

1 Oxidation

1.1 Erzeugung von Oxidschichten

1.1.1 Thermische Oxidation

Allgemein:

Bei der thermischen Oxidation werden die Siliciumwafer bei ca. 1000 °C in einem Oxidationsofen oxidiert. Dieser Ofen besteht im Wesentlichen aus einem Quarzrohr in dem sich die Wafer auf einem Carrier aus Quarzglas befinden, drei bis fünf getrennt regelbaren Heizwicklungen und verschiedenen Gaszuleitungen. Das Quarzglas hat einen sehr hohen Schmelzpunkt (weit über 1500 °C) und ist deshalb sehr gut für Hochtemperaturprozesse geeignet. Damit es nicht zu Scheibenverzug oder Scheibensprüngen kommt, wird das Quarzrohr in sehr kleinen Schritten (max. 10 °C pro Minute) aufgeheizt. Die Temperierung ist mittels der getrennten Heizwicklungen im gesamten Rohr über eine Länge von ca. 1 m auf $\pm 0,5$ °C exakt regelbar.

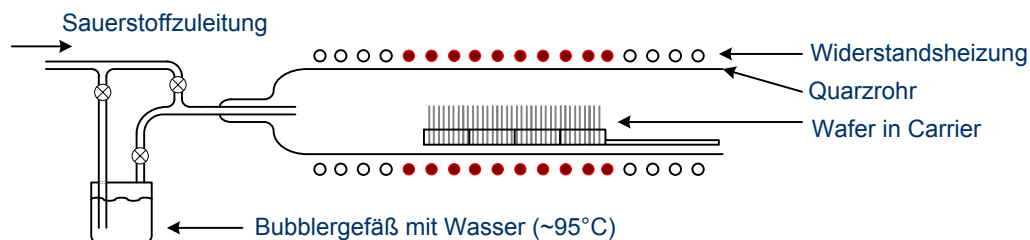
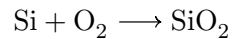


Abb. 1.1: Darstellung eines Oxidationsofens

Der Sauerstoff strömt dann als Gas über die Wafer und reagiert an der Oberfläche zu Siliciumdioxid. Es entsteht eine glasartige Schicht mit amorpher Struktur. Je nach Prozessgas finden dann verschiedene Oxidationen statt (eine thermische Oxidation muss naturgemäß auf einer Siliciumoberfläche stattfinden). Die thermische Oxidation unterteilt sich in die trockene und feuchte Oxidation, welche sich wiederum in die nasse Oxidation und die H_2O_2 -Verbrennung gliedern lässt.

Trockene Oxidation:

Der Oxidationsprozess findet unter reiner Sauerstoffatmosphäre statt. Dabei reagiert Silicium mit Oxid zu Siliciumdioxid:



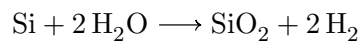
Dieser Prozess findet in der Regel bei 1000-1200 °C statt. Zur Erzeugung von sehr stabilen und dünnen Oxiden wird die Oxidation bei ca. 800 °C durchgeführt.

Eigenschaften der Trockenoxidation:

- langsames Oxidwachstum
- hohe Dichte
- hohe Durchbruchspannung (für elektrisch stark beanspruchte Oxide, z.B. Gateoxid)

Nasse Oxidation:

Bei der nassen Oxidation wird der Sauerstoff durch ein Bubbler-Gefäß mit Wasser (ca. 95 °C) geleitet, so dass sich zusätzlich zum Sauerstoff auch Wasser in Form von Wasserdampf im Quarzrohr befindet. Daraus ergibt sich folgende Reaktionsgleichung:



Dieser Prozess findet bei 900-1000 °C statt. Die nasse Oxidation weist folgende Eigenschaften auf:

- hohes Oxidwachstum schon bei geringer Temperatur (Verwendung von Maskierschichten, Feldoxid)
- geringere Qualität als Trockenoxid

H₂O₂-Verbrennung:

Bei der H₂O₂-Verbrennung wird neben hochreinem Sauerstoff auch hochreiner Wasserstoff verwendet. Die beiden Gase werden getrennt in das Quarzrohr geleitet und an der Eintrittsöffnung verbrannt. Damit es nicht zu einer Knallgasreaktion mit dem

| Temperatur | Trockene Oxidation | Nasse Oxidation |
|------------|--------------------|-----------------|
| 900 °C | 19 nm/h | 100 nm/h |
| 1000 °C | 50 nm/h | 400 nm/h |
| 1100 °C | 120 nm/h | 630 nm/h |

Tab. 1.1: Vergleich der Aufwachsrate bei trockener und nasser Oxidation

hochbrennbaren Wasserstoff kommt, muss die Temperatur über 500 °C liegen, die Gase reagieren dann in einer stillen Verbrennung. Dieses Verfahren ermöglicht die Erzeugung von schnell wachsenden und nur wenig verunreinigten Oxidschichten. Damit lassen sich sowohl dicke Oxide, als auch dünne Schichten bei vergleichsweise geringer Temperatur (900 °C) herstellen. Die niedrige Temperatur erlaubt auch die thermische Belastung von bereits dotierten Wafern.

Bei allen thermischen Oxidationen ist das Oxidwachstum auf 111-orientierten Substraten höher als auf 100-orientierten. Außerdem erhöht ein sehr hoher Anteil an Dotierstoffen im Substrat das Wachstum deutlich.

