

HANSER



Leseprobe

Jan Albers

Grundlagen integrierter Schaltungen

Bauelemente und Mikrostrukturierung

ISBN: 978-3-446-42232-2

Weitere Informationen oder Bestellungen unter

<http://www.hanser.de/978-3-446-42232-2>

sowie im Buchhandel.

5.1 Thermische Oxidation

5.1.1 Die Oxidation von Siliziumoberflächen

Silizium bildet schon bei niedrigen Temperaturen an der Luft oder im Wasser eine dünne Oxidschicht an der Oberfläche. Diese *natürliche Oxidschicht* wird bei normalen Raumtemperaturen zwischen 3 nm und 7 nm dick. Da diese Schicht unkontrolliert auf der Waferoberfläche wächst, besitzt sie keine definierten und reproduzierbaren Eigenschaften. Sie wird deshalb durch ein Ätzbad in verdünnter Flusssäure entfernt, bevor definierte Oxidschichten auf der Waferoberfläche erzeugt werden. Unter kontrollierten Bedingungen lassen sich dann auf dieser sauberen Waferoberfläche reproduzierbare Oxidschichten mit einer definierten Dichte und einer vorgegebenen Dicke von wenigen nm bis zu einigen μm erzeugen. Dazu müssen allerdings die Temperatur, die Gaszusammensetzung und die Zeit genau eingehalten werden. Der Oxidationsprozess wird dabei durch eine hohe Temperatur in einem sauerstoffhaltigen Gas beschleunigt.

Nach einem Modell, das von Deal und Grove aufgestellt wurde, verläuft der *Oxidationsprozess* in mehreren Phasen. Zunächst muss ein sauerstoffhaltiges Gas an die Waferoberfläche gelangen. Dazu ist eine definierte Luftströmung (*Konvektion*) in der Prozessanlage notwendig. Die Gasmoleküle reagieren dann chemisch mit den Siliziumatomen auf der sauberen, heißen Waferoberfläche zum *Siliziumdioxid* (SiO_2). Dabei werden alle Siliziumatome der Oberfläche oxidiert, und es bildet sich eine schnell wachsende Siliziumdioxidschicht. Die Geschwindigkeit, mit der diese Oxidschicht wächst, wird als *Oxidationsrate* bezeichnet und ist zunächst im Wesentlichen durch die Geschwindigkeit der chemischen Reaktion bestimmt. Dieser *reaktionsbestimmte Prozess* zeigt ein *lineares Schichtwachstum*, das mit der folgenden Gleichung beschrieben werden kann:

$$d_0(t) = (B/A) \cdot (t + \tau)$$

d_0 = Schichtdicke nach der Zeit t

B/A = lineare Wachstumskonstante

$(t + \tau)$ = Zeit und Korrekturzeitkonstante

Wenn sich bereits eine Oxidschicht auf der Waferoberfläche gebildet hat, müssen die sauerstoffhaltigen Gasmoleküle durch die schon vorhandene Oxidschicht diffundieren, bis sie die Si/SiO₂-Grenzfläche erreichen (Abb. 5.2). Erst an dieser Grenzfläche erfolgt die chemische Reaktion. Oxidiert wird das Silizium an der Grenzfläche unter der schon vorhandenen Oxidschicht, da die Gasmoleküle nur hier auf freie Siliziumatome treffen. Das *Modell von Deal und Grove* geht dabei davon aus, dass die Gasmoleküle als Moleküle von der vorhandenen Oxidschicht aufgenommen werden und dann, ohne zu zerfallen, bis zur Grenzfläche diffundieren. Hier reagieren sie dann nach dem oben beschriebenen linearen Reaktionsgesetz. Die entstandene Oxidschicht kann bis zu einer maximalen Löslichkeitsgrenze Gasmoleküle aus der umgebenden Atmosphäre aufnehmen. Solange durch die Konvektion in der Gasphase neue sauerstoffhaltige Moleküle zur Oberfläche gelangen, werden die abreagierten Gasmoleküle durch neue Moleküle aus der Gasphase ersetzt. Dadurch entsteht ein stetiger Diffusionsstrom von Gasmolekülen zur Si/SiO₂-Grenzfläche. Je dicker die Oxidschicht wird, um so mehr Zeit benötigen jedoch die Gasmoleküle, um zur Grenzfläche zu diffundieren. Da die Diffusion eine

