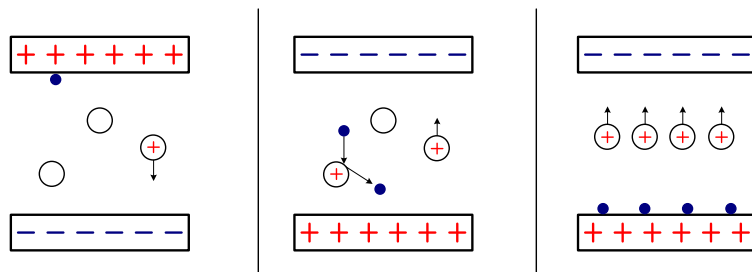


# Halbleitertechnologie

von A bis Z



## Abscheidung

[www.halbleiter.org](http://www.halbleiter.org)



# Inhaltsverzeichnis

|  |           |
|--|-----------|
| <b>Abbildungsverzeichnis</b>                             | <b>II</b> |
| <b>1 Abscheidung</b>                                     | <b>1</b>  |
| 1.1 Plasma, der 4. Aggregatzustand . . . . .             | 1         |
| 1.1.1 Plasmazustand . . . . .                            | 1         |
| 1.1.2 Plasmaerzeugung . . . . .                          | 2         |
| 1.2 CVD-Verfahren . . . . .                              | 3         |
| 1.2.1 Siliciumgasphasenepitaxie . . . . .                | 3         |
| 1.2.2 CVD-Verfahren: Chemical Vapor Deposition . . . . . | 5         |
| 1.2.3 APCVD: Atmospheric Pressure CVD . . . . .          | 6         |
| 1.2.4 LPCVD: Low Pressure CVD . . . . .                  | 7         |
| 1.2.5 PECVD: Plasma Enhanced CVD . . . . .               | 8         |
| 1.2.6 ALD: Atomic Layer Deposition . . . . .             | 9         |
| 1.3 PVD-Verfahren . . . . .                              | 11        |
| 1.3.1 MBE: Molekularstrahlepitaxie . . . . .             | 11        |
| 1.3.2 Aufdampfen . . . . .                               | 12        |
| 1.3.3 Sputtern: Kathodenzerstäubung . . . . .            | 13        |

## Abbildungsverzeichnis

|      |   |    |
|------|---|----|
| 1.1  | Prinzip der Plasmaerzeugung . . . . .                                   | 3  |
| 1.2  | Darstellung eines Barrelreaktors zur Epitaxieabscheidung . . . . .      | 5  |
| 1.3  | Darstellung eines Horizontalreaktors zur APCVD-Abscheidung . . . . .    | 7  |
| 1.4  | Darstellung einer LPCVD-Abscheidungsanlage für TEOS-Schichten . . . . . | 8  |
| 1.5  | Darstellung einer PECVD-Anlage und einer Horde mit Wafern . . . . .     | 9  |
| 1.6  | Einlass von TMA in die Prozesskammer . . . . .                          | 10 |
| 1.7  | Anlagerung von TMA an der Waferoberfläche . . . . .                     | 10 |
| 1.8  | Einlass von Wasserdampf in die Prozesskammer . . . . .                  | 11 |
| 1.9  | Abgesättigte Oberfläche vor dem nächsten Zyklus . . . . .               | 11 |
| 1.10 | Schematische Darstellung einer MBE-Anlage . . . . .                     | 12 |
| 1.11 | Schematische Darstellung einer Aufdampfanlage . . . . .                 | 13 |
| 1.12 | Schematische Darstellung einer Sputteranlage . . . . .                  | 15 |

# 1 Abscheidung

## 1.1 Plasma, der 4. Aggregatzustand

### 1.1.1 Plasmazustand

In vielen Prozessen der Halbleiterherstellung wird ein Plasma eingesetzt, sei es beim Sputtern, in Abscheideprozessen oder beim Trockenätzen. Ein wichtiger Punkt dabei ist, dass das Plasma nicht erhitzt ist. So können auch Wafer, die schon eine Metallisierungsschicht tragen, in Plasmaprozessen bearbeitet werden.

Plasma wird auch als der vierte Aggregatzustand bezeichnet. Ein Aggregatzustand ist ein qualitativer Zustand von Stoffen, der von der Temperatur und vom Druck abhängt. Den drei Aggregatzuständen fest, flüssig und gasförmig begegnet man auch im täglichen Leben. Ist die Temperatur niedrig, so ist jedes Atom in einem Stoff fest an einem Punkt angeordnet. Anziehungskräfte verhindern, dass sie sich bewegen. Am absoluten Nullpunkt (-273,15 °C) gehen Stoffe auch keine Reaktion ein. Bei zunehmender Temperatur fangen die Teilchen an zu schwingen, und die Bindungen der Atome werden instabiler. Ist der Schmelzpunkt erreicht, geht ein Stoff vom ersten in den zweiten Aggregatzustand über: Eis (fest) geht über in Wasser (flüssig).

Die Anziehungskräfte in flüssigen Stoffen sind noch vorhanden, jedoch können sich die Teilchen verschieben und haben keine festen Plätze mehr wie im festen Zustand, die Teilchen passen sich beispielsweise einer vorgegebenen Form an. Wird die Temperatur noch weiter erhöht, brechen die Bindungen komplett auf, die Teilchen bewegen sich unabhängig voneinander. Am Siedepunkt geht ein Stoff vom zweiten in den dritten Aggregatzustand über: Wasser (flüssig) geht über in Wasserdampf (gasförmig).

Während das Volumen bei festen und flüssigen Stoffen konstant ist, nehmen gasförmige Stoffe den vorhandenen Platz vollständig ein, die Teilchen verteilen sich gleichmäßig im gesamten Raum.

