nebenprodukte und 7...Abtransport durch den Gasstrom [5].

1. **Gaszufuhr:** Die Reaktanden SiH<sub>4</sub> (Silan) und NH<sub>3</sub> (Ammoniak) werden in die Reaktionskammer geleitet und strömen über das Substrat. Dabei gelangen die Ausgangsstoffe durch erzwungene Konvektion zum Substrat [5].
2. **Diffusion:** Die Geschwindigkeit des Gases nimmt zur Oberfläche hin innerhalb der Prandtl'schen

<sup>9</sup>Man kann es sich vorstellen wie Tinte, die sich langsam in einem Glas Wasser verteilt, ohne dass man umröhren muss.

Grenzschicht<sup>10</sup> bis auf Null ab. Deshalb müssen die Reaktanden diese Schicht durch einen Diffusionsprozess überwinden<sup>11</sup> [5].

3. **Adsorption:** Die Moleküle, die zur Oberfläche hin diffundieren, „kleben“ an der Oberfläche fest (adsorbieren). Dort bleiben sie aber nicht an einer festen Stelle, sondern bewegen sich je nach Temperatur mehr oder weniger stark über die Oberfläche [5, 51, 52].
4. **Reaktion:** Die Ausgangsstoffe reagieren an der Oberfläche. Bei der Bildung von Siliziumnitrid folgt die Reaktion der chemischen Gleichung:



Ein Teil der Reaktion kann jedoch auch schon in der Gasphase ablaufen. Das ist meist unerwünscht, weil dabei feste Partikel entstehen können, die sich dann als Staub ablagern. Um sicherzustellen, dass die Reaktion vor allem an der Oberfläche stattfindet, hält man den Prozessdruck typischerweise zwischen 0,01 und 10 mbar oder verdünnt die Gase mit einem Trägergas<sup>12</sup> [5].

5. **Oberflächendiffusion:** Durch diesen Vorgang wird das Reaktionsprodukt  $\text{Si}_3\text{N}_4$  (Siliziumnitrid) in die Schicht eingebaut<sup>13</sup> und möglichst bis an die Schichtkante transportiert [5].
6. **Desorption:** Bei der chemischen Reaktion entstehen nicht nur die gewünschten Schichtbestandteile, sondern auch Nebenprodukte (wie hier  $\text{H}_2$ ), die an der Oberfläche „kleben“ (adsorbiert sind) bleiben. Diese müssen sich wieder lösen (desorbieren) und dann durch die Grenzschicht „hindurchwandern“ (diffundieren), um entfernt zu werden [5].
7. **Abtransport:** Im letzten Schritt werden die Nebenprodukte vom konvektiven Gasfluss mitgenommen und abtransportiert [5].

Je nach **Beschichtungsparametern**, insbesondere der **Temperatur**, können auch **Nebenprodukte in die Schicht eingebaut** werden, was die **Schichtqualität erheblich beeinflusst**. **Siliziumnitride**, die bei **niedrigen Temperaturen abgeschieden** werden, enthalten **mehr Wasserstoff** und sind daher **weniger ätzresistent** als Hochtemperaturnitride. Auch die **Oberflächendiffusion hängt stark von der Temperatur ab**: Niedrigere Temperaturen führen zu geringerer Beweglichkeit auf der Oberfläche und somit zu **poröseren Schichten** [5].

## 2.3 CVD-Anlagen

Die verschiedenen CVD-Anlagen können nach unterschiedlichen Kriterien wie Betriebs- oder Konstruktionsparametern klassifiziert werden. Es gibt zahlreiche mögliche Kombinationen, wobei jedoch nicht alle theoretischen Optionen vollständig genutzt werden. Einige dieser Kriterien werden im Folgenden genauer besprochen [5]:

- **Verbrauch an Reaktanden**
- **Reaktionsort**
- **Energiezufuhr**
- **Erwärmte Anlagenteile**
- **Druck**

---

<sup>10</sup>Die Prandtl'sche Grenzschicht ist der Bereich in der Nähe einer Oberfläche, in dem die Strömungsgeschwindigkeit eines Fluids von der maximalen Geschwindigkeit bis auf Null abnimmt. Innerhalb dieser Schicht verlangsamt sich das Fluid aufgrund der Reibungskräfte an der Grenzfläche [56].

<sup>11</sup>Die Reaktanden diffundieren durch die Prandtl'sche Grenzschicht zur Oberfläche [51, 52].

<sup>12</sup>Durch das Reduzieren des Drucks oder die Zugabe eines Trägergases wird die Dichte der Ausgangsstoffe verringert, sodass die Moleküle seltener aufeinanderstoßen. Dadurch haben die Reaktanten eine höhere Chance, die Oberfläche zu erreichen und dort zu reagieren, statt bereits in der Gasphase zu reagieren.

<sup>13</sup>Damit ist gemeint, dass das Reaktionsprodukt in die Oberfläche diffundiert. Es wandert also in die Schicht hinein und verteilt sich.

### 2.3.1 Verbrauch an Reaktanden

Ein wichtiges Kriterium ist der Verbrauch der Reaktanden, der darüber entscheidet, **welcher CVD-Reaktor für welchen Anwendungsfall geeignet** ist. Man unterschiedet zwischen Differential- und Integralreaktoren [5].

**Differentialreaktor:** Fast die gesamte Menge der Ausgangsstoffe, die in die Reaktionskammer eintritt, verlässt diese auch wieder. Lediglich eine vergleichsweise kleine (differentielle) Menge wird tatsächlich verbraucht und abgeschieden. Aus Sicht des Materialeinsatzes ist **dieser Reaktortyp** zwar unökonomisch, jedoch bleiben die **Konzentrationen im Reaktor konstant**, was **gleichmäßige Beschichtungen** ermöglicht [5].

**Integralreaktor:** Entlang des Gasstroms entsteht ein **deutlicher Konzentrationsgradient**, wobei stromabwärts ein **Mangel an Reaktanden** auftritt (*starved reactor*). Diese Reaktoren sind aufgrund der **hohen Abscheideraten** gut für die Produktion geeignet. Bei hohen Temperaturen und entsprechend hoher Oberflächenbeweglichkeit können **auch hier homogene Schichten** erzielt werden.

### 2.3.2 Reaktionsort

Bei diesem Kriterium wird unterschieden, **an welchem Ort in der CVD-Anlage die Reaktanden miteinander reagieren** [5].

**Homogene CVD:** Die Reaktanden reagieren bereits **in der Gasphase**, wobei das **Reaktionsprodukt durch die Grenzschicht zum Substrat diffundiert** und sich **dort abschiedet**. Solche CVD-Prozesse führen häufig zu **schlecht haftenden Schichten** mit deutlich mehr **Defekten** [5].

**Heterogene CVD:** Die Schicht bildet sich durch die **chemische Reaktion direkt an der Substratoberfläche**. Aufgrund der **besseren Schichteigenschaften** wird diese Variante **in der Mikrosystemtechnik bevorzugt** [5].

### 2.3.3 Energiezufuhr

Ein weiteres wesentliches Kriterium ist die Energiezufuhr, die bestimmt, **wie die für die Reaktion benötigte Energie bereitgestellt wird** [5].

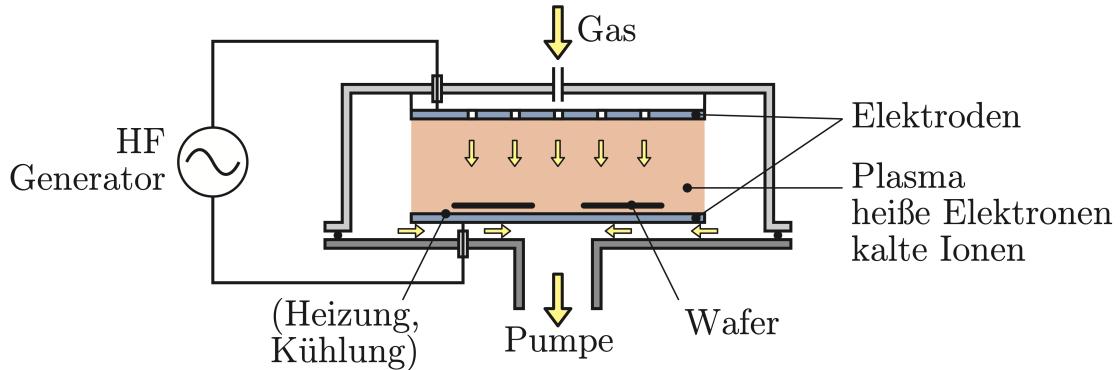
**Thermische Anregung:** Das **Substrat** wird **mithilfe von Öfen oder Heizplatten** auf die erforderliche **Reaktionstemperatur gebracht** [5].

**Plasma:** Durch eine **Gasentladung** entsteht ein Plasma, das den **Großteil der Energie für die chemische Reaktion** bereitstellt, weshalb man von **PECVD (plasma enhanced CVD)** spricht. Die **thermische Belastung der Oberfläche und des Sunstrats** bleibt dabei **gering**<sup>14</sup> [5].

---

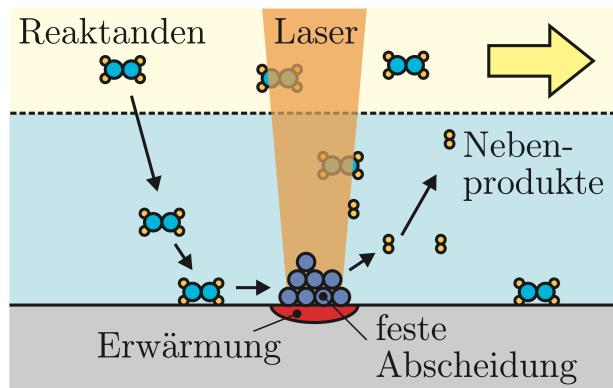
<sup>14</sup>In der Physik bezeichnet man ein Plasma als ein teilweise oder vollständig ionisiertes Gas. Plasmen werden in "heiß" und "kalt" unterteilt, je nachdem, ob thermisches Gleichgewicht zwischen den Teilchen besteht. In einem heißen Plasma haben Elektronen und Ionen die gleiche Temperatur (typischerweise  $kT > 5000 \text{ K}$ ), die notwendig ist, um Elektronen aus Atomen herauszuschlagen. In einem kalten Plasma hingegen ist nur die Temperatur der Elektronen hoch, während die Ionen und neutralen Gasteilchen deutlich kühler bleiben. Das liegt daran, dass Elektronen etwa 100.000-mal leichter als Ionen sind und somit kaum Energie mit diesen austauschen können, ähnlich wie ein Tischtennisball, der eine Billardkugel trifft. Aufgrund des geringen Drucks in Plasmaanlagen ist die freie Weglänge groß, was zu wenigen Kollisionen führt, bevor die Teilchen die Anlage verlassen. Bei der Anregung des Plasmas durch eine Gasentladung werden die Elektronen erhitzt, ohne das Gas insgesamt zu erwärmen. Die hochenergetischen Elektronen ionisieren oder dissoziieren das Restgas und ermöglichen chemische Reaktionen, die normalerweise bei niedrigen Temperaturen nicht stattfinden würden, wodurch die thermische Belastung des Substrats und der Oberflächen gering bleibt [5].

Das **Plasma kann kapazitiv** durch parallel angeordnete Elektroden (Parallelplattenanlage) – zu sehen in [Abbildung 8](#) – **oder induktiv** durch eine Spule um die Reaktorkammer (ICP-Anlage, *inductive coupled plasma*) **angeregt werden**. Dabei wird häufig die industriefreigegebene Frequenz von 13,56 MHz verwendet, und die Anlagen sind aufgrund ihrer **starken elektromagnetischen Strahlung** abgeschirmt [5].



**Abbildung 8:** Schematischer Aufbau einer PECVD-Anlage, bei der das Plasma durch eine Gasentladung erzeugt wird (Parallelplattenanlage). Die Elektronentemperatur beträgt  $T_{el} = 10\,000\text{--}90\,000\text{ K}$  (1–8 eV), die Ionentemperatur  $T_{ion} = 500\text{--}1\,000\text{ K}$ , und der Druck liegt bei  $p = 0.1\text{--}10\text{ mbar}$  [5].

**Laser:** Durch die gezielte lokale Erwärmung des Substrats mittels Laser (LCVD) können Schichten schreibend auf das Substrat aufgetragen und sogar dreidimensionale Strukturen erzeugt werden ([Abbildung 9](#)). Wie bei den meisten schreibenden Verfahren eignet sich der LCVD-Prozess gut für Prototypen und Forschungszwecke, ist jedoch weniger geeignet für industrielle Anwendungen [5].



**Abbildung 9:** Laser-unterstützte CVD: Der Laser erwärmt das Substrat punktuell, wodurch die chemische Reaktion und Schichtabscheidung nur im Bereich des Laserflecks stattfinden [5].

### 2.3.4 Erwärmte Anlagenteile

Bei einer CVD-Anlage ist ebenfalls zu berücksichtigen, welche **Teile des Reaktors** erwärmt werden [5].

**Hot-Wall-Reaktor:** Der **Substrathalter (Susceptor)** mit den **Substraten** und die **Reaktorkammer** werden durch einen **Ofen mit Widerstandsheizung** erwärmt ([Abbildung 10](#)). Die **Wafer** stehen frei und können dicht gepackt werden, wodurch die **Beschichtung** (z.B.

Polysilizium) auf beiden Seiten bei Temperaturen zwischen 400 und 1000°C erfolgt. Allerdings werden auch die Reaktorwände beschichtet, was durch Partikelbildung zu Problemen führen kann [5].

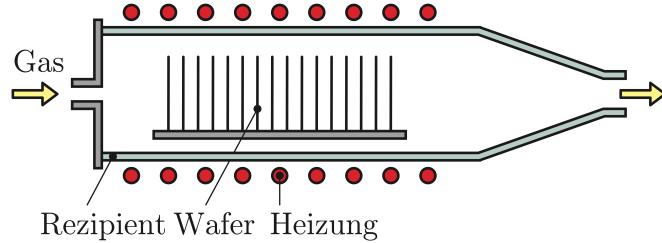


Abbildung 10: Schematische Anordnung beim Hot-wall-Reaktor [5].

**Cold-Wall-Reaktor:** Der Waferhalter wird hier entweder resistiv, induktiv oder durch Strahlungslampen erhitzt, während die Reaktorwände kalt bleiben (Abbildung 11). Dies führt zu geringeren Ablagerungen an den Wänden und dadurch zu weniger Partikelkontaminationen im Vergleich zum Hot-Wall-Reaktor [5].

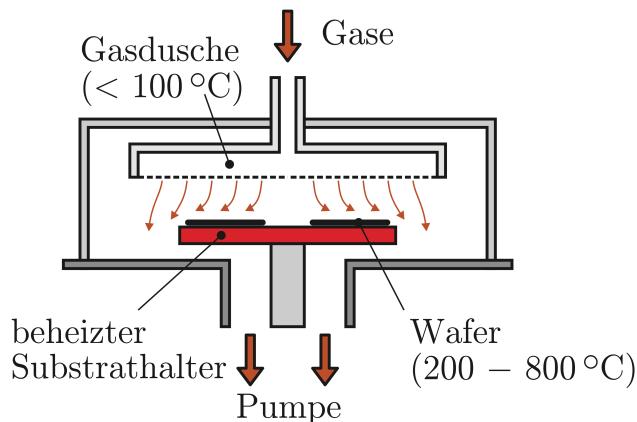
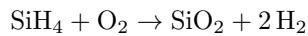
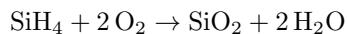


Abbildung 11: Schematischer Aufbau des Cold-wall-Reaktors [5].

### 2.3.5 Druck

Schließlich ist auch der Druck zu berücksichtigen, unter dem die Reaktionen stattfinden [5].

**Atmospheric Pressure CVD (APCVD):** Bei diesem Verfahren erfolgt die Abscheidung einer Oxidschicht unter Atmosphärendruck und ohne Evakuierung der Anlage bei einer Temperatur von z.B. 400°C. Die Oxidschicht bildet sich über folgende chemische Reaktionen<sup>15</sup>:




---

<sup>15</sup>Bei diesen Reaktionen handelt es sich um Oxidationsreaktionen, bei denen aus dem Ausgangsstoff Silan ( $\text{SiH}_4$ ) und Sauerstoff ( $\text{O}_2$ ) Siliziumdioxid ( $\text{SiO}_2$ ) gebildet wird [5]. Dies geschieht über zwei mögliche Reaktionswege: 1.  $\text{SiH}_4 + 2 \text{O}_2 \rightarrow \text{SiO}_2 + 2 \text{H}_2\text{O}$ : Silan reagiert mit zwei Molekülen Sauerstoff und bildet Siliziumdioxid sowie Wasser ( $\text{H}_2\text{O}$ ) als Nebenprodukt. 2.  $\text{SiH}_4 + \text{O}_2 \rightarrow \text{SiO}_2 + 2 \text{H}_2$ : Hier reagiert Silan mit einem Molekül Sauerstoff, wodurch ebenfalls Siliziumdioxid entsteht, jedoch ist das Nebenprodukt Wasserstoffgas ( $\text{H}_2$ ). Beide Reaktionen finden bei typischen CVD-Prozesstemperaturen statt und führen zur Bildung einer Siliziumdioxidschicht ( $\text{SiO}_2$ ) auf dem Substrat. Die Wahl der Reaktion hängt von den Prozessbedingungen wie Temperatur und Sauerstoffkonzentration ab [5].

Aufgrund der **niedrigen Prozesstemperatur** werden die **Seitenwände (Flanken)** der Strukturen weniger stark beschichtet als die **horizontalen Bereiche**, was zu einer **geringen Konformität<sup>16</sup>** führt [5].

**Low Pressure CVD (LPCVD):** Werden die **Schichten** in einem **evakuierten Reaktor abgeschieden**, handelt es sich um Low Pressure CVD. Die **Drücke** liegen typischerweise im Bereich von **10 bis 100 Pa**. Ein häufiges **Anwendungsbeispiel** ist die **Abscheidung dünner Schichten aus Polysilizium oder Siliziumnitrid**. Diese Schichten weisen eine **nahezu perfekte Konformität** auf, d.h., die **vertikalen Schichten in Kanälen haben fast die gleiche Dicke wie die horizontalen Flächen**, mit einer **Konformität von bis zu 0,98** [5].

## 2.4 Atomlagenabscheidung

Bei der Atomlagenabscheidung (*atomic layer deposition, ALD*) werden **in einem zyklischen Verfahren** verschiedene Gase abwechselnd in den Reaktor geleitet. Die einzelnen **Vorläufersubstanzen** bilden monomolekulare Schichten<sup>17</sup>, die das **Schichtwachstum** auf eine Moleküllage begrenzen. Zwischen den Prozessschritten mit den Vorläufersubstanzen wird der **Reaktor mit einem inerten Gas gespült**, um unerwünschte Reaktionen im Reaktorvolumen **zu verhindern** [5].

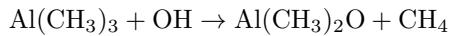
Ein Zyklus läuft wie folgt ab [5]:

1. **Reaktand 1:** Bildung einer monomolekularen Schicht.
2. **Spülgas** (z.B. N<sub>2</sub>, Ar) oder Abpumpen, um den ersten Reaktanden zu entfernen.
3. **Reaktand 2:** Durch die selbstbegrenzende Reaktion mit der ersten Schicht wird eine weitere monomolekulare Schicht gebildet. Dieser Prozessschritt kann auch eine Plasmabehandlung beinhalten, die die Oberfläche wieder für den ersten Schritt aktiviert.
4. **Spülgas**

Durch **Zählen der Zyklen** kann eine **Genaugkeit der Schichtdicke von einer einzelnen Atomlage** erreicht werden [5].

