

# **Halbleitertechnologie von A bis Z**

Abscheidung

|                                                |    |
|------------------------------------------------|----|
| <b>CVD-Verfahren</b> .....                     | 3  |
| <i><b>Silicium-Gasphasenepitaxie</b></i> ..... | 3  |
| <b>CVD-Verfahren</b> .....                     | 5  |
| <b>APCVD: Atmospheric Pressure CVD</b> .....   | 6  |
| <b>LPCVD: Low Pressure CVD</b> .....           | 7  |
| <b>PECVD: Plasma Enhanced CVD</b> .....        | 8  |
| <b>ALD: Atomic Layer deposition</b> .....      | 10 |
| <b>Spaltfüllung</b> .....                      | 13 |

# CVD-Verfahren

---

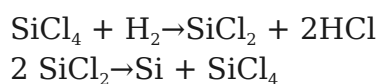
## Silicium-Gasphasenepitaxie

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 wächst ein anderes Material auf, etwa Silicium-Germanium auf Silicium oder Galliumnitrid auf Silicium und Saphir. Voraussetzung ist eine kristalline Unterlage: Auf einer amorphen Schicht wie Siliciumdioxid wächst nichts Einkristallines auf. Silicium-auf-Isolator-Scheiben (Silicon On Insulator, SOI) entstehen deshalb nicht durch Epitaxie, sondern indem zwei Scheiben verbunden und eine davon bis auf eine dünne Schicht abgetragen wird.

## Die Homoepitaxie

Je nach Prozess können die Wafer bereits vom Hersteller mit einer Epitaxieschicht geliefert werden (z.B. in der CMOS-Technik), 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

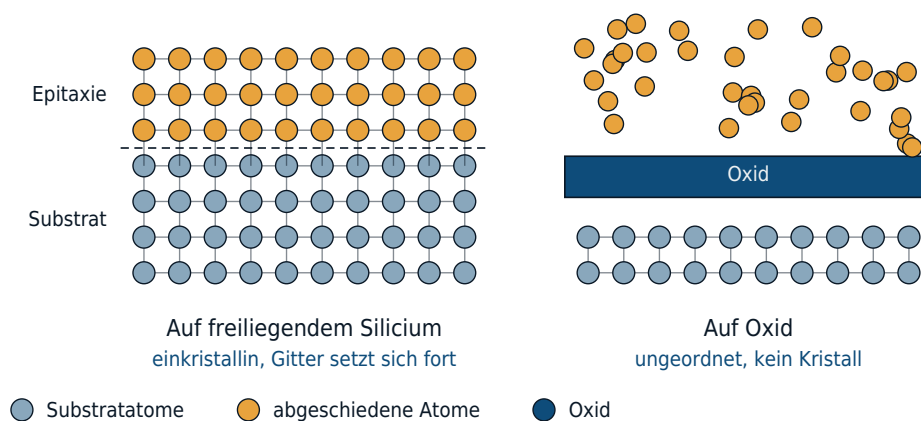
zunehmender Konzentration von Wasserstoff wird ein Wachstum erzielt.

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 durchgeführt. 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. Dies 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.

Epitaxie: die Schicht übernimmt die Kristallstruktur

Sie wächst Ebene für Ebene auf und setzt das Gitter der Unterlage fort



Genau darauf beruht die selektive Epitaxie: Bei passendem Chlorgehalt wird das ungeordnete Material laufend wieder abgetragen, das einkristalline bleibt stehen.

## Selektive Epitaxie und verspannte Schichten

Der oben beschriebene Umstand, dass einkristallines Silicium nur auf freiliegendem Silicium aufwächst und polykristallines Material durch die

rückwärts laufende Reaktion wieder abgetragen wird, ist heute kein Nebeneffekt mehr, sondern die Grundlage eines eigenen Verfahrens. Bei passend gewähltem Chlorgehalt wächst die Schicht ausschließlich in den geöffneten Fenstern und gar nicht auf Oxid oder Nitrid – man spricht von selektiver Epitaxie.