Jeder Stoff hat einen ganz bestimmten Schmelz- und Siedepunkt. Silicium schmilzt bei 1414 °C und geht bei 2900 °C in den gasförmigen Zustand über. Führt man einem Stoff noch mehr Energie zu werden durch Zusammenstöße der Teilchen untereinander Elektronen aus der äußersten Elektronenschale herausgeschlagen. Es befinden sich nun freie Elektronen und positiv geladene Ionen im Raum: der Plasmazustand ist erreicht.

### 1.1.2 Plasmaerzeugung

Ein Plasma in der Halbleitertechnologie wird meist durch Hochfrequenzspannung erzeugt, als Gas dient z.B. Argon. Das Gas befindet sich in einem Hochfrequenzfeld zwischen zwei unterschiedlich geladenen Platten (Elektroden) und wird hier ionisiert. Dazu sind Elektronen notwendig, die aus den Argonatomen weitere Elektronen heraus schlagen. Diese ersten Elektronen können auf unterschiedliche Weise erzeugt werden:

- Elektronen werden von einer Glühkathode emittiert
- Durch sehr hohe Spannung werden Elektronen aus der negativen Elektrode herausgezogen
- In jedem Gas befinden sich durch Zusammenstöße der Teilchen kurzzeitig freie Elektronen

Da die Elektronen sehr viel leichter als die Ionen sind, werden sie sofort von der positiv geladenen Elektrode angezogen; die schweren Ionen bewegen sich langsam zur negativen Elektrode. Bevor sie diese jedoch erreichen werden die Elektroden umgepolt, die Elektronen werden zur anderen Elektrode beschleunigt und schlagen auf ihrer Flugbahn bei Zusammenstößen weitere Elektronen aus den Atomen heraus. Typische Frequenzen bei der Plasmaerzeugung sind 13,56 Megahertz und 2,45 Gigahertz, die Spannung an den Elektroden wird also 13,56 Millionen bzw. 2,45 Milliarden mal pro Sekunde umgepolt.

Die Elektronen befinden sich vornehmlich auf den Elektroden, während dazwischen die positiv geladenen Ionen, das Plasma, hin und her schwingen, da sie dem schnellen Spannungswechsel nicht folgen können.

Die Plasmaerzeugung findet unter Vakuum statt, das erzeugte Plasma ist dabei nicht erhitzt, was bei vielen Prozessen wichtig ist. Je nach Gas und Anlage in der das Plasma erzeugt wird, kann es in der Abscheidung, beim Sputtern, zum Ätzen oder auch

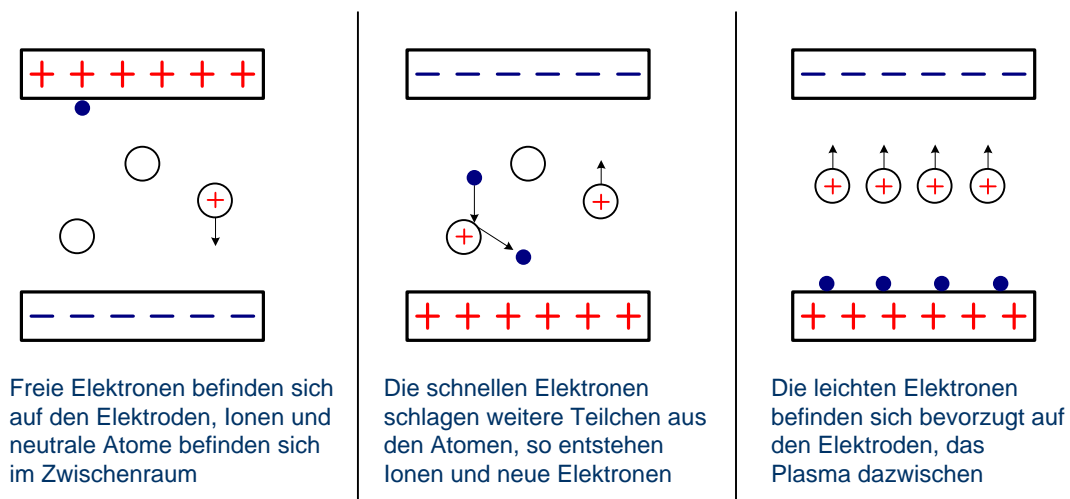


Abb. 1.1: Prinzip der Plasmaerzeugung

bei der Ionenimplantation verwendet werden. Durch die schnellen Schwingungen der positiven Ionen im Hochfrequenzfeld sind diese sehr energiereich. Es befinden sich dabei nicht nur positive Ionen und freie Elektronen im Plasma, da durch Zusammenstöße auch andere Teilchen erzeugt werden; der Zustand des Plasmas ändert sich laufend. Elektronen werden von den Ionen teilweise wieder eingefangen und erneut herausgeschlagen, diese zusätzlichen Teilchen spielen jedoch bei der weiteren Verwendung des Plasmas keine Rolle. Der Ionisierungsgrad beträgt je nach Teilchendichte im Plasma ( $10^8 - 10^{12}$  Teilchen pro  $cm^3$ ) 0,001 – 10 %, die Mehrzahl der Teilchen ist also ungeladen.

## 1.2 CVD-Verfahren

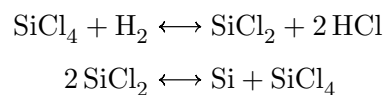
### 1.2.1 Siliciumgasphasenepitaxie

Epitaxie bedeutet „obenauf“ oder „zugeordnet“, und stellt einen Prozess dar, bei dem eine Schicht auf einer anderen Schicht erzeugt wird und deren Kristallstruktur übernimmt. Ist die abgeschiedene Schicht aus dem gleichen Material wie die Unterlage spricht man von Homoepitaxie, bei zwei unterschiedlichen Materialien von Heteroepitaxie. Der bedeutendste Fall bei der Homoepitaxie ist die Abscheidung von Silicium auf Silicium, bei der Heteroepitaxie wird meist eine Siliciumschicht auf einem Isolator wie z.B. Saphir erzeugt (Silicon On Insulator: SOI).