**Beispiel:** Als Beispiel ist in [Abbildung 12](#) die **Bildung von Aluminiumoxid (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)** dargestellt. Im ersten Schritt wird **Trimethylaluminium (TMA)** (Al(CH<sub>3</sub>)<sub>3</sub>) in den **Reaktor** geleitet, das sich **durch Abspaltung von Methan (CH<sub>4</sub>)** an die **Sauerstoffatome des Substrats anlagert**. Dieser Prozess endet, sobald keine OH-Gruppen mehr "sichtbar" sind und die **Oberfläche nur noch Methylgruppen<sup>18</sup>** aufweist. Nach dem **Spülen** wird **Wasser dampf eingeleitet**, der mit den Methylgruppen reagiert. Dabei wird **Methan abgespalten und abgepumpt**. Der Prozess endet, sobald keine Methylgruppen mehr vorhanden sind und die **Oberfläche von Hydroxylgruppen<sup>19</sup>** bedeckt ist. Nach einem weiteren **Spülprozess** beginnt der **Zyklus erneut** mit dem Trimethylaluminium-Schritt [5].

**Zusammengefasst (chemisch auf den Punkt gebracht)** verläuft der Prozess wie folgt [5]: Im ersten Schritt reagiert Trimethylaluminium (Al(CH<sub>3</sub>)<sub>3</sub>) mit den OH-Gruppen auf der Oberfläche. Dabei spaltet sich Methan (CH<sub>4</sub>) ab ([Abbildung 12](#) oben links):



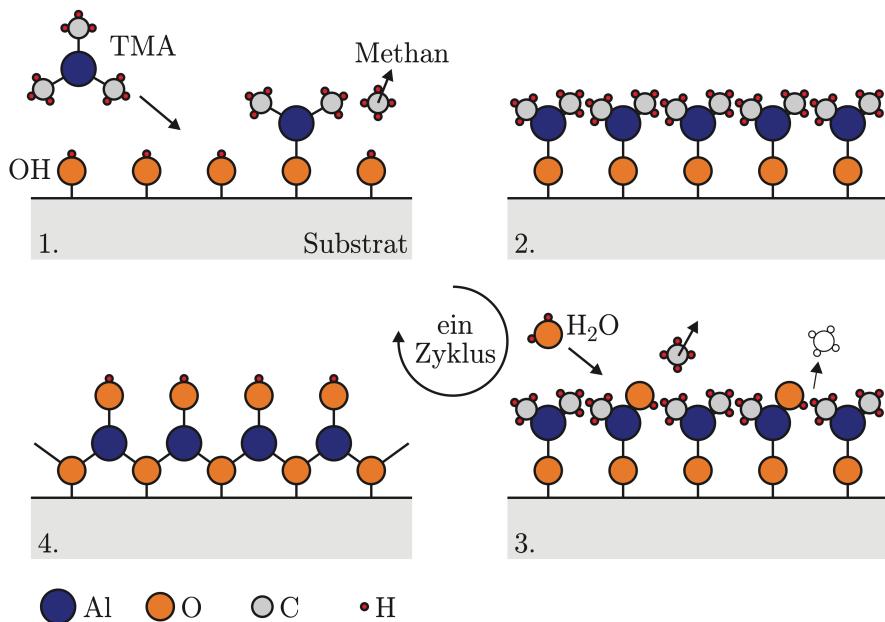

---

<sup>16</sup>Die Konformität beschreibt das Verhältnis der Beschichtungsdicke an den Seitenwänden zur Beschichtungsdicke in horizontalen Bereichen [5].

<sup>17</sup>Siehe Monolage (Begriffsklärung für PVD).

<sup>18</sup>Methylgruppen sind chemische Gruppen mit der Formel CH<sub>3</sub>, die aus einem Kohlenstoffatom und drei Wasserstoffatomen bestehen. Sie sind oft Bestandteil organischer Moleküle und beeinflussen die physikalischen und chemischen Eigenschaften von Verbindungen [34].

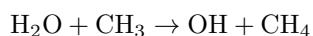
<sup>19</sup>Hydroxygruppen sind funktionelle Gruppen mit der Formel OH, die aus einem Sauerstoff- und einem Wasserstoffatom bestehen. Sie sind charakteristisch für Alkohole und beeinflussen die Polarität und Reaktivität von Molekülen, an denen sie gebunden sind [34].



**Abbildung 12:** Abscheidung von  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (Aluminiumoxid) mittels ALD [5].

Dieser Schritt läuft ab, bis keine OH-Gruppen mehr auf der Oberfläche vorhanden sind und die Oberfläche vollständig aus  $\text{CH}_3$ -Gruppen besteht (Abbildung 12 oben rechts).

Danach wird Wasserdampf ( $\text{H}_2\text{O}$ ) in den Reaktor geleitet, der mit den  $\text{CH}_3$ -Gruppen reagiert. Auch in diesem Schritt spaltet sich Methan ( $\text{CH}_4$ ) ab (Abbildung 12 unten rechts):



Dieser Schritt endet, sobald keine  $\text{CH}_3$ -Gruppen mehr sichtbar sind und die Oberfläche wieder vollständig von OH-Gruppen bedeckt ist – wie zu Beginn des Zyklus.

Dieser Prozess wiederholt sich und ermöglicht den schichtweisen Aufbau von Aluminiumoxid ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) durch die Atomlagenabscheidung (ALD), wobei in jedem Zyklus eine monomolekulare Schicht entsteht.

### 3 Lithographie

Die Lithographie ist ein zentrales Verfahren in der Mikrosystemtechnik zur **Herstellung feiner Strukturen auf Halbleitermaterialien**. Dabei werden **spezifizierte Muster auf eine (zuvor bedampfte) Waferoberfläche übertragen**, die **anschließend geätzt oder anderweitig verarbeitet** werden, um Mikrochips, Sensoren und andere Miniaturkomponenten (MEMS) zu erzeugen.

Das **grundlegende Prinzip der Lithographie** umfasst mehrere Schritte: Zuerst wird ein **lichtempfindlicher Lack** (dünner Film), ein sogenannter “**Photoresist (Photolack)**”, **auf das Substrat aufgetragen**. Durch **Masken**, die **bestimmte Bereiche abdecken**, wird der Photoresist **selektiv belichtet**. Diese belichteten Bereiche verändern ihre chemischen Eigenschaften, sodass sie je nach **Resisttyp** (positiv oder negativ) **entfernt oder erhalten** bleiben. Nach dem **Entwicklungsprozess** **bleiben die gewünschten Strukturen auf dem Substrat sichtbar** und dienen als **Vorlage für weitere Prozessschritte** wie zum Beispiel **Ätzen** [2].

In der Mikrosystemtechnik sind **verschiedene Lithographietechniken** etabliert, darunter die Photolithographie (optische Lithographie) und Elektronenstrahlolithographie. Die **Photolithographie** ist besonders **für großflächige Produktionen** geeignet, da sie **hohe Auflösung und Prozessgeschwindigkeit** bietet. Bei der **Elektronenstrahlolithographie** hingegen wird mit einem feinen Elektronenstrahl gearbeitet, wodurch eine **noch höhere Auflösung** erreicht wird, was besonders **für Nanostrukturen** entscheidend ist [3].

Diese Verfahren bieten die Grundlage für das Design und die Herstellung von Mikro- und Nanosystemen, wie sie in modernen elektronischen und mechanischen Anwendungen benötigt werden. In dieser Ausarbeitung wird jedoch **ausschließlich die optische Lithographie näher erläutert**.

#### 3.1 Begriffsklärung für die Lithographie

Begriffe, die bereits in den vorigen Kapiteln erläutert wurden, werden hier nicht erneut angeführt.

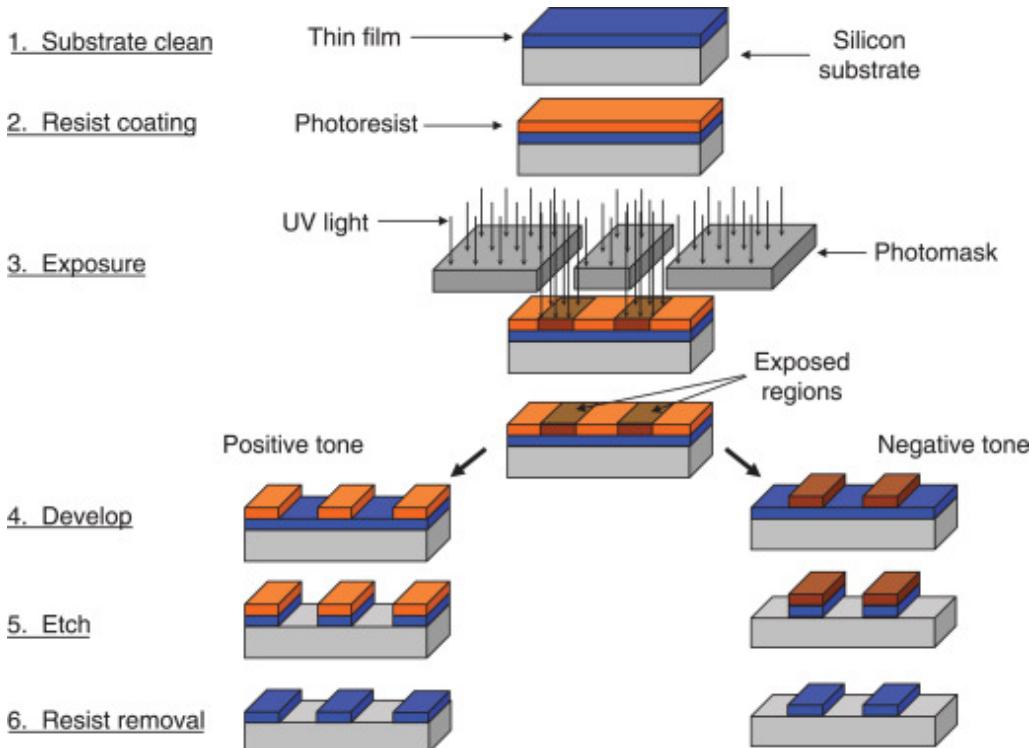
- **Photoresist:** Eine lichtempfindliche Schicht (Photolack), die zur Strukturierung von Mikro- und Nanometer-Bereichen dient [2].
- **Maske (Photomaske):** Eine Vorlage mit einem Muster aus lichtdurchlässigen und lichtundurchlässigen Bereichen, die auf den Photoresist projiziert wird. Sie dient dazu, das gewünschte Strukturmuster zu übertragen [3].
- **Kohärenzgrad von Licht:** In der Lithographie beschreibt der Kohärenzgrad des Lichts, wie gleichmäßig die Lichtwellen zueinander schwingen. Eine hohe Kohärenz bedeutet, dass die Lichtwellen eine feste Phasenbeziehung haben – sie schwingen synchron, wie zwei Freunde, die auf einem Trampolin immer gleichzeitig springen. Diese Synchronität ermöglicht scharfe Interferenzmuster und kann die Präzision der abgebildeten Strukturen erhöhen [57, 58].  
Eine niedrige Kohärenz bedeutet hingegen, dass die Lichtwellen weniger synchron sind und keinen konstanten Abstand zueinander halten, wie mehrere Personen, die auf einem Trampolin jeweils in ihrem eigenen Rhythmus springen. Diese “Unordnung” der Wellen reduziert Interferenzeffekte, was bei der Lithographie helfen kann, eine gleichmäßigere Belichtung zu erreichen und störende Muster zu vermeiden [57].
- **LIGA-Verfahren:** LIGA steht für **Lithographie, Galvanoformung und Abformung**. Es ist ein Verfahren der Mikrosystemtechnik zur Herstellung hochpräziser Mikrostrukturen mit hohen Aspektverhältnissen. Dabei werden in drei Schritten ein Muster per Röntgenstrahlolithographie erstellt, dieses galvanisch mit Metall gefüllt (“Galvanisch gefüllt” bedeutet, dass das Muster im Prozess durch eine elektrochemische Abscheidung (Galvanik) mit Metall aufgefüllt wird. Dabei wird Metall in die Vertiefungen der Form abgeschieden, wodurch stabile und präzise metallische Strukturen entstehen.) und anschließend abgeformt (“Abformung” bedeutet in diesem Zusammenhang, dass das erzeugte Muster als Form oder Negativ verwendet wird, um weitere Strukturen durch das Einfüllen eines Materials in diese Form herzustellen).

Das Ziel ist, exakte Kopien der Struktur zu erzeugen, indem das Material in die Form gegossen oder gepresst und dann herausgenommen wird.). Das Verfahren eignet sich für präzise Anwendungen in der Feinmechanik und Mikrosystemtechnik [59].

- **DRIE-Verfahren:** DRIE steht für **Deep Reactive Ion Etching**, ein Verfahren zur Herstellung tief strukturierter Mikrokomponenten mit hohen Aspektverhältnissen in der Mikrosystemtechnik. Es nutzt reaktive Ionen<sup>20</sup>, die durch ein Plasma erzeugt werden, um das Material gezielt abzutragen. Durch DRIE lassen sich sehr präzise und vertikale Strukturen in Materialien wie Silizium erzeugen, was es ideal für die Herstellung komplexer Mikrostrukturen in Anwendungen wie MEMS macht [2, 61].

### 3.2 Photoresist

Wie bereits erwähnt, handelt es sich beim **Photoresist** um einen **lichtempfindlichen Lack**, der **auf das Substrat aufgetragen** wird. Bei einem sogenannten “**Negativresist**” verbleibt nach Belichtung und Entwicklung eine Struktur, die invers zur Struktur auf der Photomaske ist: **An den Stellen, an denen die Photomaske transparent ist, wird der Negativresist belichtet und dadurch unlöslich.** Bei einem “**Positivresist**” hingegen **erhöht sich die Löslichkeit der belichteten Bereiche**. Dadurch führen die **undurchsichtigen Bereiche der Photomaske zu den nicht löslichen und somit verbleibenden Schichten** nach Belichtung und Entwicklung [62]. Zur Veranschaulichung soll die Abbildung 13 dienen.



**Abbildung 13:** Vergleich Positiv- und Negativresist [6].

Photoresiste müssen die folgenden **Anforderungen** erfüllen [11]:

---

<sup>20</sup>Reaktive Ionen sind geladene Teilchen, die chemisch sehr aktiv sind und durch Ionisierung von Gasen in einem Plasma entstehen. In Prozessen wie dem DRIE werden diese Ionen verwendet, um gezielt Material abzutragen. Die reaktiven Ionen reagieren mit der Oberfläche des Materials und erzeugen chemische Verbindungen, die sich ablösen lassen, wodurch sehr präzise Strukturen entstehen [3, 60].

- Hohe Strukturgenauigkeit<sup>21</sup>
- Gute Maßhaltigkeit<sup>22</sup>
- Hohe Sensitivität<sup>23</sup>
- Gute Haftung
- Gute Resistenz beim Ätzen<sup>24</sup> (daher der Begriff „Resist“)
- Hohe thermische und chemische Belastbarkeit
- Gute Entfernbarekeit (Strippen) (nach dem Ätzen)

Eine detaillierte Gegenüberstellung von Positiv- und Negativresisten ist in [Tabelle 2](#) und [Tabelle 3](#) dargestellt.

Vergleich Positiv- und Negativresist	
Positivresist	Negativresist
Erhöhte Löslichkeit der belichteten Bereiche ( <b>belichtete Bereiche werden entfernt</b> )	Verringerte Löslichkeit der belichteten Bereiche ( <b>belichtete Bereiche bleiben erhalten</b> )
<b>Hohe Strukturgenauigkeit möglich</b> (wird hauptsächlich für feine Muster verwendet)	Weniger strukturgenau, besonders bei kleinsten Strukturen (eignet sich für grobe, robuste Strukturen)
<b>Gute Maßhaltigkeit</b> bei kleinen Strukturen	Geringere Maßhaltigkeit da sie zum Quellen neigen
Erfordert <b>höhere Belichtungsenergie</b>	Erfordert <b>niedrigere Belichtungsenergie</b>

**Tabelle 2:** Vergleich Positiv- und Negativresist Teil 1 [2,3]

Die angeführten **Vergleichsparameter** in der [Tabelle 3](#) beschreiben wichtige **wichtige Eigenschaften von Positiv- und Negativresisten** und werden nun kurz erläutert:

Die **Minimale Strukturbreite** gibt an, wie klein die erzeugten Muster sein können, was für die Herstellung feinster Strukturen entscheidend ist [2,6].

“**Quellen beim Entwickeln**” beschreibt, ob sich der **Resist beim Entwickeln ausdehnt**, was die **Präzision der Strukturen beeinflusst** [4].

Das **Aspektverhältnis** beschreibt das **Verhältnis von Höhe zu Breite der Strukturen** und beeinflusst deren **Detaillierung**. Ein **hohes (gutes) Aspektverhältnis** bedeutet, dass **höhere Strukturen entwickelt bzw. feine Details präziser dargestellt** werden können ([Abbildung 14](#)). Ist das Aspektverhältnis nicht optimal, könnten **hohe Strukturen kippen oder Details verloren gehen**. Grundsätzlich gilt: Je größer das Aspektverhältnis und je kleiner die absolute Größe der Struktur, desto schwieriger wird die Fertigung [2,3,62,63].

---

<sup>21</sup>Hohe Strukturgenauigkeit bedeutet, dass der Photoresist die Fähigkeit besitzt, sehr präzise und detaillierte Muster auf dem Substrat zu erzeugen. Dies ist wichtig, um die gewünschten Strukturen exakt abzubilden und sicherzustellen, dass die resultierenden Muster genau den Spezifikationen entsprechen. Eine hohe Strukturgenauigkeit ist entscheidend, da kleinste Abweichungen die Funktionalität der Bauteile beeinträchtigen können [2,3,6].

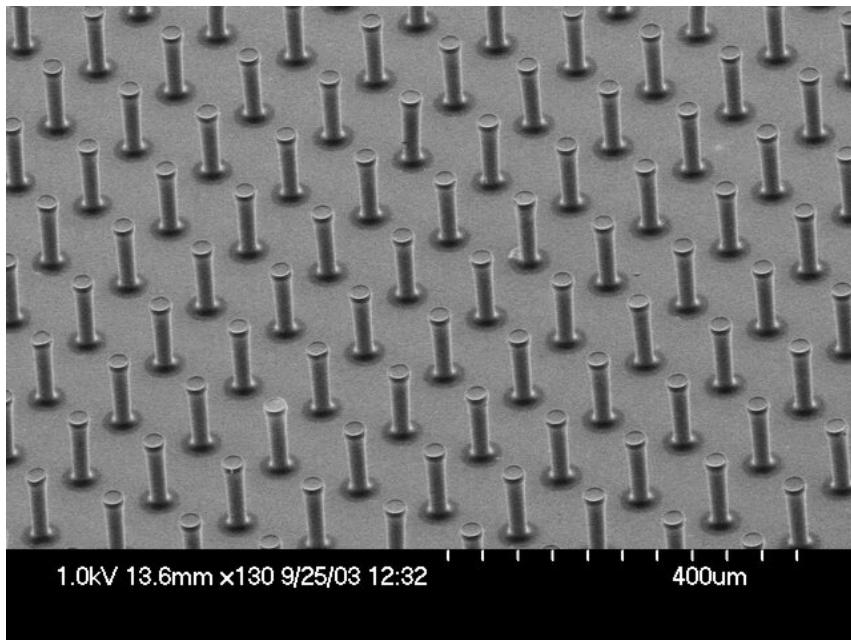
<sup>22</sup>Das bedeutet, dass der Photoresist die Abmessungen des gewünschten Musters präzise beibehalten muss, selbst nach den Prozessen der Belichtung, Entwicklung und weiteren Bearbeitungsschritten. Eine hohe Maßhaltigkeit stellt sicher, dass die Struktur exakt in der vorgesehenen Größe und Form erhalten bleibt [2,3].