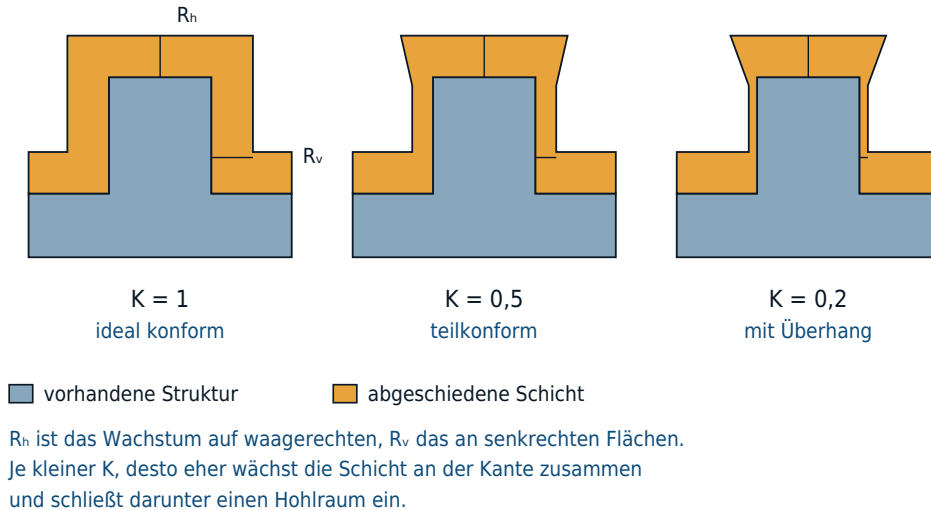
Ihre wichtigste Anwendung liegt nicht darin, Silicium zu ergänzen, sondern darin, es zu verspannen. Wird in die Source- und Draingebiete eines Transistors statt Silicium eine Silicium-Germanium-Legierung eingewachsen, so beansprucht diese wegen der größeren Germaniumatome mehr Platz, als das Gitter vorsieht. Sie drückt dadurch auf den dazwischenliegenden Kanal. In einem so gestauchten Gitter bewegen sich Löcher deutlich leichter, der Transistor schaltet schneller. Für den umgekehrten Fall – Zug auf den Kanal, günstig für Elektronen – wird Silicium-Kohlenstoff verwendet. Diese verspannten Schichten gehören seit Mitte der 2000er Jahre zum Standardaufbau eines jeden Hochleistungstransistors.

## CVD-Verfahren

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 Dampfabcheidung, 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 verschiedene 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. Eine Konformität von genau 1 erreicht nur die [Atomlagenabscheidung](#), weil dort nicht die Anlagerung, sondern eine sich selbst begrenzende Reaktion die Schichtdicke bestimmt.

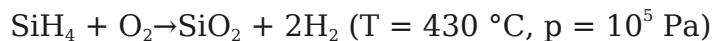
Konformität einer Abscheidung  
Verhältnis des Wachstums an senkrechten und waagerechten Flächen



## 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. Der große Vorteil ist der Durchsatz: Ohne Vakuum lassen sich die Scheiben durchlaufend behandeln, und die Abscheiderate ist hoch. Für dicke, unkritische Oxide ist das Verfahren deshalb weiterhin wirtschaftlich, für dünne oder konforme Schichten kommt es nicht in Frage.

Als Prozessgase dienen Silan  $\text{SiH}_4$  (stark verdünnt mit Stickstoff  $\text{N}_2$ ) und Sauerstoff  $\text{O}_2$  die bei ca. 400 °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.

Um die Bildung von Kanten, die Probleme bei der Abscheidung weiterer Schichten machen könnten zu verhindern, 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

erzeugte 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 vorangegangene Prozesse (z.B. Dotierungen) beeinflussen, wird zum Verfließen des PSG nur ein kurzzeitiges Tempern mit starken Argonlampen (mehrere hundert Kilowatt,  $<10$  s,  $T = 1100$  °C) an Stelle von langen Ofenprozessen angewandt.