**Die Homoepitaxie:**

Je nach Prozess können die Wafer bereits vom Hersteller mit einer Epitaxieschicht angeliefert werden (z.B. bei CMOS), oder der Chiphersteller muss dies selbst durchführen (z.B. in der Bipolartechnik).

Als Gase zur Erzeugung der Schicht benutzt man reinen Wasserstoff in Verbindung mit Silan ( $\text{SiH}_4$ ), Dichlorsilan ( $\text{SiH}_2\text{Cl}_2$ ) oder Siliciumtetrachlorid ( $\text{SiCl}_4$ ). Bei ca. 1000 °C spalten die Gase das Silicium ab, das sich auf der Waferoberfläche absetzt. Das Silicium übernimmt die Struktur des Substrats und wächst dabei, aus energetischen Gründen, Ebene für Ebene nacheinander auf. Damit das Silicium nicht polykristallin aufwächst, muss immer ein Mangel an Siliciumatomen vorherrschen, d.h. es steht immer etwas weniger Silicium zur Verfügung, als aufwachsen könnte. Beim Siliciumtetrachlorid verläuft die Reaktion in zwei Schritten:



Damit das Silicium auf dem Substrat die Struktur des Kristalls übernehmen kann, muss die Oberfläche absolut rein sein, dabei macht man sich die Gleichgewichtsreaktion zu Nutze. Beide Reaktionen können auch in die andere Richtung verlaufen, je nachdem wie das Verhältnis der eingesetzten Gase ist. Befindet sich nur wenig Wasserstoff in der Atmosphäre wird, wie beim Trichlorsilanprozess zur Reinigung des Siliciums, auf Grund der hohen Chlorkonzentration Silicium von der Waferoberfläche abgetragen. Erst mit zunehmender Konzentration von Wasserstoff wird ein Wachstum erzielt.

Die Aufwachsrate beträgt bei  $\text{SiCl}_4$  ca. 1 – 2  $\mu\text{m}$  pro Minute. Da das einkristalline Silicium nur auf der gereinigten Oberfläche aufwächst, kann man mit Oxid bestimmte Bereiche maskieren, auf denen dann polykristallines Silicium aufwächst. Dieses wird jedoch im Vergleich zu einkristallinem Silicium sehr leicht durch die rückwärts ablaufende Reaktion abgeätzt. Werden den Prozessgasen noch Diboran ( $\text{B}_2\text{H}_6$ ) oder Phosphin ( $\text{PH}_3$ ) hinzugefügt, kann man dotierte Schichten erzeugen, da sich die Dotiergase bei den hohen Temperaturen zersetzen und die Dotierstoffe im Kristallgitter eingebaut werden.

Der Prozess zur Herstellung von Homoepitaxieschichten wird im Vakuum durchge-



führt. Dabei wird die Prozesskammer zunächst auf 1200 °C aufgeheizt, damit sich das natürliche Oxid, das sich immer auf der Siliciumoberfläche bildet, verflüchtigt. Wie oben erwähnt, kommt es bei zu geringer Wasserstoffkonzentration zu einer Rückätzung der Wafer, das macht man sich vor dem eigentlichen Prozess zu Nutze, indem man auf diese Weise die Oberfläche der Wafer reinigt. Durch Veränderung der Gaskonzentrationen findet dann die Abscheidung in einer Epitaxieanlage statt.

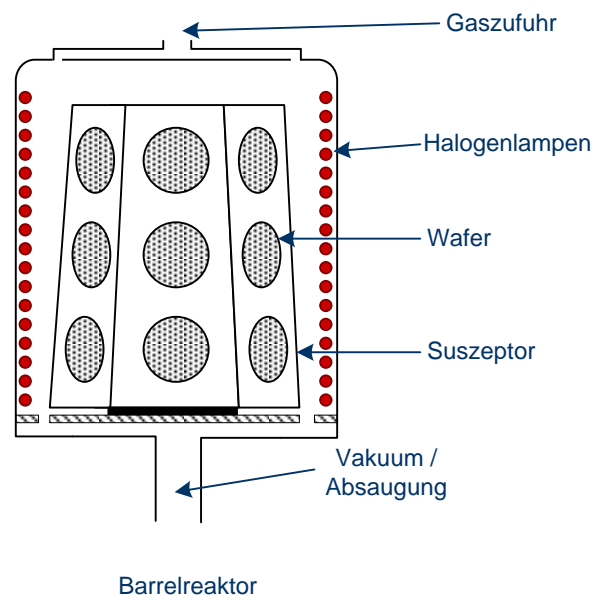


Abb. 1.2: Darstellung eines Barrelreaktors zur Epitaxieabscheidung

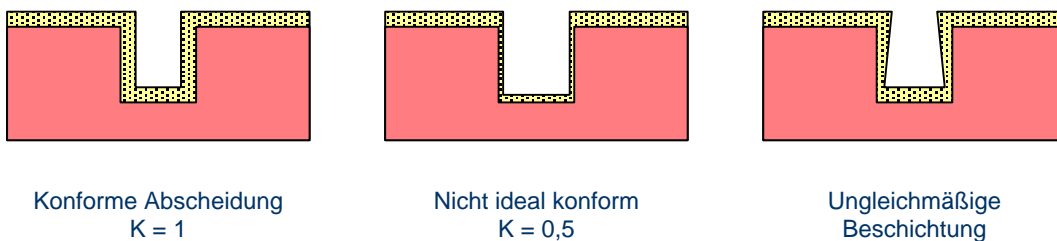
Durch die hohen Temperaturen kommt es jedoch zu einer Diffusion der Dotierstoffe im Substrat, bzw. zu einer Verunreinigung durch Dotierstoffe, die sich bei vorherigen Prozessen an den Reaktorwänden abgelagert haben. Bei der Verwendung von  $\text{SiH}_2\text{Cl}_2$  oder  $\text{SiH}_4$  sind solch hohe Temperaturen nicht nötig, weshalb man sich eher auf diese Gase beschränkt. Damit jedoch eine Scheibenreinigung durch Rückätzung stattfinden kann muss man zusätzlich als Gas  $\text{HCl}$  zugeben. Der Nachteil dieser Silane ist jedoch, dass sich bereits in der Atmosphäre, vor der Abscheidung auf dem Wafer, Keime bilden. Dadurch ist die erzielte Qualität der Schicht nicht so hoch.