<sup>23</sup>Hohe Sensitivität bedeutet, dass der Photoresist schon bei geringer Belichtungsenergie zuverlässig reagiert, was zu einer effizienteren und schnelleren Strukturierung führt [2,6].

<sup>24</sup>Gute Resistenz beim Ätzen bezieht sich auf die Fähigkeit des nicht löslichen Teils des Photoresists, dem Ätzprozess standzuhalten, sodass die darunterliegende Schicht geschützt bleibt [2,3].

Vergleichsparameter	Positiv-Resist	Negativ-Resist
Minimale Strukturbreite	< 0.5 $\mu\text{m}$	ca. 2 $\mu\text{m}$
Quellen beim Entwickeln	<b>nein</b>	ja
Aspektverhältnis	<b>gut</b>	mäßig
Thermische Stabilität	<b>gut (bis 200 °C)</b>	mäßig
Staubpartikel	<b>kaum Einfluss</b>	bewirken Löcher
Passivierung bei <b>Plasma-Ätzung</b>	<b>sehr gut</b>	mäßig
Passivierung bei <b>Nasschemie</b>	mäßig	<b>sehr gut</b>
Adhäsion (Haftung) zu Si	gut	<b>sehr gut</b>
Kosten	<b>teurer</b>	günstiger

**Tabelle 3:** Vergleich Positiv- und Negativresist Teil 2 [2,3]



**Abbildung 14:** Kohlenstoff-MEMS-Strukturen mit hohem Aspektverhältnis (Höhe zu Breite) [7].

**Staubpartikel** können die Struktur beeinflussen: Während Positivresisten weniger empfindlich auf Staub reagieren, können sie **bei Negativresisten Löcher verursachen**. Dies liegt daran, dass **Staubpartikel während der Belichtung als Schattenwurf fungieren**. Bei einem Negativresist (belichtete Bereiche werden unlöslich) führt ein solcher Schattenwurf dazu, dass der betroffene Bereich unbelichtet und somit beim Entwickeln löslich bleibt, was kleine Löcher im Resist hinterlässt [2,6].

Positivresisten hingegen **reagieren weniger empfindlich auf Staub**, da bei ihnen die belichteten (und nicht die unbelichteten) Bereiche entfernt werden. Ein **Staubpartikel auf einem Positivresist verhindert zwar die Belichtung eines Punktes, aber dieser Bereich bleibt im Nachhinein bestehen**<sup>25</sup>, während die belichteten, von Staub freien Bereiche entfernt werden. Daher entstehen in Positivresisten keine Löcher durch Staubpartikel [8].

<sup>25</sup>Im schlimmsten Fall bleibt zu viel Photolack zurück. Nach dem Entfernen der Staubpartikel muss dann lediglich erneut belichtet werden, anstatt – wie beim Negativresist – neuer Photolack aufzutragen werden.

Die “Passivierung bei Plasma-Ätzung” und “Nasschemie” beschreiben, wie gut der Resist die darunterliegende Schicht während der Ätzprozesse schützt, was besonders bei empfindlichen Schichten wichtig ist [11].

**Plasma-Ätzung** ist ein trockenes Ätzverfahren, bei dem ionisiertes Gas (Plasma) genutzt wird, um Material gezielt von einer Oberfläche zu entfernen. Dabei entsteht eine physikalische oder chemische Reaktion zwischen dem Plasma und dem zu ätzenden Material, was präzise und kontrollierte Strukturierungen ermöglicht. Dieses Verfahren wird häufig in der Mikroelektronik eingesetzt, da es sehr feine Strukturen erlaubt [2,3].

**Nasschemie** hingegen nutzt flüssige Chemikalien, um Material durch chemische Reaktionen zu lösen und abzutragen. Dabei wird das Substrat in eine Lösung getaucht, die das Material selektiv auflöst. Diese Methode ist besonders verbreitet, weil sie einfach anzuwenden ist und sich gut für großflächige Ätzungen eignet, jedoch weniger präzise als Plasma-Ätzung ist [62, 64].

### 3.3 Funktionsweise

In diesem Abschnitt wird der Prozessablauf für die Lithographie, wie in [11, 62] beschrieben, erklärt. Zur besseren Veranschaulichung zeigt die Abbildung 15 einen vereinfachten Ablauf des Lithographieprozesses.

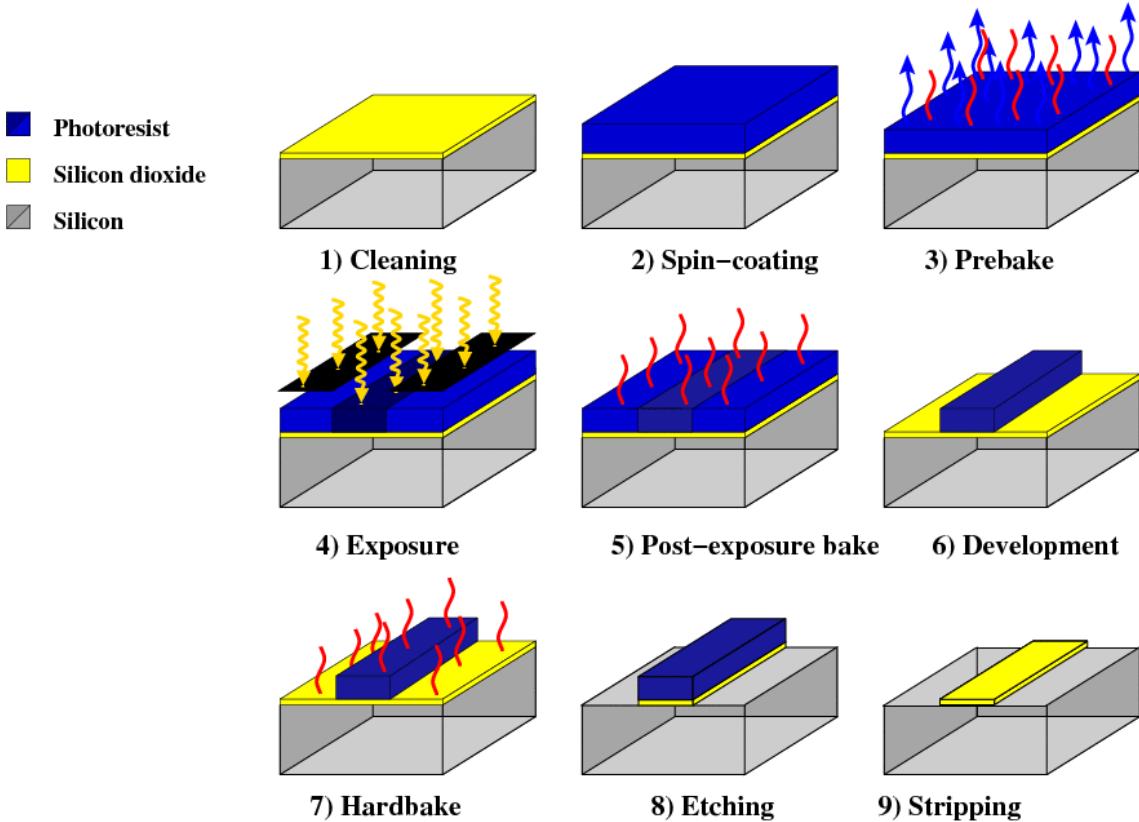


Abbildung 15: Vereinfachter Ablauf des Lithographieprozesses mit Negativresist [8].

1. **Reinigen und Trocknen des Substrats** (z. B. bei 300°C).
  - **Ziel:** Sicherstellung einer guten Haftung zwischen Substrat und Photoresist.
2. **Optional:** Vorbereitung des Substrats zur Verbesserung der Resist-Haftung.
  - **Ziel:** Falls der Resist schlecht auf Si, SiOH (Siliziumhydroxid) oder SiO<sub>2</sub> (Siliziumoxid bzw. Siliziumdioxid) haftet, Aufdampfen eines Haftvermittlers, z. B. Hexamethyldisilazan (HMDS).

### 3. Aufschleudern des Resists (mittels Spin-Coating in Abbildung 16):

- **Ziel:** Gleichmäßiges Aufbringen des Resists mit definierter Dicke.
- Spin-Coating-Parameter: 900 U/min, Beschleunigung von 15 U/s<sup>2</sup>, 30 Sekunden Spin-Dauer, ergibt eine Schichtdicke von ca. 1,6 µm.

### 4. Softbake (Resist-Prebake = Vorhärtung des Resists):

- **Ziel:** Bildung eines stabilen Resistfilms und weitgehende Entfernung von Lösungsmitteln.
- Durchführung im Umluftofen bei 90°C für 30 Minuten.

### 5. Optional: Rändertrocknung und erneutes Trocknen des Substrats.

### 6. Justierung und Belichtung:

- **Ziel:** Übertragung der Maskenstruktur in den Resist.
- In der Produktion erfolgt eine automatische Justierung und Belichtung.
- In der Mikrostrukturtechnik wird oft eine doppelseitige Belichtung zur Bearbeitung der Waferrückseite angewendet.

### 7. Schichthärtung (Post-Exposure Bake):

- **Ziel:** Reduktion des Einflusses einer inhomogenen Belichtungsdosis durch stehende Wellen im Resist.

### 8. Entwickeln des Resists:

- **Ziel:** Herausbildung des Strukturmusters im Photoresist.
- Beispiel: Sprühentwicklung mit verdünntem Entwickler AZ 400 K (1:4), Entwicklungsdauer 150 Sekunden bei 38°C.
- Nach dem Entwickeln Spülen des Resists mit deionisiertem Wasser<sup>26</sup>.
- Trocknung des Resists durch Trockenschleudern.

### 9. Hardbake (Resist-Postbake):

- **Ziel:** Verdampfung von Lösungsmittelresten und Verbesserung der Resisthaftung auf dem Wafer für folgende Ätz- oder Implantationsprozesse.
- Durchführung im Umluftofen bei 100-180°C für 20 Minuten.

### 10. Optionaler Reinigungsschritt:

- **Ziel:** Descum-Schritt im O<sub>2</sub>-Plasma zur Entfernung von Rückständen.

### 11. Strukturübertragung ins Substrat (Prozessschritt wie z.B. Ätzen):

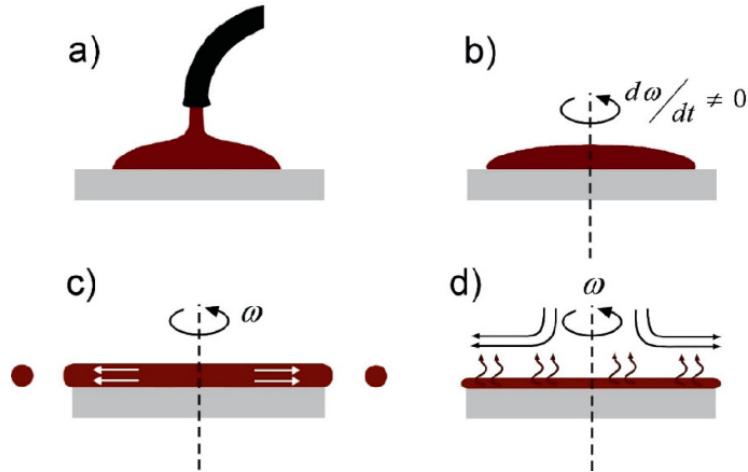
- **Ziel:** Übertragung der Resiststruktur in die darunterliegende Schicht bzw. ins Substrat.
- Durchführung mittels Verfahren wie Ätzen, Abscheiden, Galvanik oder Ionenimplantation.

### 12. Entfernen des Resists (Strippen):

- **Ziel:** Entfernung der Resiststruktur nach der Strukturübertragung durch Strippen (Lackstrippe).
- Nasschemisches Strippen mit Lösungsmitteln (z. B. Aceton) oder Veraschen im Sauerstoffplasma.

---

<sup>26</sup>Deionisiertes Wasser, auch DI-Wasser genannt, ist Wasser, aus dem gelöste Ionen entfernt wurden, um eine hohe Reinheit zu erreichen. Der Prozess der Deionisation entfernt Kationen wie Na<sup>+</sup> und Ca<sup>2+</sup> sowie Anionen wie Cl<sup>-</sup> und SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> [65, 66]. Deionisiertes Wasser wird durch Ionenaustausch gewonnen und weist eine geringe Leitfähigkeit auf. In der Mikroelektronik, Labortechnik und Medizin wird es aufgrund seiner Reinheit verwendet [67]. In der Photolithographie wird DI-Wasser zum Spülen von Photolacken eingesetzt, um die Reinheit – und somit die Qualität – der Strukturen zu sichern [68].



**Abbildung 16:** Das Auftragen des Photoresists erfolgt mittels “Spin-Coating”: a) Der Photoresist wird mittig auf den ruhenden Wafer aufgetragen. b) Der Wafer wird beschleunigt – die zeitliche Änderung der Winkelgeschwindigkeit  $\omega$  ist ungleich Null. c) Bei konstanter Winkelgeschwindigkeit wird der Photoresist aufgrund der Zentrifugalkräfte gleichmäßig an die Ränder des Wafers gedrückt und so auf der Oberfläche verteilt. d) Schließlich wird das Lösungsmittel mittels “Softbake” im Photoresist verdampft [9].

### 3.4 Belichtungsverfahren

Zur Belichtung stehen **drei Verfahren** zur Verfügung, die in **zwei Hauptkategorien** unterteilt werden und im Folgenden detailliert beschrieben werden. Diese **Kategorien** sind die Schattenprojektion und die **abbildende Projektion (Projektions-Belichtung)**. Die **Schattenprojektion** gliedert sich dabei weiter in die **Kontaktbelichtung** und die **Proximity-Belichtung**.

Ergänzend sei erwähnt, dass die **Masken** aus einer **Quarzplatte mit einer strukturierten Chromschicht**, dem sogenannten **Absorber**, bestehen. Aufgrund dieser Struktur werden sie **auch als Chrommasken bezeichnet** [11, 59].

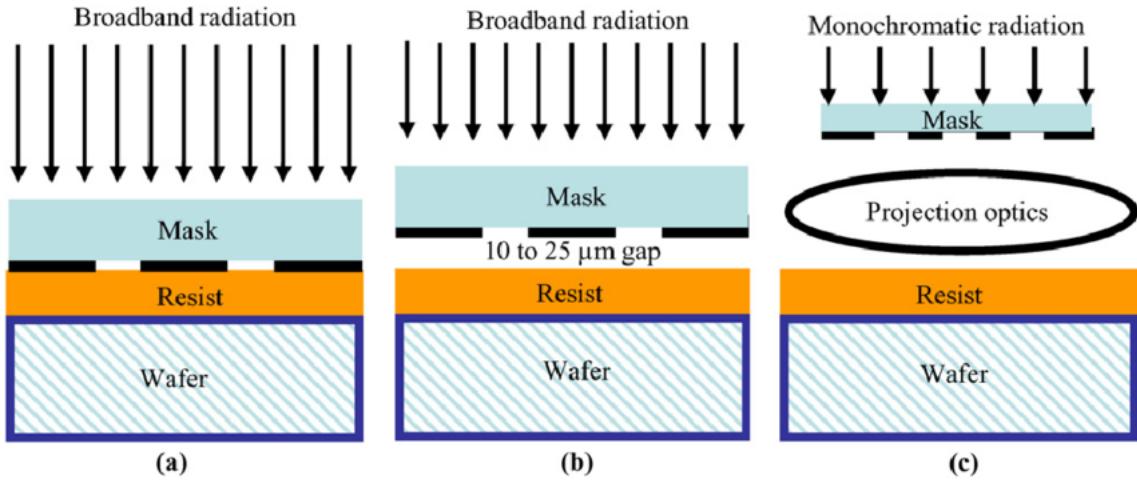
Zur besseren Veranschaulichung zeigt **Abbildung 17** die drei Verfahren in vereinfachter Darstellung: a) die Kontaktbelichtung (Schattenprojektion), b) die Proximity-Belichtung (Schattenprojektion) und c) die Projektionsbelichtung (Abbildungsprojektion). Die **schwarzen „Balken“** zwischen der Maske und dem Photoresist bei den Schattenprojektionen sowie zwischen der Maske und der Optik bei der Abbildungsprojektion stellen die zuvor genannten **Absorber** dar [11].

#### 3.4.1 Kontaktbelichtung (Schattenprojektion)

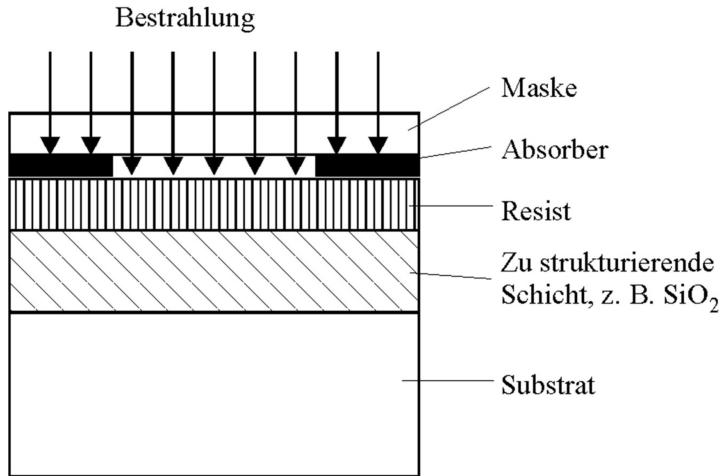
Bei der Kontaktbelichtung wird **mittels parallelem Licht** eine Maske im **1:1-Maßstab** in den **Photolack** auf einer Silizium-Oberfläche übertragen (**Abbildung 18**) [59].

Dieses **Verfahren ist recht einfach** und bietet einige **Vorteile**: Da die Maske auf dem **Wafer aufliegt**, entstehen **kaum Abbildungsfehler**, und es können **sehr kleine Details** bis zu etwa **1 µm** präzise abgebildet werden. Ein **weiterer Vorteil** ist, dass **kein monochromatisches** (einfarbiges) **Licht benötigt** wird, sodass **hohe Lichtintensitäten** und dadurch **kürzere Belichtungszeiten** möglich sind. Da das gesamte Muster in einem **Schritt auf den gesamten Wafer belichtet** wird (ein sogenanntes **Full-Wafer-Verfahren**<sup>27</sup>), ist es zudem **schnell** und ermöglicht einen **hohen Produktionsdurchsatz** [11].

<sup>27</sup>Im Gegensatz zur Projektionsbelichtung, bei der nur ein Bereich nach dem anderen belichtet wird [59].



**Abbildung 17:** Die drei Belichtungsverfahren in der Lithographie: a) Kontaktbelichtung, b) Proximity-Belichtung und c) Projektionsbelichtung. Die zu strukturierende Schicht ist hier leider nicht eingezeichnet. Diese befindet sich zwischen Wafer und Resist (z.B. Siliziumdioxid  $\text{SiO}_2$ ) [10].