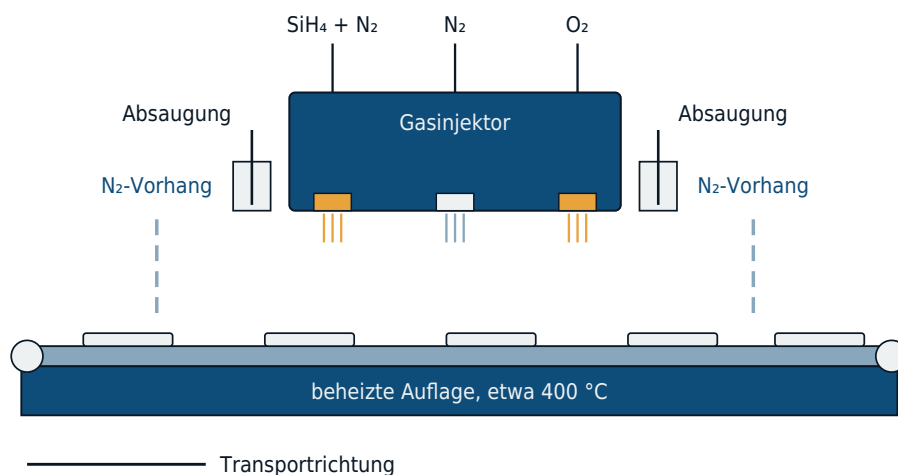
Analog zum Phosphorsilicatglas, kann gleichzeitig auch Bor hinzugefügt werden (Borphosphorsilicatglas, BPSG, 4 % B und 4 % P).

Der Zweck dieser dotierten Gläser war das Verfließen bei hoher Temperatur, mit dem Stufen eingeebnet wurden. Diese Aufgabe hat das **chemisch mechanische Polieren** übernommen, das ohne Temperaturbelastung auskommt und auch großräumig einebnet. Dotierte Gläser werden heute vor allem noch als Zwischenoxid unterhalb der ersten Metallebene eingesetzt, wo der Phosphor zusätzlich Alkaliionen bindet und sie vom Transistor fernhält.

## Darstellung eines Horizontalreaktors zur APCVD-Abscheidung

Horizontalreaktor für die APCVD

Die Scheiben laufen bei Normaldruck unter dem Gasinjektor hindurch



Bei Normaldruck ist keine Schleuse nötig: Die Scheiben laufen fortlaufend hindurch, was den hohen Durchsatz des Verfahrens ausmacht.

Silan und Sauerstoff werden getrennt zugeführt und erst über der Scheibe zusammengebracht, damit sie nicht schon im Injektor reagieren.

## 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  $\text{SiON}$ , Siliciumdioxid  $\text{SiO}_2$  und Wolfram  $\text{W}$  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.

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

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

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.

LPCVD-Anlage für TEOS-Schichten

TEOS ist bei Raumtemperatur flüssig und muss erst verdampft werden



Der niedrige Druck lässt die Gasteilchen weit fliegen und in jede Lücke gelangen. Deshalb dürfen die Scheiben dicht stehen, und die Kanten werden gleichmäßig bedeckt: Die Konformität liegt nahe bei 1.