ungerichtete Bewegung ist, diffundieren auch Gasmoleküle zurück zur Oberfläche und entweichen hier. Der Diffusionsstrom an Gasmolekülen zur Grenzfläche wird daher immer geringer, je dicker die Oxidschicht ist. Das Schichtwachstum wird dann immer langsamer. Ab einer Schichtdicke von über 30 nm wird die Oxidationsrate durch die Geschwindigkeit des Diffusionsprozesses bestimmt, während die Reaktionsgeschwindigkeit keinen Einfluss mehr hat. Bei diesem diffusionsbestimmten Prozess stellt sich ein immer langsamer werdendes *parabolisches Schichtwachstum* ein, das dem folgenden Gesetz folgt:

$$d_0 = \sqrt{B \cdot t}$$

B = parabolische Wachstumskonstante

Nach dem Modell von Deal und Grove lässt sich die Schichtdicke d_0 nach einer Oxidationszeit t mit der folgenden Gleichung bestimmen:

$$d_0^2 + A \cdot d_0 = B \cdot (t + \tau)$$

Diese quadratische Gleichung beinhaltet die beiden diskutierten Grenzfälle einer sehr dünnen Oxidschicht mit einem reaktionsbestimmten Prozess und einer dickeren Schicht mit einem diffusionsbestimmten Prozess. Sie hat die folgende Lösung:

$$d_0 = A/2 \cdot \sqrt{1 + (4 \cdot B \cdot (t + \tau) / A^2) - 1}$$

Merksatz: Bei dünnen Oxidschichten wird das Schichtwachstum durch die Reaktionsgeschwindigkeit bestimmt, und es zeigt sich ein lineares Schichtwachstum. Bei dicken Oxidschichten bestimmt die Diffusionsgeschwindigkeit das Schichtwachstum. Je dicker die Schicht wird, um so langsamer wächst sie. Es entsteht ein parabolisches Wachstum.

Die Konstanten A , B und τ hängen von verschiedenen Parametern ab und lassen sich nur schwer berechnen. Sie werden im Allgemeinen durch eine numerische Anpassung für einen vorgegebenen Prozess bestimmt. Dabei werden die Konstanten so lange verändert, bis die berechneten Schichtdicken mit gemessenen Werten übereinstimmen. Die Konstante A ist abhängig von der Reaktionsgeschwindigkeit der Oxidation und die Konstante B von der maximalen Löslichkeitsgrenze der Oxidschicht für die Gasmoleküle. Beide Konstanten sind zusätzlich von der Diffusionskonstanten der jeweiligen Gasmoleküle in der Oxidschicht abhängig. Da die Diffusionskonstante von der Temperatur abhängt, ist auch das Schichtwachstum temperaturabhängig. Bei Raumtemperatur sind die Diffusionskonstanten so klein, dass kein nennenswertes Schichtwachstum mehr auftritt, sobald die Oxidschicht einige nm dick ist. Deshalb wird die natürliche Oxidschicht auch nur wenige nm dick. Erst bei Temperaturen zwischen 800 °C und 1200 °C ist der Diffusionsprozess so schnell, dass sich Schichtdicken über 1 µm in akzeptablen Zeiten erreichen lassen. Experimentelle Daten zeigen, dass bei Temperaturen bis 1000 °C die Oxidationsrate exponentiell mit der Temperatur ansteigt. Bei noch höheren Temperaturen beginnt das Siliziumdioxid langsam zu fließen, und die Oxidationsrate steigt langsamer. Deshalb werden für die thermische Oxidation Temperaturen bis maximal 1000 °C eingesetzt.

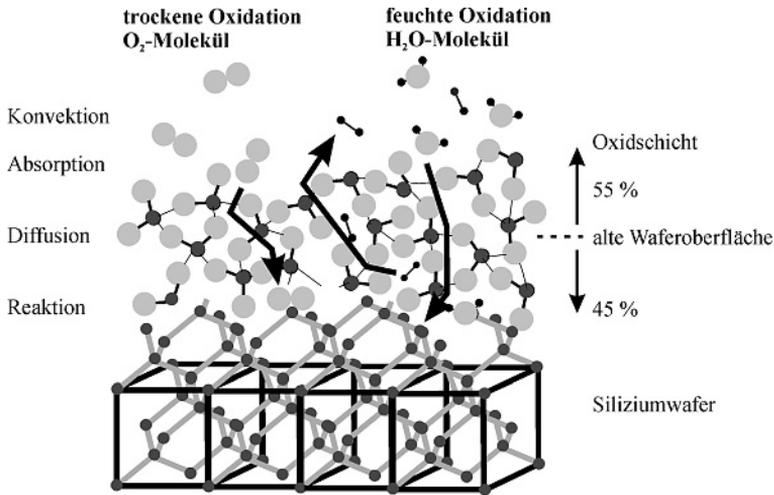
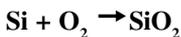


Abb. 5.2: Die thermische Oxidation des Siliziums läuft bei hohen Temperaturen über mehrere elementare Schritte.