**Abbildung 18:** Kontaktbelichtung im Detail [11].

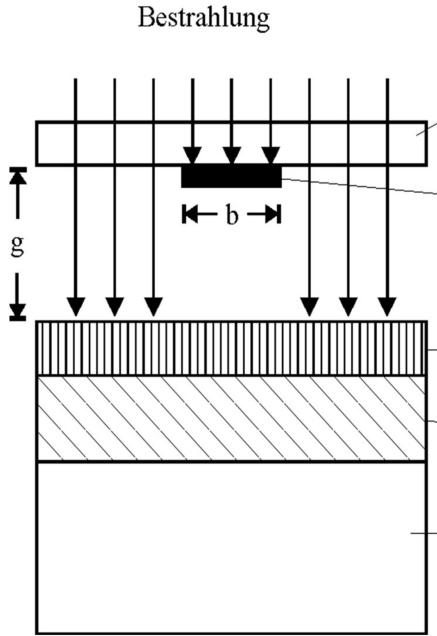
Allerdings gibt es auch **Nachteile**. Da die Maske direkten Kontakt mit dem Wafer hat, entstehen leicht **Defekte auf der Maske** und im Photolack durch mechanische Beanspruchung und Abrieb, was die **Lebensdauer der Maske** verkürzt, die Defektdichte erhöht und die **Kosten steigen** lässt [11]. Weiterhin ist es schwierig, die Maske gleichmäßig und flächig auf dem Wafer aufzulegen. Unterschiede in der Oberflächenstruktur des Wafers, **Gasbildung** oder eingeschlossene Luftblasen führen zu **Abbildungsfehlern**, da das Licht an diesen Stellen gestreut oder gebeugt wird.

Zusätzlich kann sich der Wafer während der Fertigung leicht verziehen, was bedeutet, dass die Lage der Maskenmuster nicht immer exakt stimmt. Solche Verformungen im Mikrometerbereich lassen sich im Full-Wafer-Verfahren nicht einfach korrigieren und können das fertige Produkt beeinträchtigen [11].

### 3.4.2 Proximity-Belichtung (Schattenprojektion)

Ähnlich wie bei der **Kontaktbelichtung** wird auch bei der Proximity-Belichtung eine **Maske** im 1:1-Maßstab mittels **parallelem Licht** auf den **Photolack** einer Silizium-Oberfläche übertragen. Bei diesem Verfahren besteht jedoch **ein geringer Abstand** von etwa 10 µm bis 30 µm zwischen **Maske** und **Wafer** (Abbildung 19) [59]. Die Proximity-Belichtung hat sich

in der Mikrosystemtechnik als **Standardverfahren** etabliert [11].



**Abbildung 19:** Proximity-Belichtung im Detail.  
Der Abstand zwischen Resist und Maske ist mit  $g$  (gap) bezeichnet, und  $b$  steht für die (minimale) Linienbreite des Absorbers [11].

Ein **wesentlicher Vorteil** dieser Methode ist die **hohe Lebensdauer der Maske**, da sie keinen direkten Kontakt mit dem Wafer hat. Zudem handelt es sich auch hier um ein **Full-Wafer-Verfahren**, was, wie bereits erwähnt, zu einem **sehr hohen Durchsatz** führt [11].

Zu den **Nachteilen** zählt die **geringere Strukturauflösung**, die durch die **Beugung des Lichts an den Kanten der Maske** begrenzt wird. Wichtig ist also **minimale Linienbreite  $b$**  in Abbildung 19. Sie lässt sich durch:

$$b \geq \sqrt{g\lambda}$$

bestimmen, wobei  $g$  der Abstand zwischen Wafer und Maske (gap) und  $\lambda$  die Wellenlänge des Lichts ist (Abbildung 19). Bei einem Abstand von  $g = 20 \mu\text{m}$  und einer Wellenlänge von  $\lambda = 400 \text{ nm}$  ergibt sich zum Beispiel  $b \geq 3 \mu\text{m}$  [11].

Um die **Auflösung zu verbessern**, können **kurzwelligeres Licht oder Phasenmasken**<sup>28</sup> eingesetzt werden [11].

Für **Auflösungen im Mikrometer-Bereich** muss der Abstand fast null betragen, was zur bereits erwähnten Kontaktbelichtung führt. Eine Alternative bietet die **Röntgenstrahlolithographie**, die bei einem **Abstand von 30-50 μm** eine **Auflösung von unter 0,5 μm** und eine **hohe Tiefenschärfe**<sup>29</sup> ermöglicht. Diese Technik wird auch im LIGA-Verfahren eingesetzt, um tiefe Lackstrukturen zu erzeugen [59].

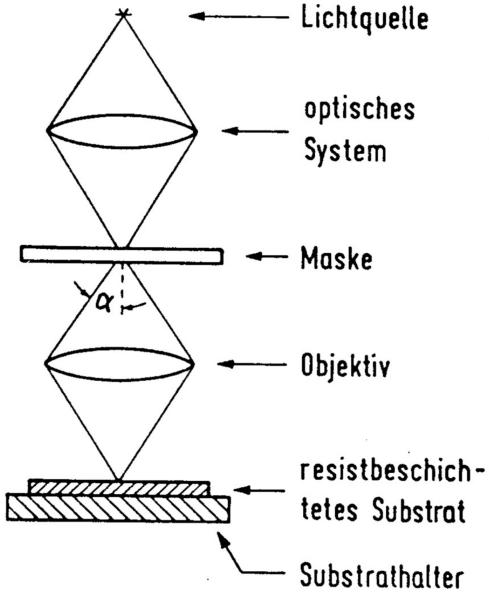
---

<sup>28</sup>Phasenmasken sind spezielle Masken in der Lithographie, die die Phase des Lichts verändern, um den Kontrast an den Kanten des projizierten Musters zu erhöhen. Dies erfolgt durch Phasenverschiebung mittels unterschiedlicher Materialdicken oder Brechungsindizes, was feinere Strukturen ermöglicht. Diese Technik hilft, die minimale Linienbreite zu reduzieren und eignet sich besonders für kürzere Wellenlängen [57, 69, 70].

<sup>29</sup>Tiefenschärfe beschreibt in der Lithographie den Bereich entlang der optischen Achse, in dem ein Objekt scharf abgebildet wird. Eine größere Tiefenschärfe erlaubt eine dickere Schicht, in der das Muster scharf projiziert werden kann. Sie ist entscheidend für die präzise Übertragung feiner Details, da eine geringe Tiefenschärfe zu Unschärfen und damit zu einer beeinträchtigten Strukturqualität führen kann [57].

### 3.4.3 Projektionsbelichtung (abbildende Projektion)

Die Projektionsbelichtung nutzt ein **Abbildungssystem** (Spiegel oder Linsen) zwischen **Maske** und **Wafer**, um die Maskenvorlage meist verkleinert auf den Wafer zu projizieren ([Abbildung 20](#)). **Übliche Maßstäbe** sind 10:1 und 5:1. Die Maske wird außerdem nur abschnittsweise auf den Wafer projiziert. Oft enthält die Maske nur eine funktionale Einheit<sup>30</sup> (z.B. einen Chip oder Sensor) [11, 59].



**Abbildung 20:** Projektionsbelichtungssystem mit Öffnungswinkel  $\alpha$  der Optik [11].

Die **Auflösung** (minimal auflösbar Strukturgröße) wird durch **Beugung**, die **Wellenlänge  $\lambda$** , den **Kohärenzgrad des Lichtes**, die **numerische Apertur**:

$$N_A = \sin \alpha,$$

wobei  $\alpha$  der Öffnungswinkel der Optik ist ([Abbildung 20](#)), und das optische System begrenzt [11].

Da nur kleine Felder (ca.  $15 \times 15 \text{ mm}^2$ ) belichtet werden können, muss der Wafer schrittweise bewegt werden, um die gesamte Si-Scheibe (z.B. 6-Zoll-Wafer) zu belichten [11, 59]. Damit diese Anwendung funktioniert, muss ein Filter monochromatisches Licht erzeugen. Spiegel in der Belichtungsanlage erhöhen die Lichtintensität. Mit der **Projektionsbelichtung** ist der Stand der Technik in der Mikroelektronik die Belichtung von Strukturen bis hinab zu 100 nm und darunter [11].

Die Projektionsbelichtung bietet einige **Vorteile**: Durch die **Verwendung vergrößerter Masken** (Reticles) ist die **Herstellung einfacher und präziser** (weil der Maßstab nicht 1:1 ist), was eine **bessere Kontrolle ermöglicht**. Da sich **auf jeder Maske nur ein Chip** befindet, ist die **Fertigung (der Maske)** zudem **kostengünstiger**. Das Einzelchip-Belichtungsverfahren (“Step and Repeat”) erlaubt eine genaue Justierung für jeden Chip und **ermöglicht die Korrektur von nichtlinearem Waferverzug** [11].

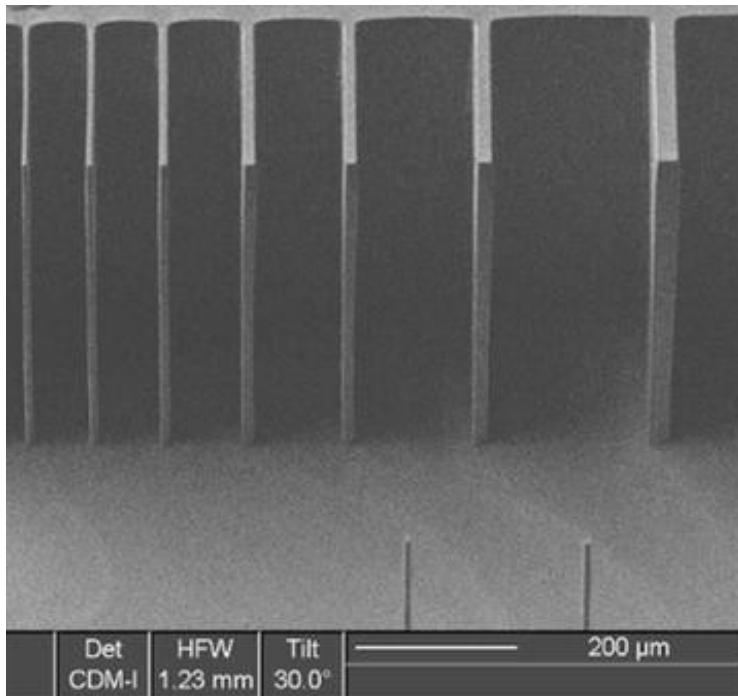
**Nachteile** sind jedoch die **hohen Kosten** der erforderlichen **Geräte**, da extrem korrigierte Optiken mit **hoher numerischer Apertur** ( $N_A$  bis zu 0,6) benötigt werden. Die Verwendung

<sup>30</sup>“Step and Repeat”-Verfahren [11].

von **monochromatischem Licht** kann Dispersion ausgleichen, **führt jedoch zu stehenden Wellen**, die die Strukturgenauigkeit beeinträchtigen können. Das **begrenzte Belichtungsfeld** führt zu einem **geringeren Durchsatz** und erfordert wiederholte Justierung. Die geringe **Tiefenschärfe** schränkt zudem das **Aspektverhältnis** der Strukturen ein [11].

### 3.5 SU-8 Photoresist

Der Photoresist SU-8 ist ein epoxidbasierter Negativ-Resist, der mit herkömmlicher UV-Photolitho-graphieausstattung verwendet wird und die Herstellung von Strukturen bis zu einer Höhe von zwei Millimetern ermöglicht – Röntgenstrahlung ist dabei nicht erforderlich. SU-8 zeichnet sich durch ein **hohes Aspektverhältnis von bis zu 30:1** aus, was auf den **hohen Kontrast**<sup>31</sup> des Resists zurückzuführen ist und die **Realisierung hoher Strukturen** erlaubt. Zudem besitzt SU-8 eine **hohe chemische Resistenz** und kann daher auch als **Ätzmaske eingesetzt** werden [11]. Mit Hilfe von SU-8 entwickelte Strukturen sind in der Abbildung 21, der Abbildung 22 und der Abbildung 23 dargestellt.



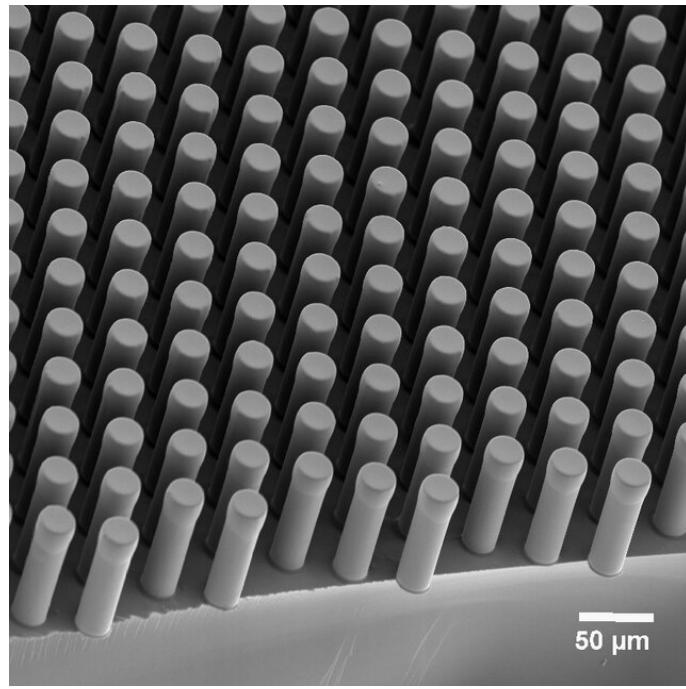
**Abbildung 21:** Nach Lithographie mit SU-8 Photoresist entstandene Wände mit sehr hohem Aspektverhältnis [12].

Zusammengefasst bietet der Photoresist SU-8 zahlreiche **Vorteile**: Er **kann durch Aufschleudern aufgetragen werden**, wobei seine **hohe Viskosität** die Herstellung **dicker Schichten ermöglicht**. SU-8 erreicht **Aspektverhältnisse von über 20:1** und **haftet gut auf Silizium und Glas**, insbesondere bei kleinen oder niedrigen Strukturen. Der Resist zeichnet sich durch **hohe chemische Stabilität und biologische Kompatibilität** aus, was ihn **für optische, mechanische und Fluidik-Elemente sowie Galvanikformen**<sup>32</sup> **ideal macht**. Zudem ist SU-8 im Vergleich zu Prozessen wie DRIE und LIGA **kosten- und zeiteffizient** und liefert ähnliche

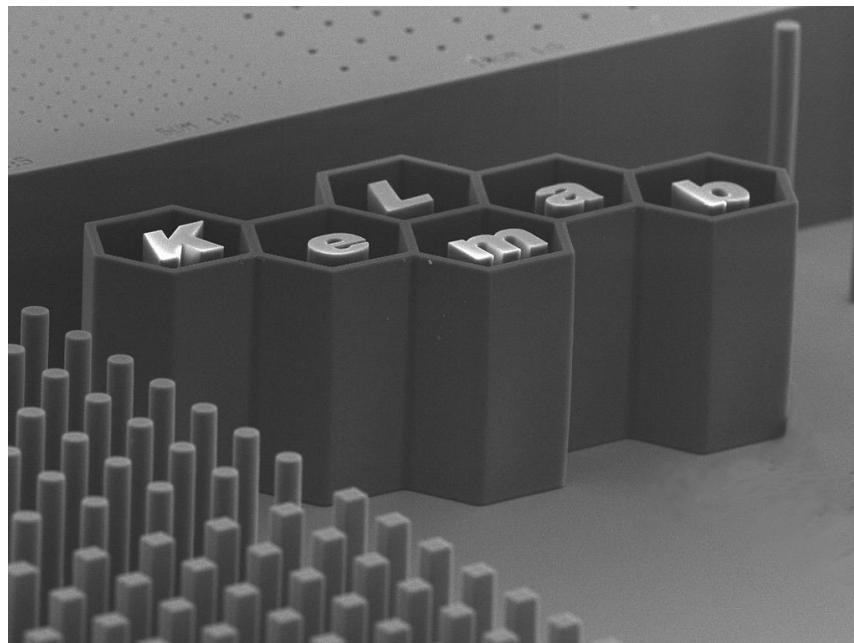
<sup>31</sup>Der hohe Kontrast bei einem Photoresist wie SU-8 bedeutet, dass sich die belichteten und unbelichteten Bereiche sehr klar und scharf voneinander unterscheiden lassen. Das ist wie bei einem Bild mit kräftigen Farben: Die Unterschiede sind leicht zu erkennen. Bei SU-8 sorgt der hohe Kontrast dafür, dass die belichteten Stellen des Resists sehr genau und sauber härten, während die unbelichteten Bereiche weich bleiben und später entfernt werden können.

Der Kontrast ist so hoch, weil SU-8 auf einem speziellen Epoxidharz basiert, das besonders gut auf UV-Licht reagiert. Dadurch entstehen scharfe, klare Strukturen, die nicht "verwischen", was bei der Herstellung von sehr hohen und präzisen Strukturen hilft [71–73].

<sup>32</sup>Siehe LIGA-Verfahren.



**Abbildung 22:** Nach Lithographie mit SU-8 Photoresist entstandene Säulen [13].



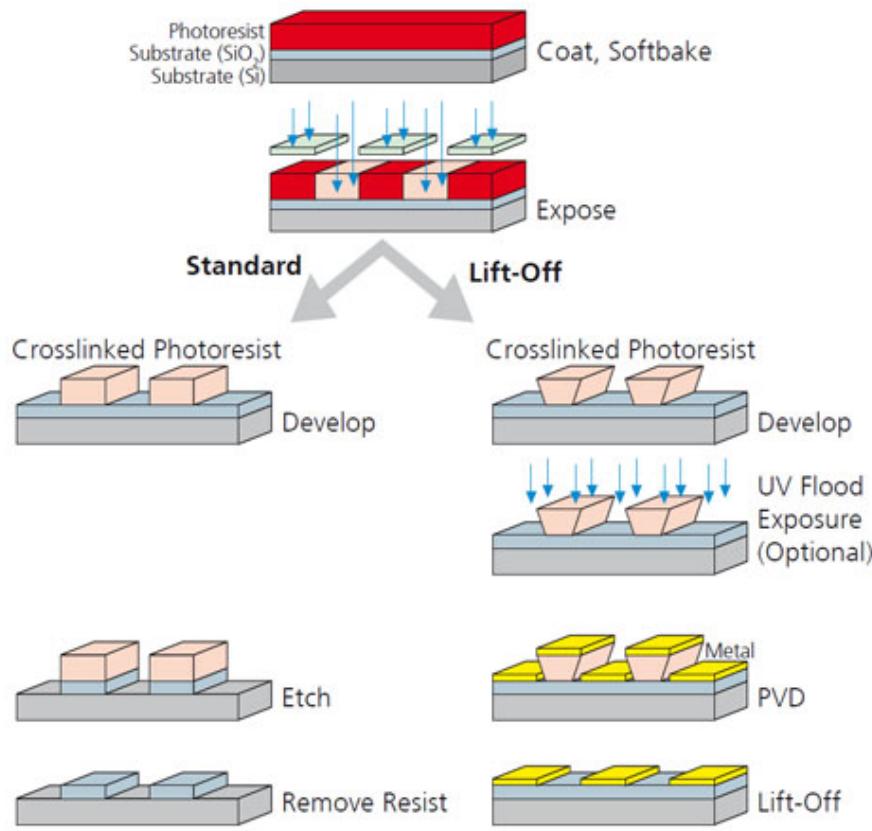
**Abbildung 23:** Nach Lithographie mit SU-8 Photoresist entstandene Strukturen und entstandenes Logo von KemLab Inc. [14].