Ablauf des Oxidationsvorgangs:

Zu Beginn reagiert der Sauerstoff an der Waferoberfläche zu Siliciumdioxid. Nun befindet sich eine Oxidschicht auf dem Substrat durch die der Sauerstoff zunächst diffundieren muss, um mit dem Silicium reagieren zu können. Die Aufwachsrate hängt nur zu Beginn von der Reaktionszeit zwischen Silicium und Oxid ab; ab einer gewissen Dicke wird die Oxidationsgeschwindigkeit von der Diffusionsgeschwindigkeit des Oxids durch das Siliciumdioxid bestimmt. Mit zunehmender Oxiddicke verlangsamt sich also das Wachstum. Da die entstandene Schicht amorph ist, sind nicht alle Bindungen der Siliciumatome intakt; es gibt teilweise freie Bindungen (freie Elektronen und Löcher) an der Si–SiO₂-Grenzschicht. So ergibt sich an diesem Übergang insgesamt eine leicht positive Ladung. Da sich diese Ladung negativ auf Bauteile auswirken kann wird versucht sie so gering wie möglich zu halten. Das kann beispielsweise mit höherer Oxidationstemperatur erreicht werden, oder durch Verwendung der nassen Oxidation, die ebenfalls nur eine sehr geringe Ladung verursacht.

Segregation:

Bei der thermischen Oxidation wird Silicium, durch die Reaktion mit Sauerstoff zu Siliciumdioxid, verbraucht. Das Verhältnis der aufgewachsenen Oxidschicht zu verbrauchtem Silicium beträgt 2,27; d.h. das Oxid wächst zu 45 % der Oxiddicke in das

Substrat ein.

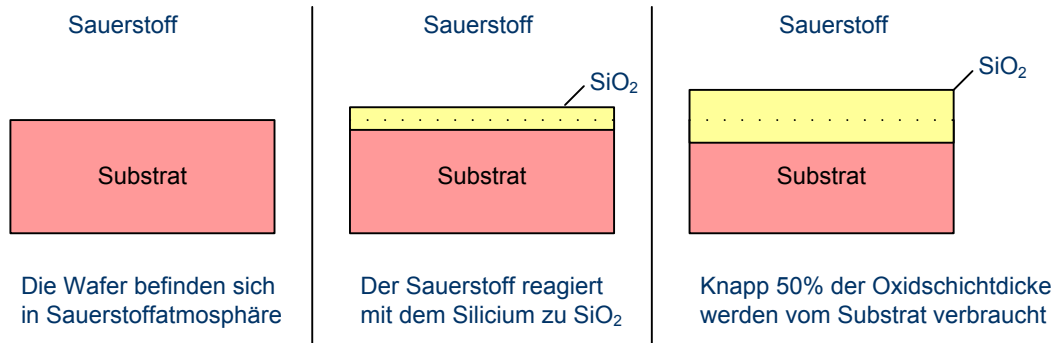


Abb. 1.2: Aufwuchsverhalten von Oxid auf Silicium

Dotierstoffe die sich im Substrat befinden, können im Siliciumkristall oder im Oxid eingebaut werden, dies hängt davon ab, in welchem Material sich der Dotierstoff besser löst. Das Verhalten lässt sich mit einer Formel berechnen, k wird dabei als Segregationskoeffizient bezeichnet:

$$k = \frac{\text{Löslichkeit des Dotierstoffs in Silicium}}{\text{Löslichkeit des Dotierstoffs in SiO}_2}$$

Ist k größer 1 werden die Dotierstoffe an der Oberfläche des Substrats eingebaut, bei k kleiner 1 reichern sich die Dotierstoffe im Oxid an.

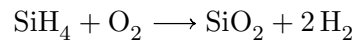
1.1.2 Oxidation durch Abscheidung

Bei der thermischen Oxidation wird Silicium des Wafers zur Oxidbildung verbraucht. Ist die Siliciumoberfläche jedoch durch andere Schichten verdeckt, muss man das Oxid über Abscheidungsverfahren aufbringen, bei denen neben Sauerstoff auch Silicium selbst hinzugefügt wird. Die zwei wichtigsten Verfahren dabei sind die Silanpyrolyse und die TEOS-Abscheidung. Eine ausführliche Beschreibung der Verfahren folgt später im Kapitel Abscheidung.

Silanpyrolyse:

Pyrolyse bedeutet, dass chemische Verbindungen durch Wärme gespalten werden, in diesem Fall das Gas Silan SiH_4 und hochreiner Sauerstoff O_2 . Da sich das giftige Silan bei einer Konzentration von 3 % in der Umgebungsluft selbst entzündet muss es mit Stickstoff oder Argon auf 2 % verdünnt werden. Bei ca. 400 °C reagiert das Silan und

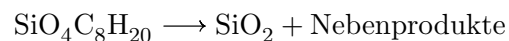
der Sauerstoff zu Siliciumdioxid und Wasserstoff:



Das Siliciumdioxid ist nur von geringer Qualität. Alternativ kann eine Hochfrequenzanregung über ein Plasma bei ca. 300 °C zur Dioxidabscheidung verwendet werden. So entsteht ein etwas stabileres Oxid.

TEOS-Abscheidung:

Das bei dieser Methode verwendete Tetraethylorthosilicat, kurz TEOS ($\text{SiO}_4\text{C}_8\text{H}_{20}$) enthält die beiden benötigten Elemente Silicium und Sauerstoff. Unter Vakuum geht die bei Raumtemperatur flüssige Verbindung bereits in Gasform über (durch das Vakuum herrscht ein geringerer Druck auf der Oberfläche der Flüssigkeit, die Siedetemperatur wird herabgesetzt). Das Gas wird in ein beheiztes Quarzrohr überführt und dort bei ca. 750 °C gespalten.



Das Siliciumdioxid scheidet sich auf den Wafern ab, die Nebenprodukte (z.B. H_2O - Wasserdampf) werden abgesaugt. Die Gleichmäßigkeit dieses Oxids wird durch den Druck im Quarzrohr und die Prozesstemperatur bestimmt. Es ist elektrisch stabil und sehr rein.