### 1.2.2 CVD-Verfahren: Chemical Vapor Deposition

Oftmals werden in der Halbleitertechnologie Schichten benötigt, die nicht aus dem Siliciumsubstrat erzeugt werden können. Bei Siliciumnitrid und Siliciumoxinitrid muss

die Schicht z.B. durch thermische Zersetzung von Gasen erzeugt werden, die alle benötigten Materialien, wie Silicium, enthalten. Darauf basiert die Chemische Dampfab-scheidung, kurz CVD (engl.: Chemical Vapor Deposition). Der Wafer dient dabei nur als Grundfläche und reagiert nicht mit den Gasen. Dabei wird das CVD-Verfahren je nach Druck und Temperatur in drei Verfahren unterteilt, deren Schichten sich durch Dichte und Kantenbedeckung unterscheiden. Ist das Schichtwachstum an vertikalen Kanten genau so hoch wie auf horizontalen Flächen ist die Abscheidung konform.

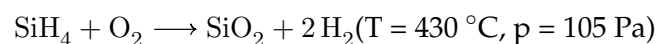
Die Konformität  $K$  ist der Quotient aus Schichtwachstum auf vertikalen Flächen  $R_v$  und dem Wachstum auf horizontalen Flächen  $R_h$ .  $K = R_v/R_h$ . Ist die Abscheidung nicht ideal konform, ist  $K$  deutlich kleiner als 1 (z.B.  $R_v/R_h = 1/2 \Rightarrow K = 0,5$ ). Hohe Konformitäten lassen sich nur durch hohe Prozesstemperaturen und niedrige Drücke erreichen.



### 1.2.3 APCVD: Atmospheric Pressure CVD

APCVD ist eine CVD-Abscheidung bei Normaldruck (atmosphärischer Druck) die zur Herstellung von dotierten und undotierten Oxiden eingesetzt wird. Das erzeugte Oxid hat eine geringe Dichte, die Kantenbedeckung ist auf Grund der niedrigen Temperatur mäßig. Durch verbessertes Equipment erlebt das APCVD-Verfahren aber eine Renaissance. Der hohe Waferdurchsatz ist ein großer Vorteil bei diesem CVD-Prozess.

Als Prozessgase dienen Silan  $\text{SiH}_4$  (stark verdünnt mit Stickstoff  $\text{N}_2$ ) und Sauerstoff  $\text{O}_2$  die bei ca.  $400^\circ\text{C}$  thermisch zersetzt werden und miteinander reagieren.



Durch Zugabe von Ozon  $\text{O}_3$  kann eine bessere Konformität erzielt werden, da es die

Beweglichkeit der sich anlagernden Teilchen erhöht. Das Oxid ist porös und elektrisch instabil und kann durch einen Hochtemperaturschritt verdichtet werden. Damit sich keine Kanten bilden die Probleme bei der Erzeugung weiterer Schichten machen könnten, wird für Schichten, die als Zwischenoxid dienen, so genanntes Phosphorglas (PSG) eingesetzt. Dazu wird den zwei Gasen  $\text{SiH}_4$  und  $\text{O}_2$  zusätzlich noch Phosphin  $\text{PH}_3$  zugesetzt, so dass das entstandene Oxid 4 – 8 % Phosphor enthält. Ein hoher Phosphorgehalt erhöht die Fließeigenschaften deutlich, es kann sich allerdings Phosphorsäure bilden, die Aluminium (Leiterbahnen) korrodieren lässt.

Da Temperschritte aber auch vorangegangene Prozesse (z. B. Dotierungen) beeinflussen können, wird zum Verfließen des PSG nur ein kurzzeitiges Tempern mit einer extrem starken Argonlampe (mehrere hundert Kilowatt,  $<10$  s,  $T = 1100$  °C) an Stelle von langen Ofenprozessen angewandt. Analog zum Phosphorsilicatglas, kann gleichzeitig auch Bor hinzugefügt werden (Borphosphorsilicatglas, BPSG, 4 % B und 4 % P).

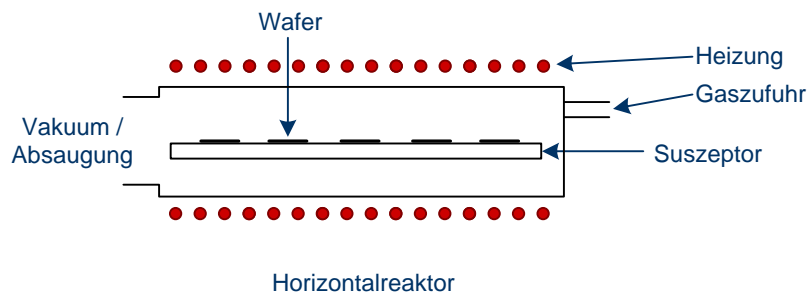


Abb. 1.3: Darstellung eines Horizontalreaktors zur APCVD-Abscheidung

#### 1.2.4 LPCVD: Low Pressure CVD

Beim LPCVD-Verfahren findet der Prozess unter Vakuumatmosphäre statt, bei dem sich dünne Schichten wie Siliciumnitrid  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , Siliciumoxinitrid  $\text{SiON}$ ,  $\text{SiO}_2$  und Wolfram W erzeugen lassen. LPCVD-Verfahren ermöglichen sehr gute Konformitäten von beinahe 1; Grund dafür ist der niedrige Druck von nur 10 – 100 Pa (normaler Luftdruck ca. 100.000 Pa), durch den die Teilchen keine Bewegung in einer Richtung erfahren, sondern sich selbst durch Zusammenstöße ausbreiten, somit werden die Kanten auf der Waferoberfläche von allen Gasteilchen gleichmäßig bedeckt. Die bis zu 900 °C hohe Prozesstemperatur trägt zur hohen Konformität bei. Im Gegensatz zum APCVD-Verfahren ist die Dichte und Stabilität sehr hoch.