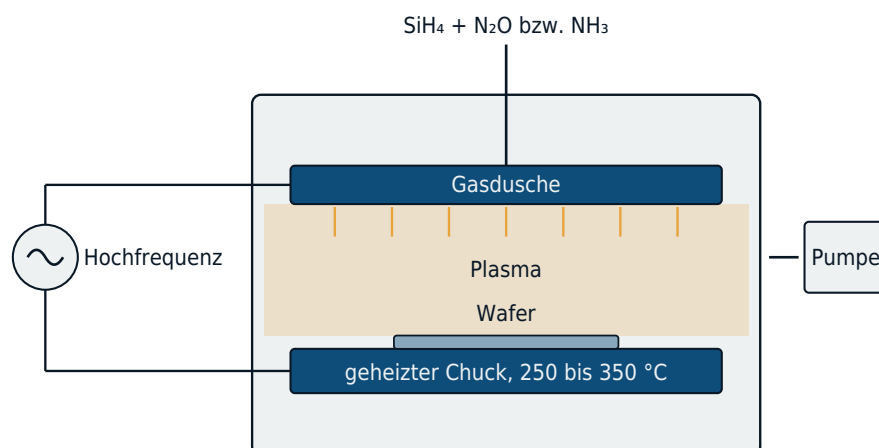
## PECVD: Plasma Enhanced CVD

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 (Aluminium schmilzt bei 660 °C, das thermische Budget fertiger Aluminiumleitbahnen endet jedoch bereits bei etwa 450 °C) weshalb das PECVD-Verfahren vor allem hier zur Abscheidung von  $\text{SiO}_2$  und  $\text{Si}_3\text{N}_4$  genutzt wird. Anstelle von Dichlorsilan  $\text{SiH}_2\text{Cl}_2$ , wie es beim LPCVD-Verfahren verwendet wird, kommt Silan  $\text{SiH}_4$  zum Einsatz, 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.

Aus dieser Kombination – niedrige Temperatur bei hoher Rate – folgt die heutige Bedeutung des Verfahrens. Alles, was nach der ersten Metallebene abgeschieden wird, entsteht per PECVD: die Zwischenoxide zwischen den Verdrahtungsebenen, die Nitridschichten, die als Ätzstopp und als Diffusionssperre gegen Kupfer dienen, die Hartmasken für die Strukturierung und die abschließende Passivierung des fertigen Chips. Auch die kohlenstoffhaltigen **Low-k-Dielektrika** werden auf diesem Weg erzeugt, indem dem Prozessgas eine siliciumorganische Verbindung zugesetzt wird.

### PECVD-Anlage

Das Plasma liefert die Energie, die sonst die Temperatur aufbringen müsste



Bei 250 bis 350 °C würden sich die Gase von allein nicht zersetzen.  
Deshalb lässt sich das Verfahren auch über fertigen Aluminiumleitbahnen einsetzen – dort, wo ein Ofenprozess längst zu heiß wäre.

Horde mit Wafern

Seitenansicht: die Scheiben liegen waagrecht übereinander



Die Horde bietet 25 Plätze; hier sind 15 davon belegt. Die Nut ist höher als die Scheibe dick und weitet sich zur Öffnung hin, damit sie leicht hineinrutscht.

## 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 bspw. 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

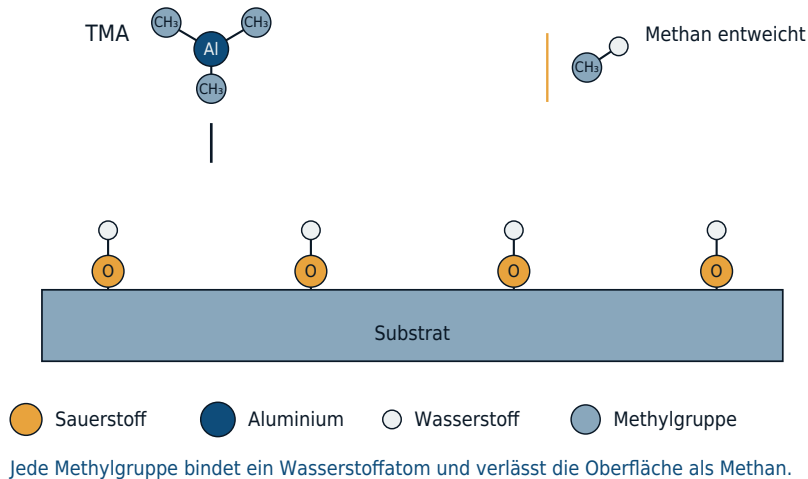
Ein konkretes Beispiel ist die Abscheidung einer Aluminiumoxidschicht  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , bei der als reaktive Gase Trimethylaluminium  $\text{C}_3\text{H}_9\text{Al}$  (TMA) und Wasser  $\text{H}_2\text{O}$

verwendet werden.