Ergebnisse [11, 74].

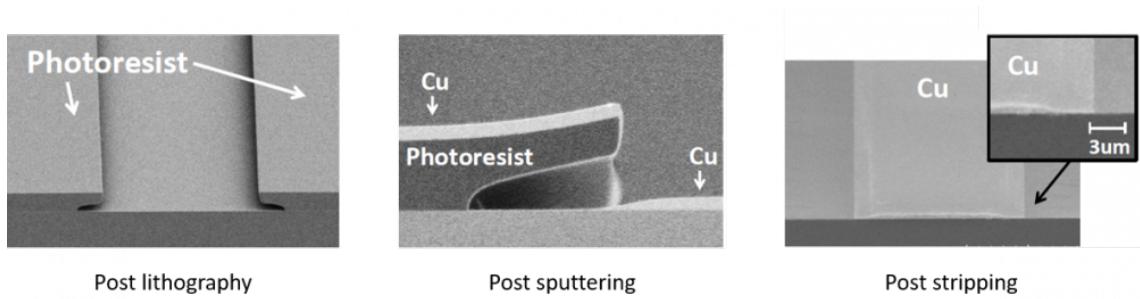
Zu den Nachteilen zählen: Die hohe Viskosität erschwert das Handling im Vergleich zu Standardlacken. Nach dem Auftragen erfordert SU-8 ein Postbake, das zu einem Volumenschwund von etwa 7,5 % führt und dadurch innere Spannungen sowie eine reduzierte Haftung verursacht. Daher ist SU-8 für großflächige Strukturen weniger geeignet [11, 74].

### 3.6 Lift-Off-Verfahren

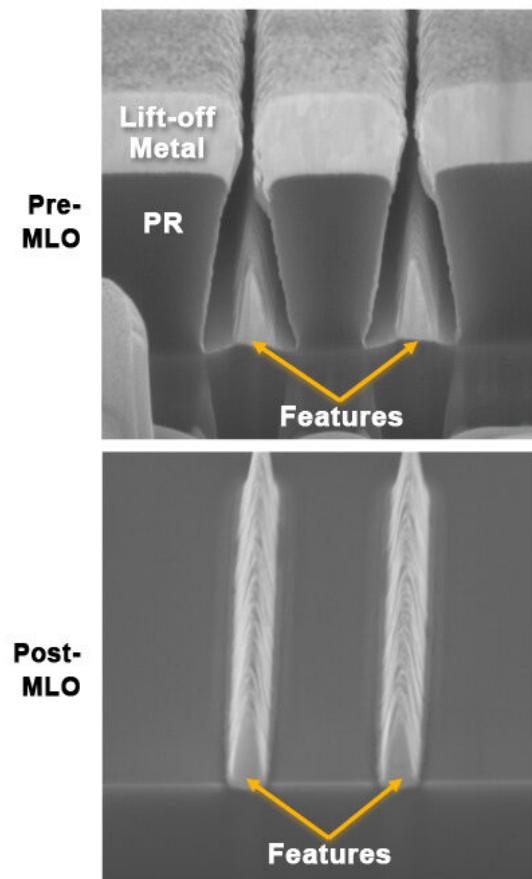
Das Lift-Off-Verfahren ist eine **Methode zur Strukturierung metallischer Dünnfilme ohne Ätzen**. Zunächst wird ein **Photoresist** auf den **Wafer** aufgebracht und strukturiert, um die gewünschten Muster zu definieren. Danach wird das **Metall** ganzflächig abgeschieden, wobei es sowohl auf dem freigelegten Substrat als auch auf dem Photoresist landet. Entscheidend ist, dass die **Flanken des Resist** steil oder negativ sind, damit das **Metall** auf diesen Flächen nicht haften bleibt. Anschließend wird der **Photoresist** in einem **Lösungsmittelbad** entfernt (gestripppt), wobei das darauf liegende Metall ebenfalls abgelöst wird, während das **Metall auf dem Substrat die definierte Struktur bildet** [2, 75, 76]. Der Unterschied zwischen dem zuvor beschriebenen Standardverfahren und dem Lift-Off-Verfahren in der Lithographie wird in [Abbildung 24](#) veranschaulicht. Beispiele dieses Verfahrens unter dem Elektronenmikroskop sind in [Abbildung 25](#) und [Abbildung 26](#) dargestellt.



**Abbildung 24:** Vergleich des Standardverfahrens in der Lithographie mit Negativresist (links) und dem Verfahren mittels Lift-Off (rechts) [15].



**Abbildung 25:** Mit dem Lift-Off-Verfahren hergestellte Kupferbahn auf einem Wafer. Links: Wafer mit strukturiertem Photoresist, wobei die negativen Flanken gut zu erkennen sind. Mitte: Querschnitt der gleichen Anordnung nach dem Sputtern. Auf dem Photoresist und dem Wafer wurde Kupfer abgeschieden. Rechts: Endresultat nach dem Strippen – eine Kupferbahn [16].



**Abbildung 26:** Metallbahnen auf einem Wafer, hergestellt durch das MLO-Verfahren (MLO, Metal-Lift-Off, entspricht dem klassischen Lift-Off-Verfahren). Im oberen Bild ist der Photoresist mit negativen Flanken zu sehen, der mit Metall beschichtet wurde. Das untere Bild zeigt das Endresultat nach dem Entfernen des Photoresists mit einem geeigneten Lösungsmittel [17].

## 4 Ätztechnik

Die Ätztechnik ist ein zentrales Verfahren in der Mikrosystemtechnik, um **gezielt Material von der Oberfläche eines Festkörpers zu entfernen** und feine Strukturen zu erzeugen. Dabei kann das Ätzen entweder nasschemisch oder trocken erfolgen. Beim nasschemischen Ätzen werden **chemische Reagenzien verwendet, um die Oberfläche eines Materials gezielt abzutragen**. Das Trockenätzen hingegen **arbeitet mit Teilchen hoher kinetischer Energie, die durch physikalische oder chemische Prozesse die Oberfläche angreifen und Material abtragen**. Beide Methoden bieten spezifische Vorteile und Herausforderungen und werden in der Mikrosystemtechnik je nach Anforderung eingesetzt [20].

### 4.1 Begriffsklärung für die Ätztechnik

Wie in den vorherigen Kapiteln erwähnt, werden bereits erklärte Begriffe hier nicht erneut behandelt.

- **Ätzmasken** (z.B. Photoresist nach Hardbake): Um gezielte Ätzprofile zu erzielen, werden Masken oder Ätzmasken eingesetzt. Eine Ätzmaske ist eine Schutzschicht, die bestimmte Bereiche der Oberfläche vor dem Ätzprozess bewahrt und damit festlegt, wo das Material abgetragen wird. Sie besteht oft aus Materialien, die eine hohe Resistenz gegenüber dem verwendeten Ätzmittel aufweisen [2, 3, 77–79].
- **KOH-Ätzen:** Eine spezifische Form des anisotropen Ätzens ist das KOH-Ätzen, bei dem Kaliumhydroxid (KOH) als Ätzmittel verwendet wird. Beim KOH-Ätzen von Silizium weisen die {111}-Kristallebenen die kleinste Ätzrate auf, was zu **Strukturen mit definierten Kanten und Winkeln** führt. Dies ermöglicht **präzise Geometrien**, die in der Mikrosystemtechnik besonders wichtig sind [2, 80–82].
- **Miller'sche Indizes und Kristallebenen:** In einem Kristall wie Silizium (Abbildung 27) sind die Atome in einem regelmäßigen 3D-Gitter angeordnet. Diese Anordnung ermöglicht es, das Material entlang bestimmter Schichten oder "Kristallebenen" zu schneiden. Diese Ebenen werden durch Miller'sche Indizes wie {100}, {110} oder {111} beschrieben. Die Zahlen zeigen, wie die Schnitte in Bezug auf das Gitter verlaufen [23, 83–86]. Zur Veranschaulichung zeigt Abbildung 28 wichtige Richtungen im kubischen Kristallsystem, während Abbildung 29 die wesentlichen Ebenen in kubischen Elementarzellen darstellt. Diese Ebenen werden durch die Miller'schen Indizes beschrieben.

Die {111}-Ebenen in Silizium sind besonders stabil und schwer zu ätzen, da die Atome in einer dichten, dreieckigen Anordnung vorliegen. Diese enge Packung macht es schwierig, Atome herauszulösen, was zu einer geringeren Ätzrate führt [23, 83]. Beim KOH-Ätzen wird daher die {111}-Ebene langsamer abgetragen als andere Kristallebenen, wodurch schräge Wände und präzise Winkel entstehen [80]. Diese stabilen {111}-Ebenen werden gezielt genutzt, um Strukturen mit scharfen Kanten und exakten Winkeln zu erzeugen [2].

**Zusammengefasst:** Die Bezeichnungen {100}, {110}, {111} usw. geben an, wie die Kristallebenen im Gitter verlaufen und wie stabil sie sind. Die Wahl der Kristallebene beeinflusst die Ätzrate und ist entscheidend für die präzise Strukturierung in der Mikrotechnik [2, 23, 83].

- **{100}-Silizium-Wafer und {110}-Silizium-Wafer:** Diese Waferarten unterscheiden sich durch ihre kristallografische Orientierung, die durch die **Miller-Indizes** {100} bzw. {110} beschrieben wird. Diese Indizes geben an, wie die Atomschichten im Kristallgitter des Siliziums zur Wafer-Oberfläche orientiert sind.

#### {100}-Silizium-Wafer:

- Die Oberfläche eines {100}-Wafers ist parallel zur {100}-Ebene des Kristallgitters, was bedeutet, dass die Silizium-Atome in einer quadratischen Anordnung vorliegen.
- Diese Orientierung wird häufig in der Halbleiterfertigung verwendet, da sie gute mechanische und elektrische Eigenschaften aufweist.

- Beim anisotropen KOH-Ätzen bilden die {111}-Ebenen (die schräg zur {100}-Ebene verlaufen und eine niedrigere Ätzrate aufweisen) typische schräge Wände mit einem Winkel von 54,74°. Dies ist nützlich für die Herstellung präziser Strukturen in der Mikrosystemtechnik [2].

### {110}-Silizium-Wafer:

- Bei einem {110}-Wafers ist die Oberfläche parallel zur {110}-Ebene des Kristallgitters. Diese Anordnung führt dazu, dass die Atome dichter gepackt und in länglichen Reihen angeordnet sind.
- Diese Orientierung bietet andere mechanische Eigenschaften und wird in bestimmten Anwendungen bevorzugt, wo besondere strukturelle Stabilität erforderlich ist.
- Beim anisotropen KOH-Ätzen ergibt die Orientierung des {110}-Wafers schräge Wände mit einem kleineren Winkel von 35,26°, da die {111}-Ebenen hier anders zur Oberfläche verlaufen als beim {100}-Wafer. Dieser Winkel ist besonders für präzise Strukturierungen in der Mikrotechnik interessant [80].

**Zusammengefasst:** Die Wahl zwischen einem {100}- und einem {110}-Silizium-Wafer beeinflusst die Struktur der bearbeiteten Oberflächen und die entstehenden Winkel beim anisotropen Ätzen. Die {100}-Orientierung erzeugt Winkel von 54,74° und ist für allgemeine Halbleiteranwendungen weit verbreitet, während die {110}-Orientierung mit einem Winkel von 35,26° für spezielle strukturelle Anforderungen verwendet wird [23, 83].

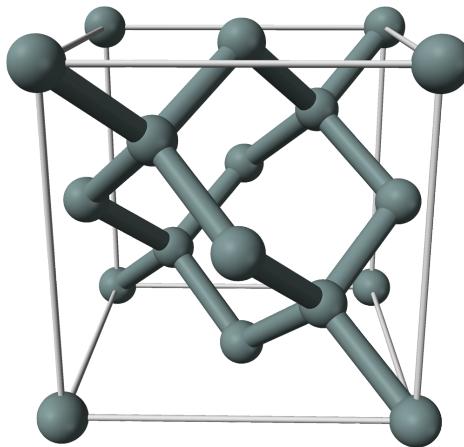
- **Redox-Prozess:** Dieser Prozess besteht aus zwei Teilen: einer Reduktion und einer Oxidation. Einfach gesagt, bei einer **Reduktion gewinnt ein Atom Elektronen hinzu**, und bei einer **Oxidation verliert ein Atom Elektronen**. Beide Vorgänge passieren immer gleichzeitig, da die Elektronen, die ein Atom abgibt, von einem anderen aufgenommen werden.

**Redox-Prozess beim KOH-Ätzen von Silizium:** Beim Ätzen von Silizium mit Kaliumhydroxid (KOH) läuft dieser Prozess wie folgt ab:

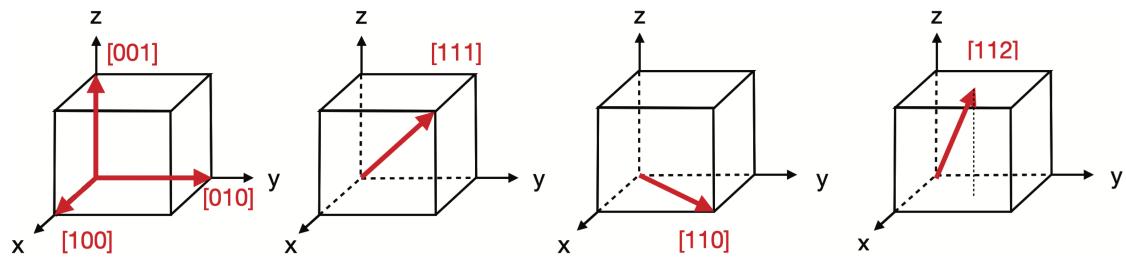
- **Oxidation:** An der Siliziumoberfläche werden Elektronen „weggenommen“. Diese Elektronen verlassen die äußere Schicht des Siliziums, wodurch das Ätzmittel (in diesem Fall KOH) die Siliziumoberfläche angreifen und abbauen kann.
- **Reduktion:** Die „verlorenen“ Elektronen müssen an eine andere Stelle gelangen. Sie gehen in die Flüssigkeit (KOH-Lösung) über und verbinden sich dort mit anderen Teilchen.

Durch diesen Elektronenfluss, der im Redox-Prozess stattfindet, können bestimmte Bereiche des Siliziums gezielt abgetragen werden. Dies kann durch die **p<sup>+</sup>-Dotierung** verstärkt werden: Hierbei wird das Silizium gezielt mit Bor angereichert, das Elektronen aus dem Kristallgitter zieht und die Elektronenmenge im Silizium weiter reduziert. Weniger Elektronen bedeuten, dass der Redox-Prozess (der KOH-Ätzvorgang) erheblich verlangsamt wird, und das Silizium an diesen Stellen definierter und genauer strukturiert werden kann [2].

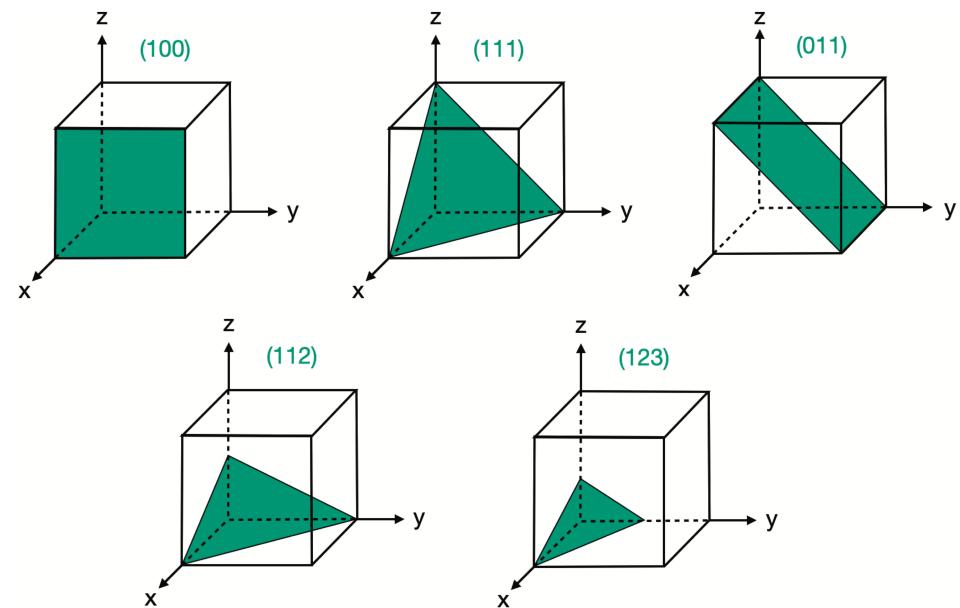
- **Epitaxieschicht:** Ist eine zusätzliche, dünne Schicht, die auf einem Substrat gezüchtet wird. Diese Schicht kann die mechanischen und elektrischen Eigenschaften verbessern, indem sie bestimmte Eigenschaften der p<sup>+</sup> dotierten Bereiche (Ätzstopp) kompensiert [23].
- **Monolithische Integration:** Beschreibt die Integration unterschiedlicher Bauteile wie Mechanik und Elektronik auf einem einzigen Chip. Diese Technik wird durch den p<sup>+</sup>-Dotierung (Ätzstopp) erschwert, da sie die elektrischen Eigenschaften des Materials verändern [2, 23].
- **Passivierung:** Bezeichnet das Aufbringen einer Schutzschicht auf die Oberfläche eines Materials, um dieses vor chemischen Reaktionen oder physikalischen Veränderungen zu schützen. In der Mikrofertigung, insbesondere beim **Deep Reactive Ion Etching (DRIE)**, spielt die Passivierung eine entscheidende Rolle. Hier wird in jedem Zyklus des Bosch-Prozesses eine dünne Schutzschicht auf die Seitenwände der Struktur aufgetragen, um diese vor weiterem Ätzen zu bewahren. Dies ermöglicht ein **stark anisotropes Ätzprofil** mit nahezu senkrechten Seitenwänden, indem die Ätzung gezielt nur am Boden der Struktur erfolgt [2].



**Abbildung 27:** Elementarzelle des Siliziumkristalls [18].



**Abbildung 28:** Wichtige Richtungen im kubischen Kristallsystem: Die Richtung [111] entsteht durch die vektorielle Zusammensetzung aus jeweils einem Schritt in x-, y- und z-Richtung [19].



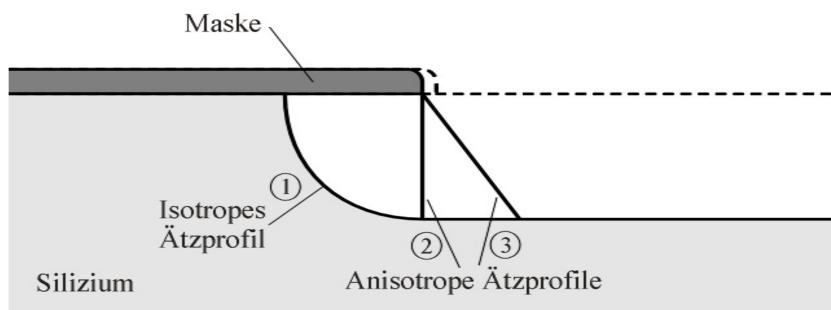
**Abbildung 29:** Darstellung wichtiger Ebenen in kubischen Elementarzellen. Beispiel: Die (100)-Ebene schneidet die x-Achse bei 1 und verläuft parallel zur y- und z-Achse, da sie diese in der Unendlichkeit ( $\infty$ ) schneidet. Die Miller'schen Indizes dieser Ebene ergeben sich aus den Kehrwerten der Schnittpunkte mit den Achsen: 1/1 für x, 1/ $\infty$  für y und 1/ $\infty$  für z, woraus die Indizes (100) resultieren [19].