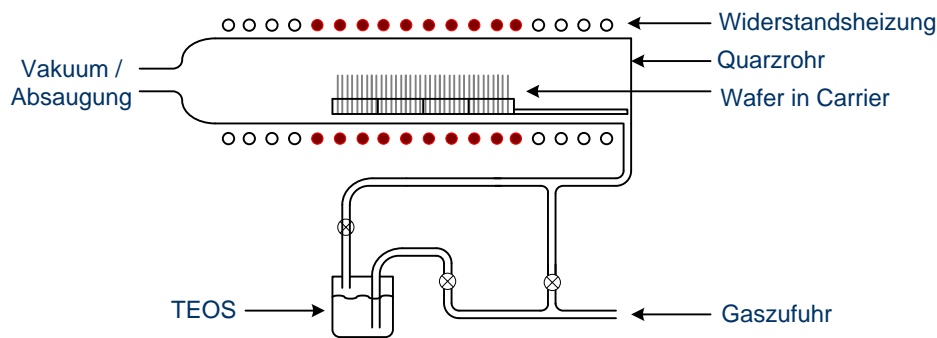


Abb. 1.4: Darstellung einer LPCVD-Abscheidungsanlage für TEOS-Schichten

Die Reaktionen für  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ,  $\text{SiON}$ ,  $\text{SiO}_2$  und Wolfram laufen nach den folgenden Reaktionsgleichungen ab:

- **$\text{Si}_3\text{N}_4$  (850 °C):**  $4 \text{NH}_3 + 3 \text{SiH}_2\text{Cl}_2 \longrightarrow \text{Si}_3\text{N}_4 + 6 \text{HCl} + 6 \text{H}_2$
- **$\text{SiON}$  (900 °C):**  $\text{NH}_3 + \text{SiH}_2\text{Cl}_2 + \text{N}_2\text{O} \longrightarrow \text{Si}_3\text{N}_4 + \text{Nebenprodukte}$
- **$\text{SiO}_2$  (700 °C):**  $\text{SiO}_4\text{C}_8\text{H}_{20} \longrightarrow \text{SiO}_2 + \text{Nebenprodukte}$
- **Wolfram (400 °C):**  $\text{WF}_6 + 3 \text{H} \longrightarrow 2 \text{W} + 6 \text{HF}$

Im Gegensatz zu den gasförmigen Ausgangsstoffen bei  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ,  $\text{SiON}$  und Wolfram, wird zur Erzeugung von  $\text{SiO}_2$  flüssiges Tetraethylorthosilicat (TEOS) verwendet; daneben gibt es noch weitere Flüssigquellen wie Ditertiabutylsilan (DTBS,  $\text{SiH}_2\text{C}_8\text{H}_{20}$ ) oder Tetramethylcyclotetrasiloxan ( $\text{Si}_4\text{O}_4\text{C}_4\text{H}_{16}$ ).

Eine Wolframschicht lässt sich nur auf Silicium erzeugen. Somit muss, wenn kein Silicium als Grundfläche zur Verfügung steht, Silan hinzugefügt werden.

### 1.2.5 PECVD: Plasma Enhanced CVD

Das Plasma unterstützte CVD-Verfahren findet bei 250 – 350 °C statt. Da die Temperatur zu niedrig ist um die Gase zu zersetzen, wird es mit Hilfe einer Hochfrequenzspannung in den Plasmazustand versetzt. Im Plasmazustand ist es sehr energiereich und scheidet sich dann auf der Scheibe ab. Besonders Leiterbahnen aus Aluminium können keinen hohen Temperaturen ausgesetzt werden (Schmelzpunkt von Aluminium ca. 500 °C) weshalb das PECVD-Verfahren vor allem hier zur Abscheidung von  $\text{SiO}_2$  und  $\text{Si}_3\text{N}_4$  genutzt wird. Anstelle des  $\text{SiH}_2\text{Cl}_2$  beim LPCVD-Verfahren wird Silan verwendet, da es sich bei den niedrigen Temperaturen leichter zersetzt. Die Konformität

ist nicht so ideal wie beim LPCVD-Verfahren (ca. 0,6 – 0,8), jedoch ist die Abscheiderate mit 500 nm pro Minute deutlich höher.

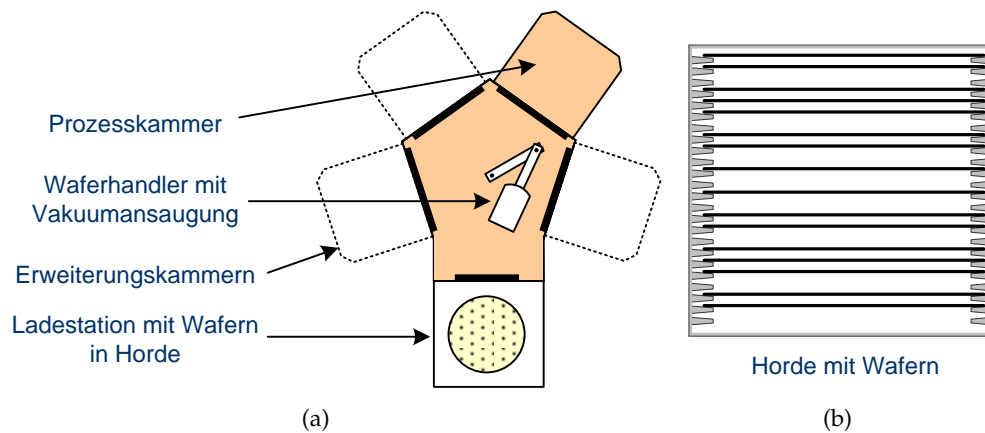


Abb. 1.5: (a) Darstellung einer PECVD-Abscheidungsanlage und (b) einer Horde mit Wafern.