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

#### 1. Trimethylaluminium trifft auf die Oberfläche

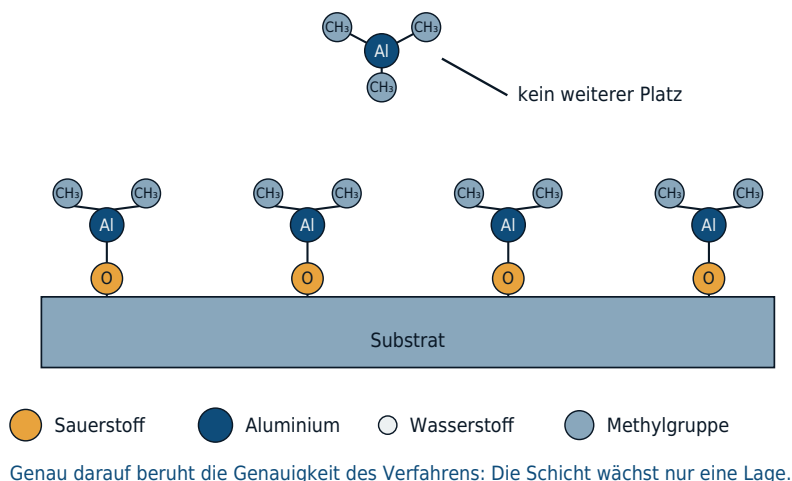
Die Methylgruppen nehmen den Wasserstoff der OH-Gruppen mit



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

#### 2. Die Oberfläche ist abgesättigt

Weiteres TMA findet keinen Platz mehr – die Reaktion begrenzt sich selbst

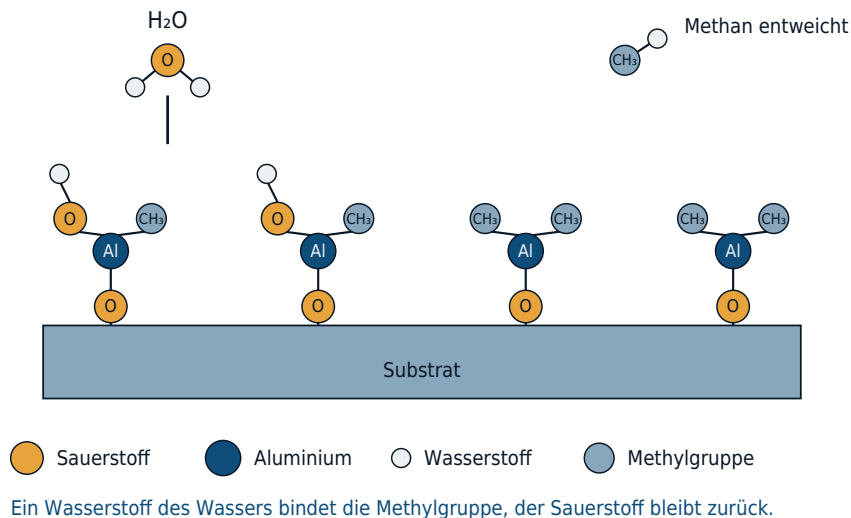


Die Prozesskammer wird gespült und anschließend Wasserdampf in die Kammer eingeleitet. Durch je ein Wasserstoffatom der  $\text{H}_2\text{O}$ -Moleküle werden die  $\text{CH}_3$ -

Gruppen der zuvor abgeschiedenen Schicht unter Bildung von Methan entfernt.