5.1.2 Trockene und feuchte Oxidation

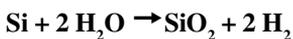
Wird die heiße Siliziumoberfläche durch reinen Sauerstoff (O₂-Moleküle) oxidiert, so wird dies als *trockene Oxidation* bezeichnet. Dabei entsteht eine sehr dichte Oxidschicht mit einer hohen elektrischen Durchbruchspannung. Allerdings ist die Geschwindigkeit des Schichtwachstums (Oxidationsrate) sehr gering, so dass sich dicke Oxidschichten nicht in einer akzeptablen Zeit erzeugen lassen.

Merksatz: Bei der trockenen thermischen Oxidation wird die heiße Siliziumoberfläche durch sauberen Sauerstoff zum SiO₂ oxidiert. Es gilt:



Die Oxidationsrate gibt das Schichtwachstum pro Zeit (nm/min) an. Sie kann erhöht werden, indem während der Oxidation Wasserdampf (H₂O-Moleküle) zugegeben wird. Bei dieser so genannten *feuchten Oxidation*, gelangen die Wassermoleküle auf die heiße Siliziumoberfläche und diffundieren schneller durch die schon vorhandene SiO₂-Schicht als das O₂-Molekül, so dass die Oxidationsrate höher ist. Warum das H₂O-Molekül schneller durch die Oxidschicht diffundiert als das O₂-Molekül, ist nicht leicht zu verstehen, da der Diffusionsprozess äußerst kompliziert ist. Sicherlich spielt aber eine Rolle, dass das O₂-Molekül deutlich größer als das H₂O-Molekül ist. Aus dem Wassermolekül verbindet sich der Sauerstoff an der Si/SiO₂-Grenzschicht mit dem Silizium zum SiO₂ und der Wasserstoff (H₂) wird abgespalten. Der Vorteil der feuchten Oxidation ist die hohe Oxidationsrate, die benötigt wird, um z. B. ein bis zu 800 nm dickes Feldoxid zu erzeugen. Der Nachteil dieser Oxidation ist jedoch die geringere Dichte und die dadurch niedrigere Spannungsfestigkeit.

Bei der feuchten Oxidation wird das Silizium durch Wassermoleküle oxidiert. Es gilt:



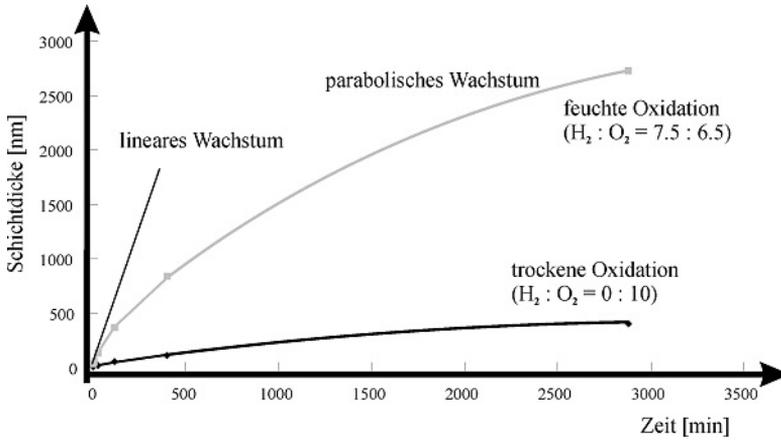


Abb. 5.3: Schichtwachstum einer trockenen (schwarze Kurve) und einer feuchten (graue Kurve) Oxidation bei 900 °C.

Die feuchte thermische Oxidation mit Wasserdampf hat eine höhere Oxidationsrate als die trockene Oxidation mit reinem Sauerstoff. Damit können in kürzerer Zeit dickere Oxidschichten erzeugt werden, die jedoch eine geringere Dichte und dadurch eine niedrigere Spannungsfestigkeit haben.