### 1.2.6 ALD: Atomic Layer Deposition

Die Atomlagenabscheidung (Atomic Layer Deposition, kurz ALD) ist ein CVD-Abscheidungsverfahren zur Erzeugung dünner Schichten. Dabei handelt es sich um ein zyklisches Verfahren, bei dem mehrere Gase abwechselnd in die Prozesskammer eingeleitet werden.

Jedes Gas reagiert dabei in der Art, dass die jeweiligen Oberflächenatome abgesättigt werden, die Reaktion also selbstbegrenzend abläuft. Das jeweils andere Gas kann dann an dieser Oberfläche weiterreagieren. Alternierend zu den reaktiven Gasen wird die Kammer mit Inertgasen, wie Argon oder Stickstoff gespült. Ein einfacher ALD-Zyklus, der meist nur wenige Sekunden beträgt, kann daher wie folgt ablaufen:

1. selbst begrenzende Reaktion mit dem ersten Gas, welches die Oberflächenatome absättigt
2. Spülschritt mit einem Inertgas
3. selbst begrenzende Reaktion mit einem zweiten Gas, welches an der neuen Oberfläche reagiert
4. Spülschritt mit einem Inertgas

Ein konkretes Beispiel ist die Abscheidung einer Aluminiumoxidschicht  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , bei der als reaktive Gase Trimethylaluminium  $\text{C}_3\text{H}_9\text{Al}$  (TMA) und Wasser  $\text{H}_2\text{O}$  verwendet werden.

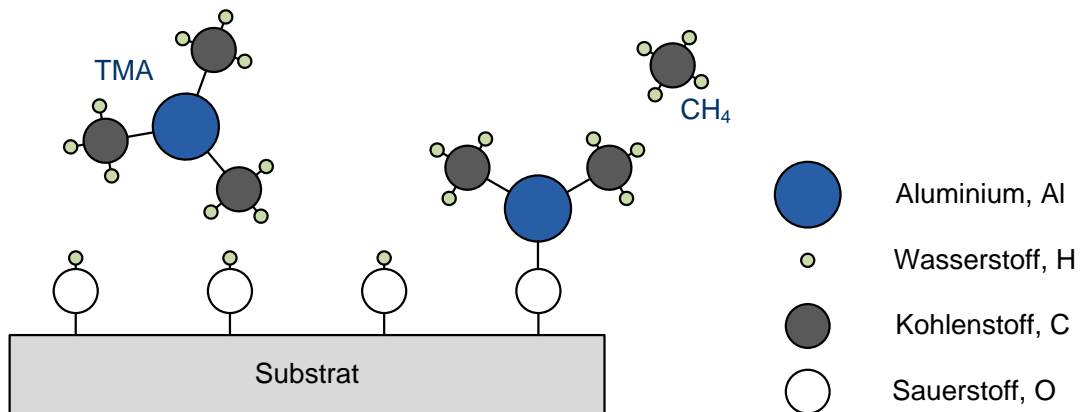


Abb. 1.6: Einlass von TMA in die Prozesskammer

Dabei entfernt eine Methylgruppe  $\text{CH}_3$  der Aluminiumverbindung im ersten Schritt oberflächennahe Wasserstoffatome unter Bildung von Methan  $\text{CH}_4$ . Die verbleibenden Moleküle werden an den nun ungesättigten Sauerstoffatomen gebunden.

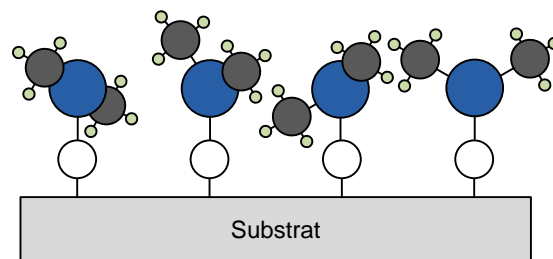


Abb. 1.7: Anlagerung von TMA an der Waferoberfläche

Sind diese Atome abgesättigt, kann keine weitere Anlagerung von TMA erfolgen.

Die Prozesskammer wird gespült und anschließend Wasserdampf in die Kammer eingeleitet. Durch je ein Wasserstoffatom der  $\text{H}_2\text{O}$ -Moleküle werden die  $\text{CH}_3$ -Gruppen der zuvor abgeschiedenen Schicht unter Bildung von Methan entfernt.

Zurück bleiben  $\text{OH}^-$ -Ionen, welche sich nun mit dem Aluminium verbinden, so dass wiederum oberflächennahe Wasserstoffatome zur Verfügung stehen, die mit TMA reagieren können.

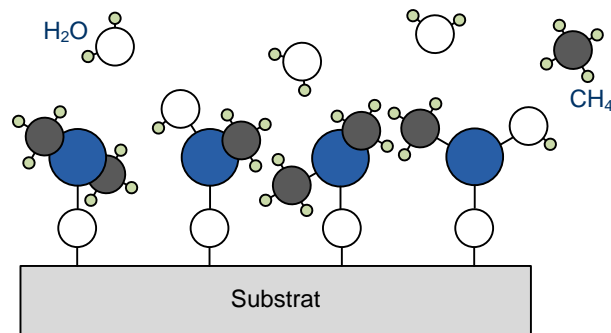


Abb. 1.8: Einlass von Wasserdampf in die Prozesskammer

Die Atomlagenabscheidung bietet wesentliche Vorteile gegenüber anderen Abscheidungsverfahren, weshalb sie ein wichtiger Prozess zur Aufbringung verschiedener Schichten ist. Dabei können auch 3-dimensionale Strukturen (z. B. Gräben) sehr homogen beschichtet werden. Möglich sind sowohl isolierende als auch leitende Filme auf verschiedenen Substraten (Halbleiter, Polymere u. a.). Durch die Anzahl der Zyklen ist eine exakte Schichtdicke leicht zu realisieren. Da die reaktiven Gase nicht gleichzeitig in die Kammer geleitet werden, kann es nicht schon vor der eigentlichen Abscheidung zu Keimbildung kommen. Die Qualität der Schicht ist damit sehr hoch.