## 4.2 Ätzrate

Die Ätzrate beschreibt, wie schnell Material während eines Ätzprozesses abgetragen wird. Sie wird als die Menge des entfernten Materials pro Zeiteinheit angegeben, oft in Einheiten wie **Nanometer pro Minute** (nm/min) oder **Mikrometer pro Stunde** ( $\mu\text{m}/\text{h}$ ). Die Ätzrate hängt von verschiedenen Faktoren ab, darunter das verwendete **Ätzmittel**, die **Temperatur** und die **Kristallrichtung des Materials**. Eine kontrollierte Ätzrate ist entscheidend für die Herstellung präziser Strukturen [2, 20].

## 4.3 Ätzprofile

In der Mikrosystemtechnik gibt es verschiedene Ätzprofile, die sich durch das Verhalten der Ätzrate in verschiedenen Raumrichtungen unterscheiden und die Form der erzeugten Strukturen bestimmen. Diese Ätzprofile werden als **isotrop** oder **anisotrop** klassifiziert [20]. Die Abbildung 30 liefert einen Überblick über diese Profile.



**Abbildung 30:** Darstellung der verschiedenen Ätzprofile: ① isotrop, ② anisotrop durch Trockenätzen und ③ anisotrop durch KOH-Ätzen [20].

① **Isotropes Ätzprofil:** Ein isotropes Ätzprofil entsteht, wenn die Ätzrate in alle Raumrichtungen gleich groß ist. Dadurch entstehen abgerundete, viertelkreisförmige Strukturen, da das Material gleichmäßig in die Tiefe und Breite abgetragen wird [20].

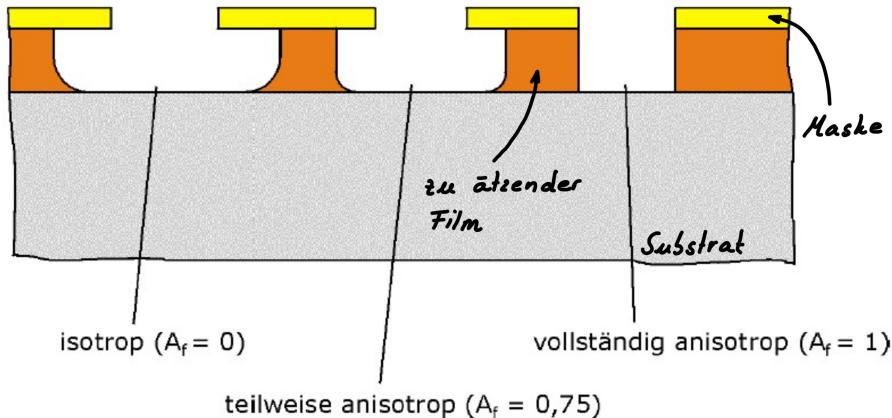
② **und ③ Anisotrope Ätzprofile:** Bei einem anisotropen Ätzprofil hängt die Ätzrate von der Raumrichtung ab, was gezielte Strukturen mit steilen Kanten ermöglicht. Es gibt verschiedene Ansätze für anisotropes Ätzen, wie das **Trockenätzen** ②, bei dem Teilchen hoher kinetischer Energie gezielt entlang einer Richtung die Oberfläche angreifen, und das **KOH-Ätzen** ③. Beim KOH-Ätzen weisen die {111}-Kristallebenen die geringste Ätzrate auf, wodurch natürliche schräge Wände und präzise Winkel entstehen. Diese gezielte Richtungsabhängigkeit ist in der Mikrosystemtechnik besonders wichtig, um Strukturen mit scharfen Kanten und definierten Winkeln zu erzeugen [2, 20].

### 4.3.1 Anisotropiefaktor

Der Anisotropiefaktor  $A_f$  ist ein Maß für die Richtungsempfindlichkeit des Ätzvorgangs (Abbildung 31). Er beschreibt das Verhältnis der lateralen Ätzrate  $R_l$  zur vertikalen Ätzrate  $R_v$  indirekt durch die Formel:

$$A_f = 1 - \frac{R_l}{R_v}.$$

Ein vollständig anisotroper Ätzprozess, bei dem  $R_l = 0$ , ergibt  $A_f = 1$  und führt zu einer exakt senkrechten Struktur. Ein isotroper Ätzvorgang hingegen hat  $A_f = 0$ , was auf gleiche Ätzraten in alle Richtungen hinweist [20].



$A_f$  Anisotropiefaktor

Abbildung 31: Veranschaulichung des Anisotropiefaktors [20].

#### 4.3.2 Selektivität

Die Selektivität eines Ätzprozesses beschreibt das **Verhältnis der Ätzrate der zu ätzenden Schicht  $R_1$  zur Ätzrate der darunterliegenden Schicht (z.B. Si-Substrat)  $R_2$** , definiert durch:

$$S = \frac{R_1}{R_2}.$$

Eine hohe Selektivität bedeutet, dass die zu ätzende Schicht schneller abgetragen wird als die darunterliegende Schicht, sodass diese gut erhalten bleibt. **Im Allgemeinen ist eine hohe Selektivität erwünscht**, um einen geringen Abtrag der darunterliegenden Schicht zu erreichen (Abbildung 32) [20].

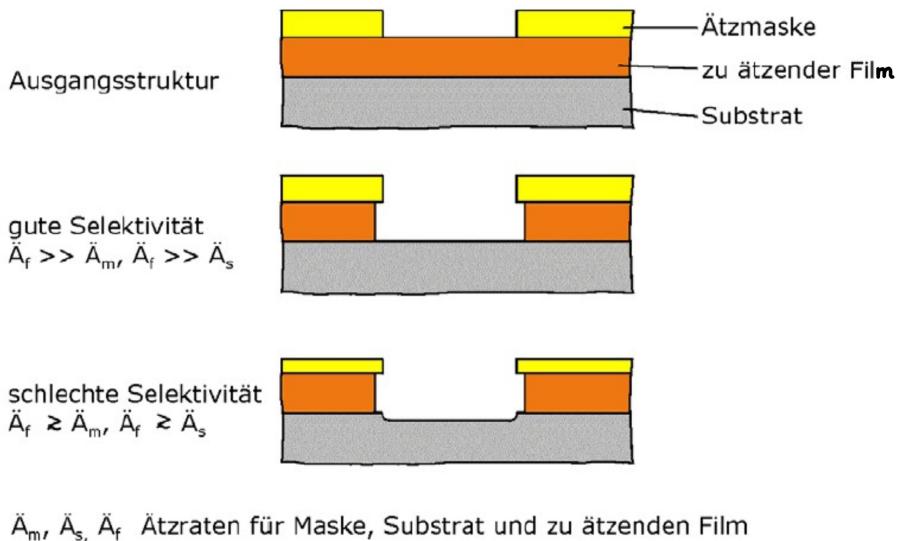


Abbildung 32: Veranschaulichung der Selektivität [20].

#### 4.4 Ätzgraben bei anisotroper KOH-Ätzung von {100}- und {110}-Si-Wafern

In diesem Abschnitt wird erläutert, wie unterschiedliche Ätzgräben ausschauen können. Die Abbildung 33 zeigt Ätzgräben, die durch anisotropes KOH-Ätzen (Ätzrichtung: von “oben”

nach ‘‘unten’’) in zwei verschiedenen Silizium-Wafer-Typen erzeugt wurden: einen {100}- und einen {110}-Silizium-Wafer (siehe Begriffsklärung für die Ätztechnik). Beim anisotropen Ätzen ist die **Ätzrate** richtungsabhängig. Die **KOH-Lösung** (Kaliumhydroxid) ätzt bestimmte Kristallebenen im Silizium langsamer als andere, was spezifische Winkel und geometrische Strukturen erzeugt.

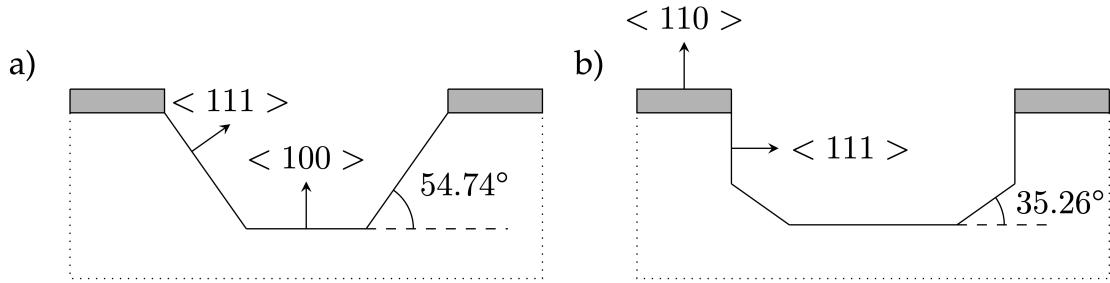


Abbildung 33: KOH-Ätzgräben in einer a) {100}- und b) {110}-Siliziumscheibe.

a) **{100}-Silizium-Wafer:** Im {100}-orientierten Silizium-Wafer verläuft der **Boden des Ätzgrabens** entlang der {100}-Ebene, während die **Seitenwände** entlang der {111}-Kristallebenen verlaufen, die eine **geringere Ätzrate** haben und daher als **schräge Flächen** erhalten bleiben. Der **Winkel zwischen der {100}- und der {111}-Ebene** beträgt **54,74°**. Dieser Winkel ist **charakteristisch** für das KOH-Ätzen in {100}-Silizium und wird **durch die Anordnung der Atome** entlang der {111}-Ebene bestimmt [2].

b) **{110}-Silizium-Wafer:** Beim {110}-orientierten Silizium-Wafer verlaufen die eitenwände ebenfalls entlang der {111}-Ebenen. Im Gegensatz zum {100}-Wafer beträgt der **Winkel zwischen der {110}-Ebene (oben) und der {111}-Ebene (Seitenwände)** jedoch **35,26°**. Dieser Winkel ergibt sich aus der unterschiedlichen Kristallstruktur des {110}-Wafers im Vergleich zum {100}-Wafers und führt zu einer anderen **Orientierung der {111}-Ebenen relativ zur Oberfläche** [23, 80].

**Zusammenfassung:** Die Abbildung 33 zeigt, wie die Kristallorientierung des Siliziums die Struktur der Ätzprofile beeinflusst. Der Winkel zwischen den Ebenen hängt von der Kristallorientierung ab, und das anisotrope KOH-Ätzen nutzt dies, um präzise Geometrien und schräge Wände zu erzeugen. Die {111}-Ebenen bieten aufgrund ihrer geringeren Ätzrate die stabilen Wände, während die Orientierung des Wafers (entweder {100} oder {110}) die spezifischen Winkel der Grabenwände bestimmt [2, 23, 80].

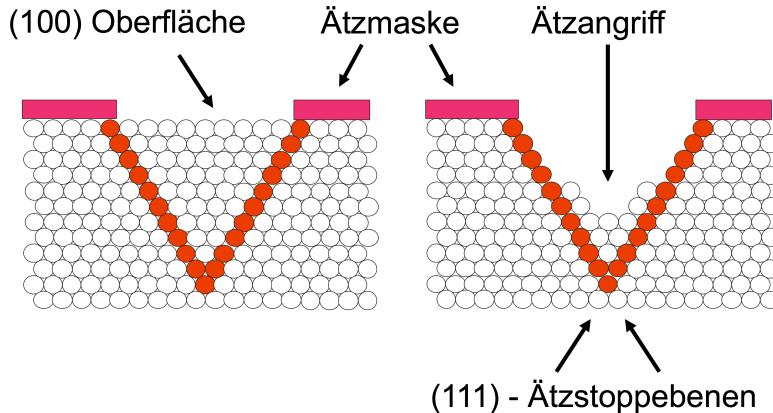
## 4.5 Ätzstoppebenen mit p<sup>+</sup>-Dotierung

In der Mikrosystemtechnik ist eine **präzise Kontrolle des Ätzvorgangs** entscheidend, um definierte Strukturen und Tiefen zu erzielen. Eine Möglichkeit, dies zu erreichen, ist das **Einfügen von Ätzstoppebenen durch p<sup>+</sup>-Dotierung**<sup>33</sup>. Besonders bei der Verwendung von **Kaliumhydroxid (KOH)** als Ätzmittel bewirkt die Dotierung mit Atomen wie **Bor**<sup>34</sup>, dass das Material an den dotierten Stellen **wesentlich langsamer geätzt** wird. Zur Veranschaulichung dient die Abbildung 34.

**Warum funktioniert die p<sup>+</sup>-Dotierung als Ätzstopp?:** Beim KOH-Ätzen von Silizium findet ein **Redox-Prozess** statt, bei dem **Elektronen zwischen der Siliziumoberfläche und der KOH-Lösung übertragen** werden. In der **Oxidationsphase** verlassen Elektronen

<sup>33</sup>Der Entzug von Elektronen aus dieser Ebene verlangsamt bzw. stoppt den Redox-Prozess beim KOH-Ätzen, bei dem Elektronen von der Siliziumoberfläche ins Ätzmittel übertragen werden [2].

<sup>34</sup>Boratome besitzen in ihrer Valenzschale ein Elektron weniger als Silizium. Durch die Dotierung mit Bor erhält man p-dotiertes Silizium, das als positiver Halbleiter fungiert [2].



**Abbildung 34:** Veranschaulichung einer Ätzstoppebene (rot) in einem Silizium-Wafer (weiß). Der Ätzprozess wird an dieser Ebene stark verlangsamt [20].

die Siliziumoberfläche, wodurch das KOH das Silizium abbauen kann. Durch eine p<sup>+</sup>-Dotierung wird gezielt Bor in das Silizium eingebracht, das Elektronen aus dem Kristall entzieht und den Redox-Prozess an diesen Stellen stark verlangsamt (aber nicht völlig unterbricht). Dies ermöglicht eine sehr präzise Kontrolle der Ätzrate an diesen Ebenen [2, 80].

#### Vorteile der Ätzstopptechnik:

- **Homogenität über den Wafer:** Das Ätzen wird gleichmäßiger, da die Keilförmigkeit des Wafers und andere mechanische Variationen weniger Einfluss haben.<sup>35</sup>
- **Stabilität der Ätzrate:** Schwankungen durch Temperatur- oder Konzentrationsänderungen werden durch die Ätzstopp-Eigenschaften weniger kritisch.
- **Wegfall der Zeitkontrolle:** Der Ätzvorgang stoppt automatisch an der Ätzstoppebene, ohne dass ein kritischer Zeitpunkt gemessen werden muss [2].

#### Nachteile der Dotierung:

- **Mechanische Einschränkungen:** Die Einführung von Bor-Atomen erzeugt Zugspannungen im Kristall und kann die strukturelle Integrität beeinträchtigen, was den Kristall anfälliger für Risse macht.
- **Elektrische Entartung:** Die starke Dotierung führt zu metallähnlichem Verhalten im Material und verhindert so die Integration elektronischer Bauelemente, wie p/n-Übergänge. Dies macht eine **monolithische Integration** von Mechanik und Elektronik unmöglich.
- **Abhilfe durch Epitaxieschicht:** Um die mechanischen und elektrischen Nachteile teilweise auszugleichen, kann eine weniger stark dotierte **Epitaxieschicht** über der p<sup>+</sup>-Schicht aufgebracht werden, was jedoch den Herstellungsaufwand erhöht [23, 80].

**Zusammengefasst:** Durch die p<sup>+</sup>-Dotierung können Ätzstoppebenen geschaffen werden, die den Ätzvorgang präzise an definierten Stellen erheblich verlangsamen. Diese Technik bietet Vorteile für eine gleichmäßige Strukturierung und Präzision, hat jedoch Nachteile hinsichtlich der mechanischen Stabilität und elektrischen Eigenschaften des Kristalls [2, 23].

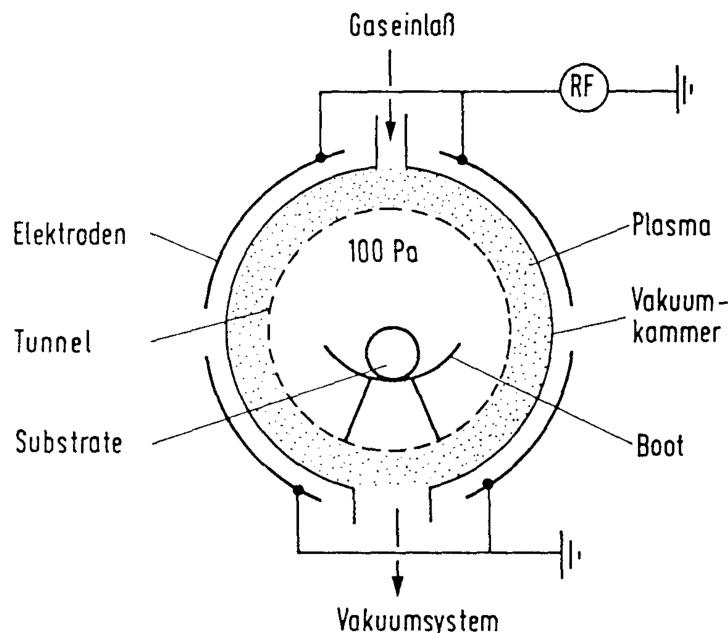
<sup>35</sup>In der Herstellung von Mikrochips und Mikrosystemen wird oft ein großer, dünner Silizium-Wafer verwendet, der nicht überall exakt gleich dick ist. Diese leichte Schräglage nennt man "Keilförmigkeit". Da der Wafer dadurch in verschiedenen Bereichen leicht unterschiedliche Dicken aufweist, könnte dies normalerweise das Ätzen beeinflussen und zu ungleichmäßigen Ergebnissen führen. Die Nutzung einer Ätzstoppebene gleicht diese kleinen Unterschiede jedoch aus und sorgt dafür, dass die Ätzung unabhängig von der Dicke gleichmäßig ist [2].

**Hinweis:** Die selektive Ätztechnik mit hochdotierten Stoppschichten wird wegen Ihrer Nachteile nur noch selten verwendet [20].

## 4.6 Trockenätzverfahren

Trockenätzverfahren sind in der Mikrosystemtechnik essenziell für die Herstellung kleiner Strukturen, da **nasschemische Ätzprozesse** in der Regel **nur bis zu einer Strukturgröße von etwa 2-3 µm präzise** arbeiten können. **Kleinere und präzisere Strukturen** erfordern daher **Trockenätzverfahren** [2].