### 3. Nach dem Spülen folgt Wasserdampf

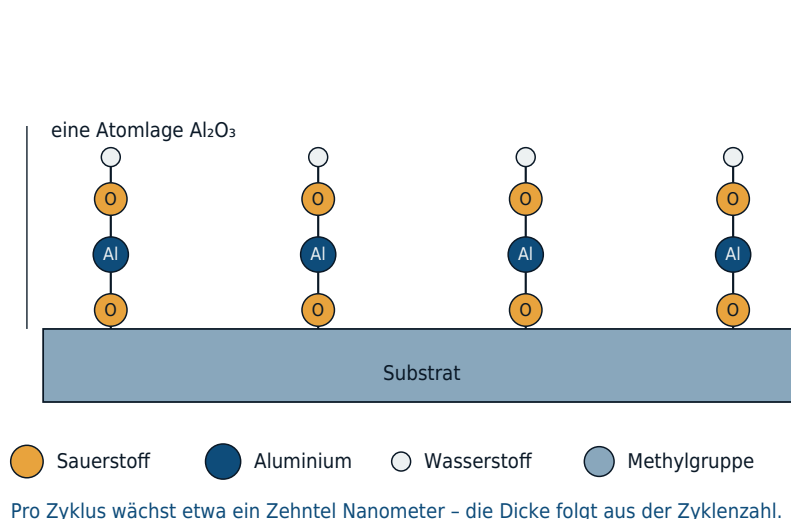
Das Wasser ersetzt die Methylgruppen, wieder entsteht Methan



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

### 4. Eine Lage Aluminiumoxid ist gewachsen

Die neuen OH-Gruppen sind der Ausgangspunkt des nächsten Zyklus



Die Atomlagenabscheidung bietet wesentliche Vorteile gegenüber anderen Abscheideverfahren, 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.

### **Wofür ALD heute eingesetzt wird**

Der Preis für diese Genauigkeit ist die Geschwindigkeit: Pro Zyklus wächst nur etwa ein Zehntel Nanometer auf, und ein Zyklus dauert Sekunden. Für dicke Schichten ist das Verfahren daher ungeeignet. Überall dort, wo es auf wenige Atomlagen ankommt, ist es jedoch konkurrenzlos:

- Gatedielektrikum: Das Siliciumdioxid unter dem Gate ließ sich nicht weiter verdünnen, ohne dass Strom hindurchtunnelt. Ersetzt wurde es durch Hafniumdioxid, das bei gleicher Wirkung dicker sein darf. Abgeschieden wird es per ALD – anders lässt sich eine Schicht von wenigen Atomlagen über die ganze Scheibe hinweg nicht gleichmäßig genug herstellen.
- Abstandsschichten beim Multipatterning: Beim selbstjustierenden Verfahren bestimmt die Dicke einer abgeschiedenen Schicht die spätere Strukturbreite. Sie muss deshalb genauer einstellbar sein, als eine Belichtung es je wäre.
- Barrieren und Keimschichten: in tiefen, engen Kontaktlöchern, die kein anderes Verfahren gleichmäßig auskleidet.
- Speicherkondensatoren: Die Kondensatoren einer DRAM-Zelle sind schmale tiefe Gräben, deren Wände vollständig beschichtet werden müssen.

Muss die Temperatur niedrig bleiben, wird der zweite Reaktionsschritt durch ein Plasma unterstützt (plasma enhanced ALD). Die Radikale aus dem Plasma reagieren bereitwilliger als das neutrale Gas, so dass der Zyklus auch weit unterhalb der sonst nötigen Temperatur abläuft.

### **Spaltfüllung**

Eine Aufgabe stellt sich bei jedem Abscheideverfahren, und keines der bisher beschriebenen löst sie von allein: das Auffüllen enger, tiefer Zwischenräume. Solche Spalte entstehen überall dort, wo zwischen bereits stehenden Strukturen ein Isolator eingebracht werden muss – zwischen den Gräben der Grabenisolation, zwischen dicht benachbarten Leiterbahnen, zwischen den Stegen eines Transistors.