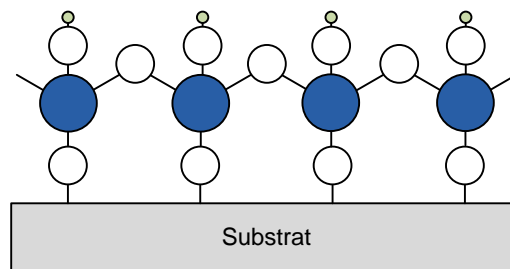


Abb. 1.9: Abgesättigte Oberfläche vor dem nächsten Zyklus

## 1.3 PVD-Verfahren

### 1.3.1 MBE: Molekularstrahlepitaxie

Das Aufwuchsverhalten der Molekularstrahlepitaxie (Molecular beam epitaxy, MBE) entspricht dem der Siliciumgasphasenepitaxie. Jedoch wird in diesem Fall das Silicium auf eine andere Weise auf dem Wafer abgeschieden.

Der Prozess findet unter Ultrahochvakuum statt (UHV,  $10^{-8}$  Pa), der zu prozessierende Wafer wird mit der Oberseite nach unten an der Decke der Prozesskammer gehalten, und auf ca. 600 – 800 °C erhitzt damit sich das natürliche Oxid verflüchtigt.

Silicium wird dabei mit einem Elektronenstrahl erhitzt in einem Tiegel verdampft, und scheidet sich dann auf dem Wafer ab. Dotierstoffe können in einer Effusorquelle verdampft werden und gelangen so mit dem Siliciumdampf auf den Wafer. Durch gezielte Temperaturregelung und mittels Blenden kann der Teilchenstrahl genau dosiert werden. Bei diesem Verfahren ist es außerdem möglich Schichten aus verschiedenen Stoffen übereinander wachsen zu lassen, die sonst auf Grund der unterschiedlichen Atomgrößen nicht möglich wären. So lassen sich Silicium und Germanium als Schicht erzeugen, die bei Hochfrequenzanwendungen in der Bipolartechnik von Nöten ist.

Jedoch ist der Aufwand bei dieser Epitaxie zur Erzeugung des UHV sehr hoch. Um diesen Druck, der weniger als dem billionsten Teil des normalen Luftdrucks entspricht, zu erreichen, müssen mehrere Pumpen kombiniert werden und die Prozesskammer lange abgepumpt werden. Dabei kann nur ein Wafer auf einmal prozessiert werden, das Wachstum beträgt nur ca.  $1\mu\text{m}$  pro Stunde.

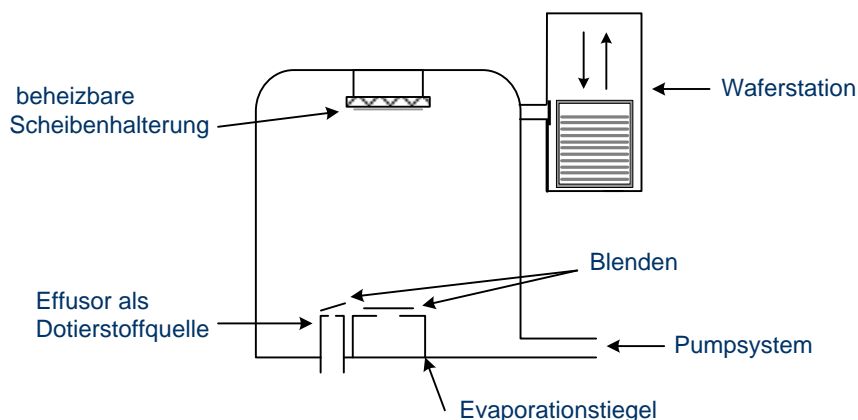


Abb. 1.10: Schematische Darstellung einer MBE-Anlage

### 1.3.2 Aufdampfen

Beim Aufdampfen können metallische Schichten, wie z.B. Aluminium, auf den Wafern erzeugt werden. Das Material befindet sich in einem Tiegel aus hochschmelzbarem Metall wie Tantal und wird dort erhitzt bis es in den gasförmigen Zustand übergeht. Der Metalldampf trifft senkrecht auf die Scheibe, so dass Kanten nicht gut bedeckt wer-



den, die entstandene Schicht ist polykristallin. Alternativ zum Schmelzen im Tiegel kann das Metall auch mit einem Elektronenstrahl verdampft werden. Mit dieser Elektronenstrahlmethode ist es möglich eine, im Vergleich zur thermischen Aufdampfung, sehr genaue Abscheiderate zu erzielen. Da die Kantenabdeckung nicht sehr gut ist, werden diese zwei Verfahren meist zur ganzflächigen Rückseitenbeschichtung für die spätere elektrische Kontaktierung verwendet.