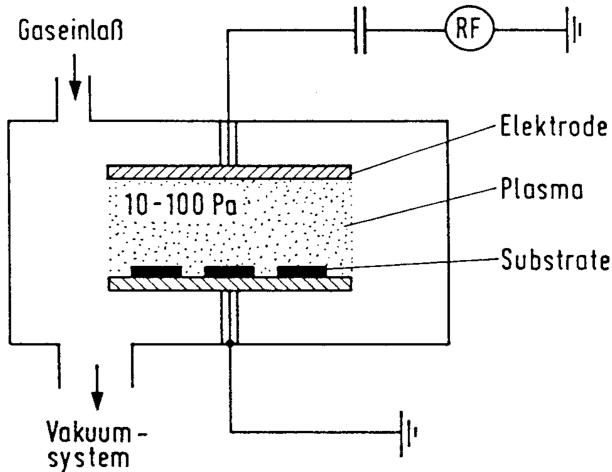
**Chemisches Trockenätzen:** Das chemische Trockenätzen basiert auf der **Reaktion reaktiver Ionen oder Radikale** mit der **Substratoberfläche**. Diese reaktiven Teilchen werden **durch chemische Prozesse erzeugt** und treffen durch den **hohen Gasdruck** und die resultierende **Stoßwahrscheinlichkeit** stark abgebremst auf das Substrat. Da die **kinetische Energie reduziert** ist, tragen sie nicht **zum physikalischen Abtrag bei** und **ermöglichen eine hohe Selektivität**, da nur die **reaktive Komponente** mit der **Festkörperoberfläche** reagiert. Diese Methode ist oft **isotrop**, da die **Reaktivität in alle Richtungen gleich** ist. Gängige Verfahren sind das **Barrel-Ätzen** und ([Abbildung 35](#)) das **Plasma-Ätzen** ([Abbildung 36](#)) [20].



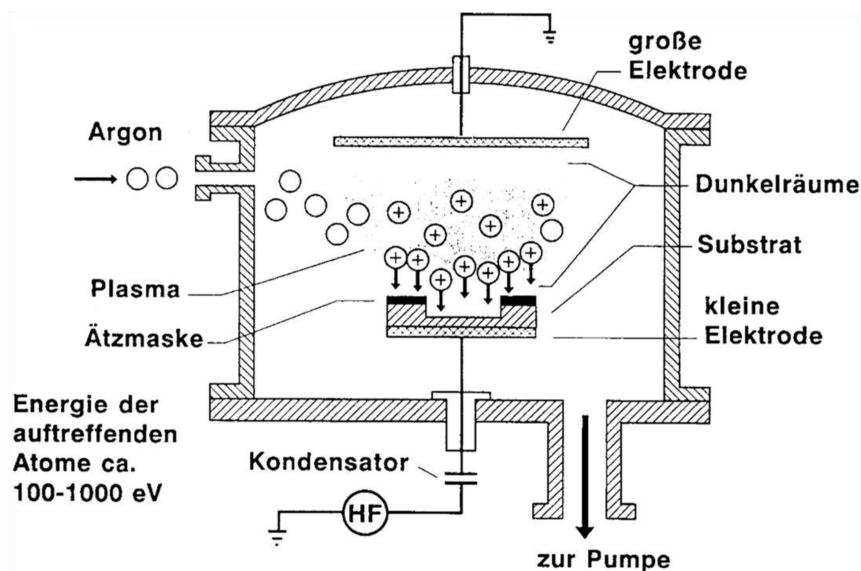
**Abbildung 35:** Barrel-Ätzverfahren: Das Plasma ist vom Ätzbereich getrennt, sodass nur reaktive Teilchen in die Ätzkammer gelangen. Hauptanwendung ist das Entfernen (Veraschen, Strippen) von Photoresist im Sauerstoffplasma [20].

**Physikalisches Trockenätzen:** Beim physikalischen Trockenätzen kommen **inerte Ionen<sup>36</sup>**, meist Argonionen ( $\text{Ar}^+$ ), mit einer **Energie von 0,1-1 keV** zum Einsatz. Diese Ionen **treffen mit hoher kinetischer Energie auf die Festkörperoberfläche und entfernen Material durch physikalischen Abtrag**, d.h., durch **kinetische Energieübertragung**. Physikalisches Trockenätzen ermöglicht eine **hohe Anisotropie**, da die **Ionen in eine spezifische Richtung beschleunigt** werden. Die **Selektivität** zur Maskenschicht ist jedoch **niedrig**, da die **Sputterrate bei verschiedenen Materialien ähnliche Größenordnungen hat**. Zu den verbreiteten Methoden gehören das **Sputterätzen** ([Abbildung 37](#)) und das **Ionenstrahlätzen** [3].

<sup>36</sup>Inerte Ionen sind elektrisch geladene Teilchen, die chemisch inaktiv oder „reaktionsträge“ sind. Das bedeutet, dass sie unter normalen Bedingungen keine Reaktionen mit anderen Stoffen eingehen [27].



**Abbildung 36:** Plasma-Ätzverfahren: Das Plasma wird direkt im Ätzbereich erzeugt, wodurch eine hohe Reaktivität erzielt wird [20].

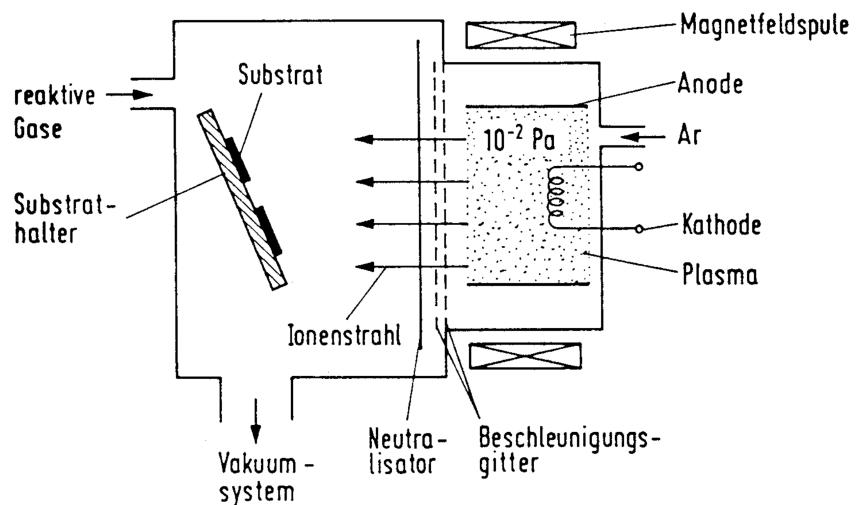


**Abbildung 37:** Sputterätzen: Prozessdruck im Bereich von 1 – 10Pa [20].

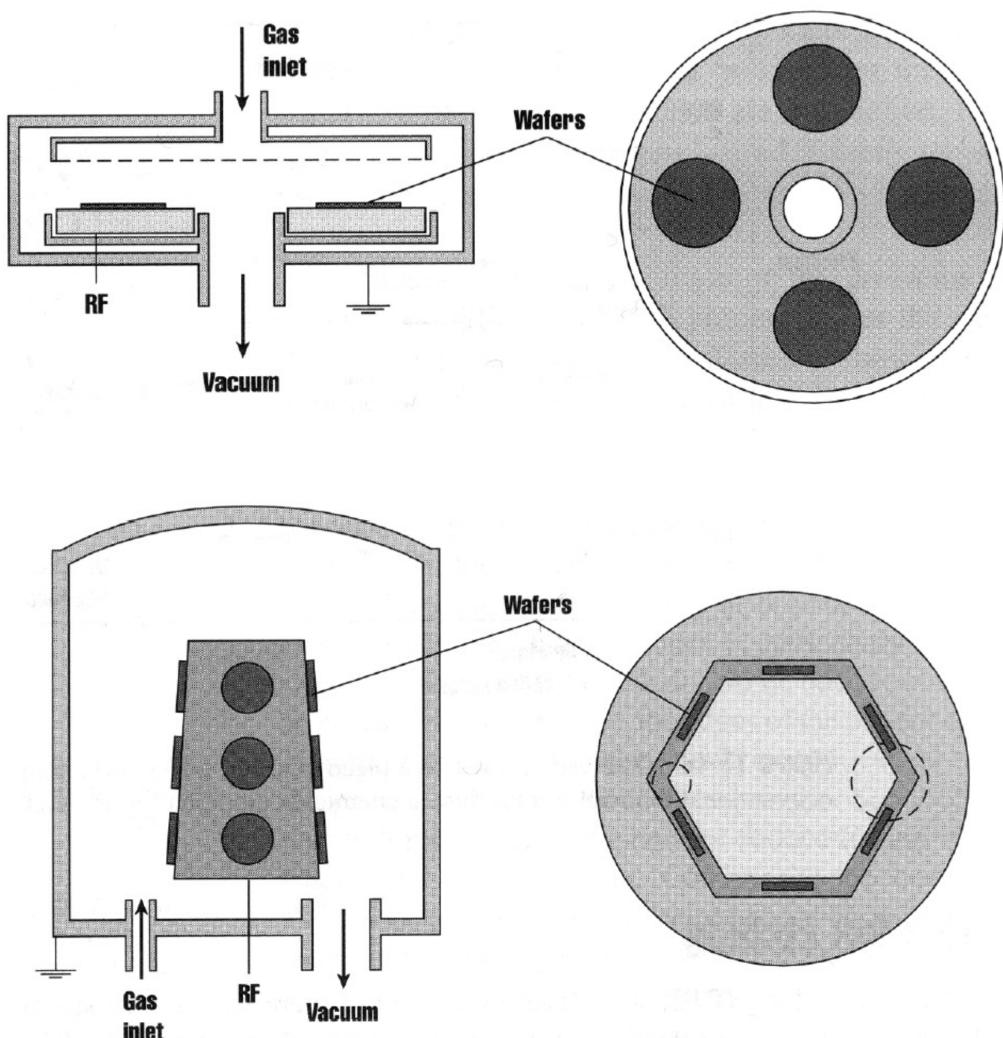
**Reactive Ion Etching (reaktives Ionenätzen bzw. RIE):** Das reaktive Ionenätzen kombiniert chemische und physikalische Ätzmechanismen. Dabei wird ein Plasma aus reaktiven Gasen oder einem Gemisch aus reaktiven und inerten Gasen erzeugt. Die Kombination dieser beiden Komponenten führt zu einem Ätzangriff, bei dem sowohl chemische als auch physikalische Abtragseffekte wirken. Durch diese Kombination wird eine hohe Selektivität, eine hohe Anisotropie und die Realisierung von senkrechten Wänden erreicht, was für präzise Mikrosysteme notwendig ist. Zudem können hohe Ätzraten erzielt werden, was RIE zum am häufigsten genutzten Trockenätzverfahren macht. Typische Ausführungen umfassen Parallelplattenreaktoren (Abbildung 39 oben) und Barrellreaktoren (Abbildung 39 unten) [2].

**Deep Reactive Ion Etching (DRIE):** Das Deep Reactive Ion Etching (DRIE) ist eine erweiterte Form des reaktiven Ionenätzens (RIE), die speziell entwickelt wurde, um tiefe, schmale und präzise Ätzstrukturen mit hohen Aspektverhältnissen zu erzeugen, wie sie in der MEMS-Fertigung (Mikro-Elektro-Mechanische Systeme) erforderlich sind.

Dieses Verfahren basiert auf einem Wechselprozess aus abwechselnden Ätz- und Passivierungsschritten (bekannt als Bosch-Prozess). In jedem Zyklus wird zunächst eine Schutzschicht

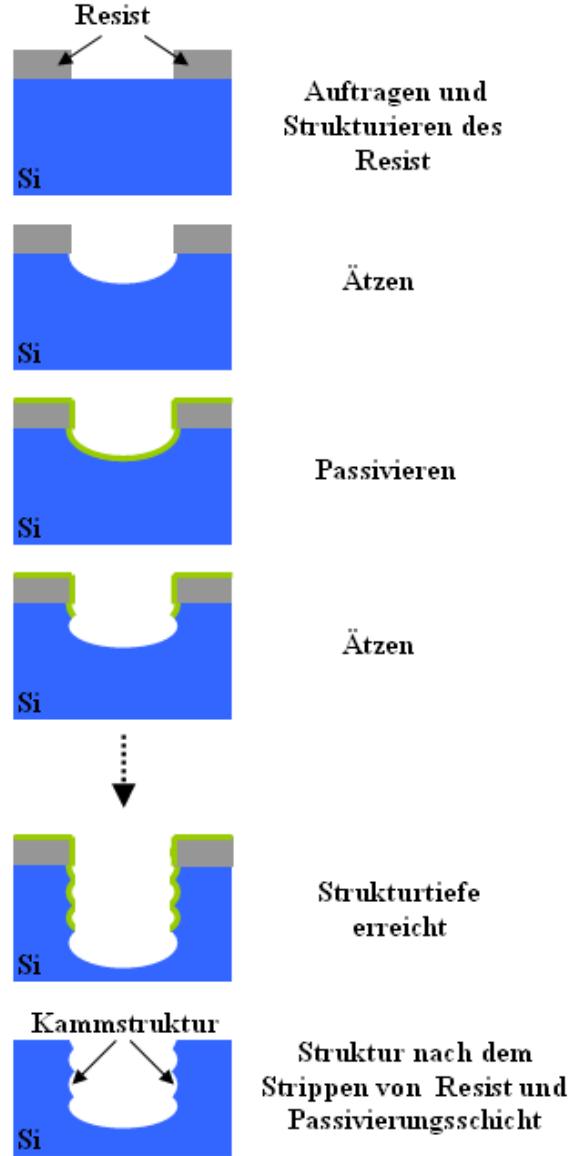


**Abbildung 38:** Ionenstrahlätzen (IBE): Hochvakumbereich von  $< 10^{-2}$  Pa, bei dem die Ionen durch einen Glühfaden neutralisiert werden. Typische Ätzraten liegen im Bereich einiger 10 nm/min [20].



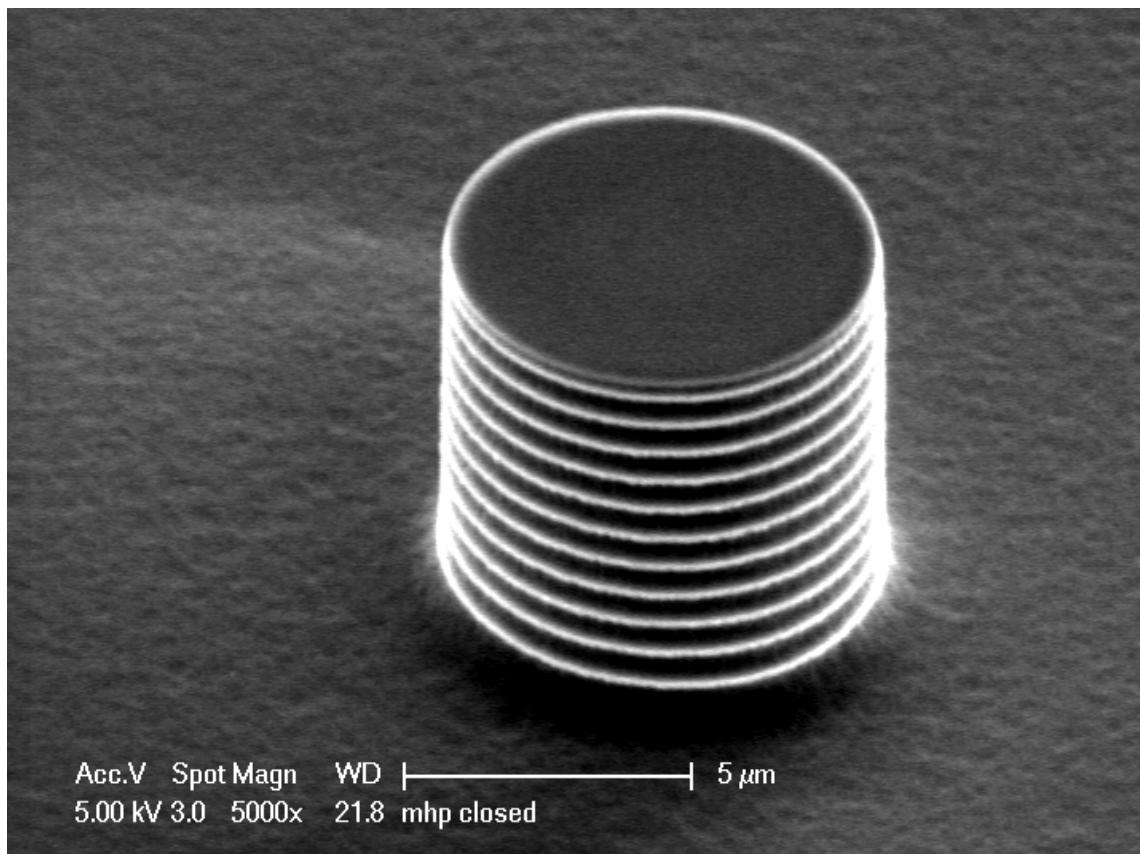
**Abbildung 39:** Typen von RIE-Reaktoren: Oben - Parallelplattenreaktor, Unten - Barrelreaktor [20].

aufgebracht, die die Seitenwände der Struktur schützt. Anschließend folgt ein Ätzschritt, bei dem das Material an der Bodenfläche abgetragen wird. Durch die wiederholte Anwendung dieser Schritte entstehen **tiefe Ätzprofile mit nahezu senkrechten Kanten** und einer hohen Anisotropie. Die Seitenwände weisen allerdings durch den alternierenden Prozess Wellen auf (Abbildung 40, Abbildung 41 und Abbildung 42).

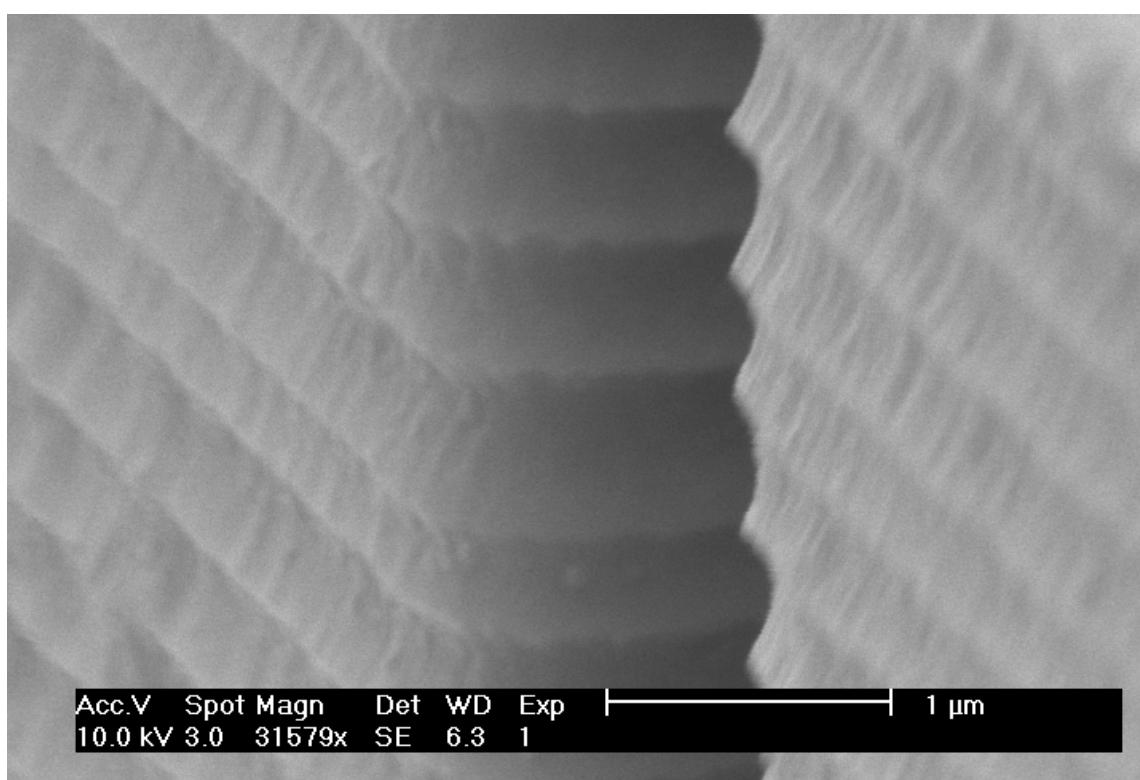


**Abbildung 40:** Prozessablauf des Deep Reactive Ion Etching (DRIE): Schrittweise Darstellung der abwechselnden Passivierungs- und Ätzzyklen, die zu tiefen und hochgradig anisotropen Strukturen führen [21].