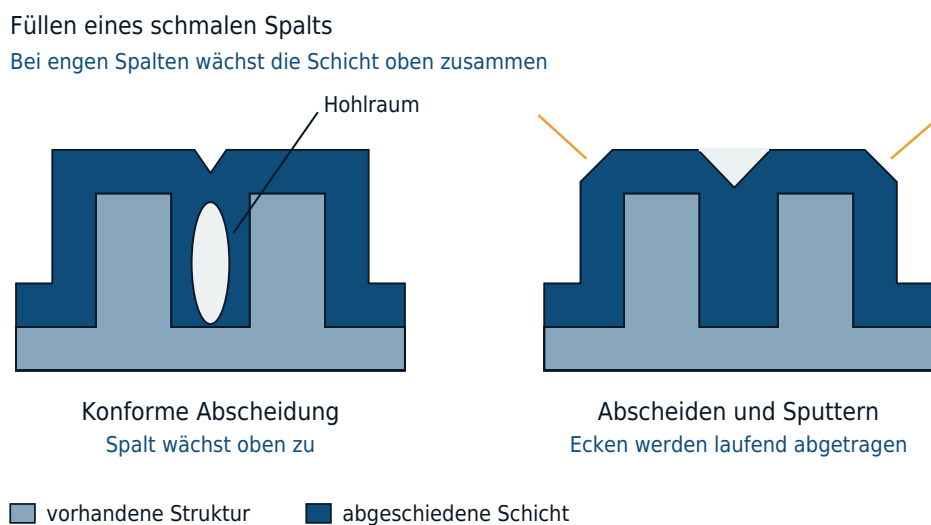
### **Warum ein Hohlraum entsteht**

Eine konforme Schicht wächst an allen Flächen gleich schnell auf, also auch an den beiden gegenüberliegenden Spaltwänden. Ist der Spalt schmaler als die doppelte Schichtdicke, treffen sich die beiden Fronten. Das allein wäre

unproblematisch, wenn sie sich überall gleichzeitig trafen. Tatsächlich wächst die Schicht an der Spaltöffnung schneller, weil die Öffnung von mehr Richtungen aus erreichbar ist als der Grund. Der Spalt schließt sich deshalb zuerst oben, und darunter bleibt ein Hohlraum zurück.

Ein solcher Hohlraum ist kein kosmetisches Problem. Wird er bei einem späteren Schritt angeschnitten, etwa beim Polieren oder beim Ätzen eines Kontaktlochs, füllt sich der Hohlraum mit Ätzlösung oder mit Metall – im ungünstigen Fall entsteht ein Kurzschluss zwischen zwei Leitbahnen.

### Abscheiden und Sputtern zugleich



Die Lösung besteht darin, die Ecken an der Spaltöffnung laufend wieder abzutragen, während die Schicht wächst. Dazu wird der Abscheidung ein Sputteranteil überlagert: Argonionen werden aus einem dichten Plasma auf die Scheibe beschleunigt und schlagen dort Material heraus. Es ist derselbe Vorgang, der beim **Sputtern** zum Beschichten genutzt wird – nur trifft der Ionenstrahl hier nicht auf ein Target, sondern auf die wachsende Schicht selbst.

Weil das Sputtern unter schrägem Einfall am wirksamsten ist, greift es die Kanten an der Spaltöffnung viel stärker an als die waagerechte Fläche am Grund. An der Oberkante entsteht dadurch eine schräge Fläche, die als Facette bezeichnet wird. Die Öffnung bleibt offen, und der Spalt füllt sich von unten nach oben.

Verfahren dieser Art laufen unter der Bezeichnung HDP-CVD (high density plasma CVD). Der entscheidende Prozessparameter ist das Verhältnis von Abscheide- zu Sputterraten, im Englischen als deposition/sputter ratio oder kurz D/S bezeichnet: Zu wenig Sputtern lässt den Hohlraum entstehen, zu viel trägt

die Strukturen selbst ab. Der Sputteranteil liegt typischerweise bei 10 bis 20 Prozent der Nettoabscheiderate.

### **Wenn auch das nicht mehr reicht**

Mit weiter steigenden Tiefen-Breiten-Verhältnissen stößt auch dieses Verfahren an eine Grenze. Der nächste Schritt kehrt zum ältesten Prinzip zurück: Eine Flüssigkeit fließt von selbst in jeden Spalt, ohne Rücksicht auf dessen Form. Aufgebracht wird deshalb ein siliciumhaltiges Vorprodukt, das zunächst flüssig ist, den Spalt vollständig ausfüllt und erst anschließend durch eine Behandlung mit Wasserdampf und Temperatur in festes Siliciumdioxid überführt wird. Die entstehende Schicht ist weniger dicht als ein abgeschiedenes Oxid, füllt dafür aber Spalte, die für jedes gerichtete Verfahren unzugänglich sind.