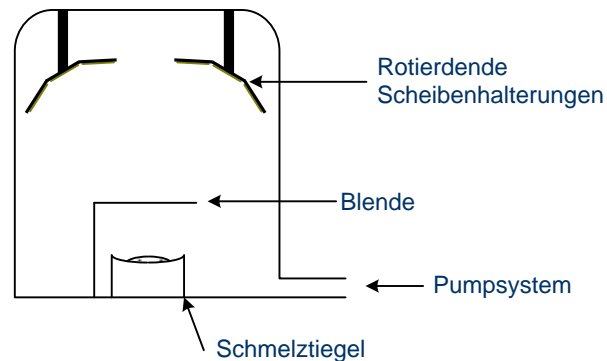
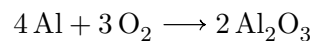
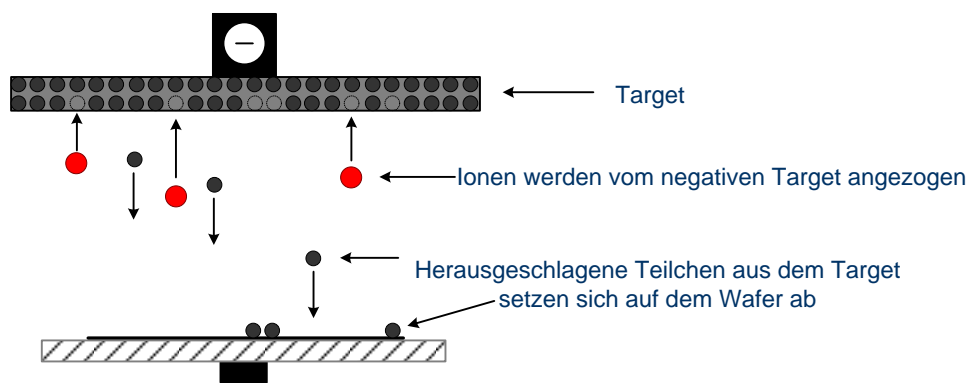


Abb. 1.11: Schematische Darstellung einer Aufdampfanlage

### 1.3.3 Sputtern: Kathodenzerstäubung

Bei der Kathodenzerstäubung werden Ionen auf ein Target beschleunigt und schlagen dort Atome oder Moleküle heraus, das Target besteht dabei aus dem Material der aufzubringenden Schicht. Die mittlere Weglänge dieser Teilchen ist wenige Millimeter lang, d.h. sie stoßen oft zusammen, dadurch werden auf der Scheibe auch vertikale Flächen gut bedeckt. Die abgeschiedenen Teilchen bilden eine poröse Schicht, die durch Temperung verdichtet werden kann. Die Kathodenzerstäubung lässt sich in das passive (inerte) und das reaktive Sputtern unterteilen.

Beim passiven Sputtern wird nur das Material des Targets auf den Scheiben abgeschieden, entsprechend dem Material des Targets lassen sich hochreine Schichten erzeugen, da ein genaues Mischungsverhältnis der Stoffe im Target möglich ist. Beim reaktiven Sputtern wird dem Gas in der Prozesskammer ein Reaktionsgas (z. B. Sauerstoff  $O_2$ ) hinzugefügt, dass sich mit dem zerstäubten Material des Targets verbindet und sich dann auf dem Wafer absetzt. Dadurch lassen sich aus einem Metalltarget (z.B. Aluminium Al) auch Isolierungsschichten herstellen:



Zur Erzeugung von metallischen Schichten wird das Gleichstrom-Sputtern (DC-Sputtern) verwendet. Dabei werden die Ionen mit bis zu 3 Kilovolt (kV) auf das Target beschleunigt und entladen sich dort. Da diese Ladungen immer abgeführt werden müssen, kann hier nur ein leitendes Material als Target dienen. Für isolierende Schichten muss das reaktive Sputtern eingesetzt werden. Will man eine isolierende Schicht direkt aus dem Target erzeugen verwendet man das Hochfrequenzsputtern (RF-Sputtern).

Beim RF-Sputtern liegt die Spannung an je einer Elektrode hinter dem Target (Kathode) und dem Wafer (Anode) an. Durch die hochfrequente Spannung werden die Elektronen bei der positiven Halbwelle am Target von diesem angezogen, wodurch sich das Target negativ auflädt. Durch dieses negative Target werden die Ionen angezogen und schlagen dort Teilchen heraus. Beim Magnetron-Sputtern befinden sich zusätzlich Magnete hinter dem Target, so dass Elektronen in Kreisbahnen abgelenkt werden und so häufiger Argonatome ionisieren können, was einen erheblichen Anstieg der Abscheiderate verursacht. Da die Anode mit der Prozesskammer verbunden ist, hat sie auf die Oberfläche bezogen im zeitlichen Mittel eine wesentlich geringere Potentialdifferenz gegenüber dem Plasma als die Kathode, weshalb die Ionen nur zum Target und nicht zum Wafer wandern.

Um die Kantenabdeckung zu erhöhen verwendet man das BIAS-Sputtern, bei dem am Substrat eine negative Spannung angelegt wird. Dadurch werden auch hier, wie am Target, Teilchen der erzeugten Schicht abgetragen und die Oberfläche eingeebnet. Jedoch muss darauf geachtet werden, dass kein Abtrag des Substrats erfolgt. Dieses so

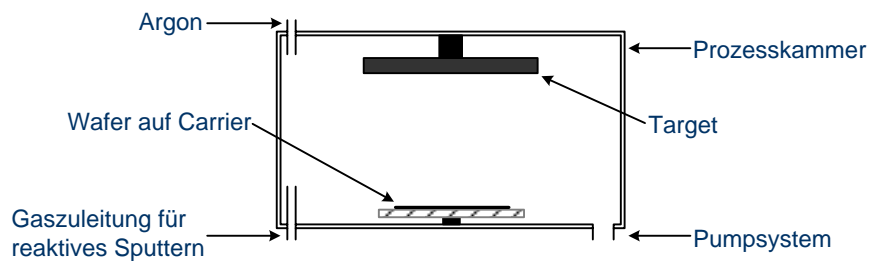


Abb. 1.12: Schematische Darstellung einer Sputteranlage

genannte Rückätzen ist auch das Prinzip der meisten Plasmaätzenanlagen.

Das Sputtern eignet sich somit zur Erzeugung von metallischen Schichten mit guter Konformität und sehr guter Reproduzierbarkeit. Der Aufwand ist gering, der Unterdruck mit 5 Pa recht einfach zu erzeugen.