DRIE ermöglicht die Herstellung präziser, hoch anisotroper Strukturen, die für Anwendungen wie MEMS-Sensoren, Aktoren und mikrofluidische Kanäle entscheidend sind. Trotz der hohen Präzision und Flexibilität ist der Prozess anspruchsvoll und erfordert eine sorgfältige Kontrolle der Parameter, wie Gasfluss, Zykluszeit und Plasmaströme [2, 3].



**Abbildung 41:** Ein Silizium-Mikropfeiler, hergestellt mittels Bosch-Prozess [22].



**Abbildung 42:** Gewellte Seitenwand einer Siliziumstruktur, hergestellt mit dem Bosch-Prozess [22].

# Literatur

- [1] F. Keplinger, “Sensorik und Sensorsysteme: Physical vapour deposition.” Lecture Notes, Vienna University of Technology, Institut für Sensor und Aktuatorssysteme, 2024. Skriptum: Nr. 2.
- [2] M. J. Madou, Fundamentals of Microfabrication: The Science of Miniaturization. CRC Press, 2nd ed., 2002. Grundlagen der Lithographie in der Mikrosystemtechnik.
- [3] S. Wolf and R. N. Tauber, Silicon Processing for the VLSI Era, Vol. 1: Process Technology. Lattice Press, 2000. Abschnitte über Lithographietechniken und deren Anwendungen.
- [4] B. Hoegel, “Zykloide.” <https://www.biancahoegel.de/geometrie/algebra/zykloide.html>, 2024. Accessed: 2024-10-31.
- [5] F. Keplinger, “Sensorik und Sensorsysteme: Chemical vapour deposition.” Lecture Notes, Vienna University of Technology, Institut für Sensor und Aktuatorssysteme, 2024. Skriptum: Nr. 3.
- [6] “Photoresist.” <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/photoresist>, 2024. Accessed: 2024-10-31.
- [7] S. Randolph, J. Fowlkes, and P. Rack, “Carbon mems: from the nanoscale to the macroscale. novel fabrication techniques and applications in electrochemistry,” ResearchGate, 2012. Accessed: 2024-10-31.
- [8] Weierstrass Institute, “Photoresists and lithography.” <https://www.wias-berlin.de/research/ats/Photoresists/index.jsp?lang=1>, 2024. Accessed: 2024-10-31.
- [9] B. R. Sankapal, A. Ennaoui, R. B. Gupta, and C. D. Lokhande, “Spin coating: Easy technique for thin films,” in Simple Chemical Methods for Thin Film Deposition, pp. 199–220, Singapore: Springer, 2023.
- [10] R. P. Cowburn and M. E. Welland, “Large area patterned magnetic nanostructures,” Journal of Applied Physics, vol. 81, no. 8, pp. 3757–3761, 1997. Untersucht die Herstellung großflächiger, gemusterter magnetischer Nanostrukturen unter Verwendung von Proximity-Belichtungsverfahren.
- [11] U. Schmid, “Sensorik und sensorsysteme, 2. lithographie.” Lecture Slides, Technische Universität Wien, Institut für Sensor- und Aktuatorssysteme, March 2024. Folien zur Vorlesung.
- [12] H. Hölscher, “Su-8 photoresist,” in Encyclopedia of Nanotechnology (B. Bhushan, ed.), pp. 1–5, Springer, 2016.
- [13] J. Tian, B. Y. Ng, T. P. Chen, M. S. Hong, and X. J. Zhang, “The use of high aspect ratio photoresist su-8 for super-hydrophobic pattern prototyping,” ResearchGate, 2005.
- [14] K. Inc., “Kemlab inc. offers game-changing negative tone epoxy photoresist outperforming su-8,” AZoM, August 2023.
- [15] S. Zeloof, “Sam zeloof’s blog.” <http://sam.zeloof.xyz/author/szeloof/page/2/>, 2023. Accessed: 2023-11-01.
- [16] JSR Micro NV, “Lift resists.” <https://www.jsrmicro.be/electronic-materials-packaging-materials/lift-resists>, 2024. Accessed: 2024-11-02.
- [17] ClassOne Technology, “Metal lift-off process.” <https://classone.com/electroplating/metal-lift-off-process/>, 2023. Accessed: 2023-11-01.
- [18] Wilderness Labs, “Silicon (si).” <https://developer.wildernesslabs.co/Hardware/Tutorials/Electronics/Part6/Silicon/>, 2024. Accessed: 2024-11-02.
- [19] unknown, Grundlagen der Konstruktionswerkstoffe für Studium und Praxis. Wiley-VCH, 2nd ed., 2023. Accessed: 2024-11-02.

- [20] U. Schmid, “Sensorik und sensorsysteme, 3. ätztechnik.” Lecture Slides, Technische Universität Wien, Institut für Sensor- und Aktuatorsysteme, March 2024. Folien zur Vorlesung.
- [21] Wikipedia contributors, “Reaktives ionentiefenätzen.” [https://de.wikipedia.org/wiki/Reaktives\\_Ionentiefen%C3%A4tzen](https://de.wikipedia.org/wiki/Reaktives_Ionentiefen%C3%A4tzen), 2024. Accessed: 2024-11-03.
- [22] Wikipedia contributors, “Deep reactive-ion etching.” [https://en.wikipedia.org/wiki/Deep\\_reactive-ion\\_etching](https://en.wikipedia.org/wiki/Deep_reactive-ion_etching), 2024. Accessed: 2024-11-03.
- [23] C. Kittel, Introduction to Solid State Physics. Wiley, 8th ed., 2004.
- [24] M. Ohring, Materials Science of Thin Films: Deposition and Structure. Academic Press, 2nd ed., 2002.
- [25] S. M. Sze and K. K. Ng, Physics of Semiconductor Devices. Wiley, 3rd ed., 2006.
- [26] D. L. Smith, Thin-Film Deposition: Principles and Practice. McGraw-Hill, 1995.
- [27] D. M. Mattox, Handbook of Physical Vapor Deposition (PVD) Processing. Elsevier, 2010. Chapters on sputtering processes, including magnetron sputtering and Lorentz force effects.
- [28] P. Atkins and J. de Paula, Physical Chemistry. Oxford University Press, 10th ed., 2014. Chapter on Atomic Structure and Noble Gases.
- [29] S. S. Zumdahl and S. A. Zumdahl, Chemistry. Cengage Learning, 9th ed., 2013. Section on Noble Gases and their Properties.
- [30] M. S. Silberberg, Chemistry: The Molecular Nature of Matter and Change. McGraw-Hill Education, 8th ed., 2017. Chapter on Atomic Structure and Periodicity.
- [31] A. Prechtl, Grundlagen der Elektrotechnik, Band 2. Wiesbaden: Springer Vieweg, 5 ed., 2005. Enthält ausführliche Erklärungen zur Lorentzkraft und elektromagnetischen Feldern.
- [32] R. E. Boehler and I. E. Campbell, Plasma Science and Technology. Wiley-Blackwell, 1994.
- [33] G. J. Hutchings and P. Sautet, Introduction to Surface Chemistry and Catalysis. Elsevier, 2018.
- [34] R. H. Petrucci, F. G. Herring, J. D. Madura, and C. Bissonnette, General Chemistry: Principles and Modern Applications. Pearson Education, 11th ed., 2017. Chapter on Atomic Structure and Periodicity.
- [35] R. Chang and K. A. Goldsby, Chemistry. McGraw-Hill Education, 12th ed., 2016. Section on Atomic Structure and Valence Electrons.
- [36] T. L. Brown, H. E. LeMay, B. E. Bursten, C. J. Murphy, and P. M. Woodward, Chemistry: The Central Science. Pearson, 14th ed., 2018. Chapter on Electrons in Atoms and Periodic Properties.
- [37] P. Atkins and J. de Paula, Atkins' Physical Chemistry. Oxford University Press, 9th ed., 2010.
- [38] R. P. Feynman, R. B. Leighton, and M. Sands, The Feynman Lectures on Physics. Basic Books, 2011.
- [39] Applied Surface Science and Journal of Vacuum Science and Technology, “Various articles on plasma and sputtering,” Applied Surface Science and Journal of Vacuum Science and Technology, n.d. These journals contain specialized articles on the application of radicals in plasma coating and sputter processes.
- [40] E. Chen, “Dc diode sputtering deposition,” Harvard MRSEC, 2004. Accessed: 2024-10-29.
- [41] VEM, Thin Film Evaporation Guide, 2023. Accessed: 2024-10-31.
- [42] T. Yue, L. Wang, and J. e. a. Chou, “Directed energy deposition of multi-principal element alloys,” Frontiers in Materials, vol. 7, pp. 1–18, 2020. Accessed: 2024-10-29.

- [43] Y. Wang, C. Li, and J. Chen, “The effectiveness of cooled-finger and vacuum distillation processes in view of the removal of fe, si, and zn from aluminium,” *MDPI Metals*, vol. 10, no. 5, pp. 1–13, 2021. Accessed: 2024-10-29.
- [44] Thermopedia, “Sublimation,” *Thermopedia*, 2024. Accessed: 2024-10-29.
- [45] A. Z. Jones, “Sublimation process,” *ThoughtCo*, 2023. Accessed: 2024-10-29.
- [46] BCcampus, *Phase Transitions: Melting, Boiling, and Subliming – Introductory Chemistry – 1st Canadian Edition*. BC Open Textbooks, 2020. Accessed: 2024-10-29.
- [47] S. M. Rossnagel, “Magnetron sputtering: Overview and process fundamentals,” *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*, vol. 21, no. 5, pp. S74–S82, 2003.
- [48] A. Anders, “Advances in magnetron sputtering,” *Journal of Applied Physics*, vol. 106, no. 11, p. 113301, 2010. Discusses the role of magnetic fields and electron confinement in magnetron sputtering.
- [49] V. Kouznetsov, K. Macák, J. M. Schneider, U. Helmersson, and I. Petrov, “A new type of magnetron discharge,” *Surface and Coatings Technology*, vol. 122, no. 2-3, pp. 290–293, 1999. Examines electron behavior under magnetic fields and the Lorentz force in magnetron systems.
- [50] A. Anders, “Reactive sputtering: Understanding and controlling the sputtering process,” *Applied Physics Letters*, vol. 106, no. 11, p. 113301, 2010. Overview of reactive sputtering with focus on stoichiometry adjustment through reactive gas pressure.
- [51] T. L. Bergman, A. S. Lavine, and F. P. Incropera, *Introduction to Heat Transfer*. Wiley, 6th ed., 2011. Diskussion über erzwungene Konvektion und ihre Mechanismen.
- [52] F. P. Incropera and D. P. DeWitt, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. Wiley, 6th ed., 2007. Kapitel zur erzwungenen Konvektion und deren Anwendung.
- [53] J. Crank, *The Mathematics of Diffusion*. Oxford University Press, 2nd ed., 1975. Grundlagen der Diffusionstheorie und deren Anwendung in wissenschaftlichen Prozessen.
- [54] W. M. Kays and M. E. Crawford, “Convective heat and mass transfer,” *Journal of Heat Transfer*, vol. 127, no. 3, pp. 421–429, 2005. Artikel über die Grundlagen der erzwungenen Konvektion und deren technische Anwendungen.
- [55] A. Bejan, *Convection Heat Transfer*. Wiley, 4th ed., 2013. Enthält Abschnitte zu erzwungener Konvektion und deren Bedeutung in industriellen Prozessen.
- [56] F. M. White, *Viscous Fluid Flow*. McGraw-Hill Education, 3rd ed., 2006. Kapitel über Grenzschichttheorie und die Prandtlsche Grenzschicht.
- [57] C. A. Mack, *Field Guide to Optical Lithography*. SPIE Press, 2006.
- [58] M. Born and E. Wolf, *Principles of Optics*. Cambridge University Press, 1999.
- [59] U. Mescheder, *Mikrosystemtechnik: Konzepte und Anwendungen*. Wiesbaden, Germany: Vieweg+Teubner Verlag, 2. auflage ed., 2004. Behandelt unter anderem die verschiedenen Belichtungsprozesse in der Lithographie für die Mikrosystemtechnik und deren Anwendungen.
- [60] A. Henning, A. Marz, and J. G. Korvink, “Microsystem technology: Advanced design and fabrication,” *Microsystem Technologies*, vol. 8, no. 3, pp. 142–146, 2002. Erörtert die Rolle reaktiver Ionen und ihre Anwendungen im DRIE-Verfahren.
- [61] Q. Li, S. Wang, and J. Wu, “The development of deep reactive ion etching process and its applications in mems fabrication,” *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 24, no. 3, p. 035017, 2014. Diskutiert die DRIE-Technologie und deren Bedeutung für die präzise Bearbeitung von MEMS.

- [62] G. Gerlach and W. Dötsel, Einführung in die Mikrosystemtechnik. Hanser, 2006. Konzepte der Mikrosystemtechnik.
- [63] Wikipedia contributors, “Aspektverhältnis (strukturierung).” [https://de.wikipedia.org/wiki/Aspektverh%C3%A4ltnis\\_\(Strukturierung\)](https://de.wikipedia.org/wiki/Aspektverh%C3%A4ltnis_(Strukturierung)), 2024. Accessed: 2024-10-31.
- [64] J. A. Rogers and H. H. Lee, Micro- and Nanopatterning Polymers. ACS Publications, 2008. Erweiterte Methoden der Mikromusterung in der Lithographie.
- [65] M. Swatchuk, “Water quality standards,” Journal of Water and Health, vol. 6, no. 3, pp. 207–215, 2008.
- [66] R. C. Weast, Handbook of Chemistry and Physics. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 85th ed., 2004. Contains comprehensive data on chemical and physical properties, widely used in scientific research and industrial applications.
- [67] N. C. Company, ed., Handbook of Industrial Water Treatment. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 2007. Detailed guide on water treatment processes and technologies, authored by experts from the Nalco Chemical Company.
- [68] R. Peeters, Advanced Photolithography Techniques. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 1st ed., 1994. Covers innovations in photolithography processes, including light sources, resists, and development techniques for microfabrication.
- [69] B. J. Lin, “Phase-shifting masks for optical lithography,” Microlithography World, vol. 1, no. 1, pp. 10–15, 1992.
- [70] M. D. Levenson, N. S. Viswanathan, and R. A. Simpson, “Improving resolution in photolithography with a phase-shifting mask,” IEEE Transactions on Electron Devices, vol. 29, no. 12, pp. 1828–1836, 1982.
- [71] H. Lorenz, M. Despont, N. Fahrni, N. LaBianca, P. Renaud, and P. Vettiger, “Su-8: a low-cost negative resist for mems,” Journal of Micromechanics and Microengineering, vol. 7, no. 3, pp. 121–124, 1997.
- [72] K. F. Jensen, Lithography Process Development and Characterization Using SU-8. MIT Press, 2002.
- [73] A. D. Campo and C. Greiner, “Su-8: a photoresist for high-aspect-ratio and 3d submicron lithography,” Journal of Micromechanics and Microengineering, vol. 17, no. 6, pp. R81–R95, 2007.
- [74] K. A. Materials, “Su-8 2000 Photoresist data sheet,” 2020.
- [75] H. I. Smith and M. L. Schattenburg, “Nanostructure fabrication: lithography for the next generation,” Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures, vol. 15, no. 6, pp. 2897–2905, 1997. Diskutiert lithografische Verfahren zur Strukturierung, einschließlich Lift-Off-Techniken.
- [76] W. Kern and D. A. Puotinen, “Cleaning solutions based on hydrogen peroxide for use in silicon semiconductor technology,” Journal of the Electrochemical Society, vol. 137, no. 6, pp. 1887–1892, 1990. Diskutiert das Lift-Off-Verfahren und die Rolle spezieller Lösungsmittel in der Entfernung von Photoresist.
- [77] W. Kern, “The evolution of silicon wafer cleaning technology,” Journal of the Electrochemical Society, vol. 137, no. 6, pp. 1887–1892, 1990. Behandelt die Rolle von Masken in Ätzprozessen und die Eigenschaften von Photoresist-Masken zur Erzielung präziser Ätzprofile.
- [78] S. M. Sze, “High-speed vlsi process technology,” Proceedings of the IEEE, vol. 76, no. 11, pp. 1374–1385, 1988. Erörtert die verschiedenen Materialien für Ätzmasken und ihre Widerstandsfähigkeit gegen Ätzmittel in der VLSI-Technologie.
- [79] P. B. G. James D. Plummer, Michael D. Deal, Silicon VLSI Technology: Fundamentals, Practice, and Modeling. Prentice Hall, 2000. Grundlagenbuch über die Verwendung und Eigenschaften von Ätzmasken, einschließlich ihrer Rolle in der Definition von Ätzprofilen.

- [80] H. Seidel, L. Csepregi, A. Heuberger, and H. Baumgärtel, “Anisotropic etching of crystalline silicon in alkaline solutions,” *Journal of the Electrochemical Society*, vol. 137, no. 11, pp. 3612–3626, 1990. Erörtert das anisotrope Ätzen von Silizium in KOH und die Rolle der 111-Kristallebenen bei der Formgebung.
- [81] K. R. Williams, R. S. Muller, and R. T. Howe, *Microsystems Design*. Springer, 2003. Umfassende Darstellung von Ätzverfahren und der Anwendung von KOH-Ätzen zur Herstellung präziser Geometrien in der Mikrosystemtechnik.
- [82] X. Li and C. H. Ahn, “Anisotropic etching of silicon in koh for microsensor applications,” *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 64, no. 1, pp. 95–103, 1997. Behandelt die Anwendung des KOH-Ätzens in der Mikrosystemtechnik, insbesondere die Bildung von Strukturen mit präzisen Kanten und Winkeln.
- [83] N. W. Ashcroft and N. D. Mermin, *Solid State Physics*. Holt, Rinehart and Winston, 1976. Einführung in die Struktur von Kristallen, inklusive der Definition und Bedeutung der Millerschen Indizes in kubischen Gittern.
- [84] W. H. Miller, “A treatise on crystallography,” *Cambridge University Press*, 1839. Originalquelle zur Definition der Millerschen Indizes für Kristallebenen.
- [85] D. Hull and D. J. Bacon, *Introduction to Dislocations*. Butterworth-Heinemann, 4th ed., 1999. Behandelt Kristallstrukturen und die Bedeutung von Millerschen Indizes für das Verständnis von Defekten in Festkörpern.
- [86] C. Hammond, *The Basics of Crystallography and Diffraction*. Oxford University Press, 3rd ed., 2009. Grundlagen der Kristallographie, inklusive der Verwendung und Notation der Millerschen Indizes.