In Abbildung 5.3 sind die Schichtdicken in Abhängigkeit zur Oxidationszeit für eine trockene und eine feuchte thermische Oxidation bei 900 °C und Atmosphärendruck dargestellt. Für die feuchte Oxidation stimmen die Messwerte sehr gut mit den berechneten Werten aus dem *Deal-Grove-Modell* überein. Genaue Messungen zeigen, dass die Werte für die trockene Oxidation erst ab Schichtdicken über 35 nm mit dem aus dem Modell berechneten Werten gut übereinstimmt. Dünnere Oxidschichten wachsen bei einer trockenen Oxidation sehr viel schneller, als es mit dem Modell berechnet werden kann. Das Modell kann angepasst werden, in dem eine sehr lange Korrekturzeit τ von 75 Stunden oder eine fiktive Anfangsdicke von 20 nm angenommen wird.

5.1.3 Einflüsse auf die Oxidationsrate

Neben der Feuchte hat auch der Druck in der Oxidationsanlage einen Einfluss auf die Oxidationsrate, da bei einem höheren Druck die maximale Löslichkeitsgrenze der Gasmoleküle in der Oxidschicht steigt. Zur Erzeugung besonders dicker Oxidschichten wurde die Hochdruckoxidation bei einem Druck von 10–25 bar in nasser Atmosphäre entwickelt. Dadurch kann bei 20 bar die Oxidationsrate auf ca. 1,15 $\mu\text{m}/\text{min}$ angehoben werden. Einen weiteren Einfluss auf die Oxidationsrate haben Verunreinigungen, die zu einer geringeren Dichte des Oxids führen. Dadurch erhöht sich die Diffusionsgeschwindigkeit der Sauerstoffmoleküle durch die Oxidschicht, so dass die Oxidationsrate steigt. Eine hohe Dotierung des Siliziumsubstrats zeigt den gleichen Effekt auf die Oxidationsrate. Bei sehr hoher Konzentration eines Dotierstoffes steigt deshalb die Oxidationsrate, was in modernen Technologien berücksichtigt werden muss. Experimentell lässt sich auch zeigen, dass die Oxidationsrate gering von der Kristallorientierung abhängt. Dabei zeigt sich, dass (111)-Oberflächen am schnellsten und (100)-Oberflächen am

langsamsten oxidieren. Grund dafür ist die höhere Bindungszahl der Siliziumatome in der (111)-Oberfläche. Da der Einfluss der Orientierung bei höheren Temperaturen und dicker werdenden Schichten immer geringer wird, spielt dieser Effekt technisch keine große Rolle. Auch Polysilizium wird durch Sauerstoff oxidiert. Allerdings kann die Oxidation an den Korngrenzen beschleunigt erfolgen, da der Sauerstoff hier besser diffundiert.

5.1.4 Eigenschaften und Einsatz der Oxidschichten

Während der thermischen Oxidation wird das oberflächennahe Silizium zum Siliziumdioxid umgewandelt, so dass die Siliziumatome der Waferoberfläche dabei verbraucht werden. Das SiO_2 -Molekül ist deutlich größer (ca. 45 \AA^3) und benötigt mehr Platz als ein einzelnes Siliziumatom (ca. 25 \AA^3). Deshalb ist die Oxidschicht dicker als der umgewandelte Siliziumbereich. Die Oxidschicht wächst also in das Substrat hinein und wird gleichzeitig dicker (Abb. 5.2)

Merksatz: Die Oxidschicht wächst an der Grenzschicht zum Silizium. Sie schiebt die älteren Oxidschichten nach oben und wächst gleichzeitig zu ca. 45 % in das Siliziumsubstrat ein.

Die Si-O_2 -Verbindung ist eine starke kovalente Verbindung, die sich nur mit sehr viel Energie bei Temperaturen von ca. $2000 \text{ }^\circ\text{C}$ trennen lässt. Die SiO_2 -Moleküle verbinden sich über *Sauerstoffbrückenbindungen*. Dabei entstehen auf der Waferoberfläche eine amorphe, durchsichtige Glasschicht aus Siliziumdioxid, so dass Strukturen unter ihr sichtbar sind. Amorphe Verbindungen haben keinen definierten Schmelzpunkt. Eine reine Siliziumdioxidschicht beginnt daher bei ca. $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ sehr zähflüssig zu fließen und wird bei $1500 \text{ }^\circ\text{C}$ dünnflüssig. Bei Raumtemperatur bildet Siliziumdioxid eine harte, chemisch sehr stabile Schicht, die auch als Schutzschicht Verwendung findet. Zu beachten ist auch, dass die thermischen Ausdehnungskoeffizienten von Silizium ($\alpha = 3,24 \cdot 10^{-6}/\text{C}$) und Siliziumdioxid ($\alpha = 0,55 \cdot 10^{-6}/\text{C}$) stark unterschiedlich sind. Wenn nach der thermischen Oxidation der Wafer wieder abkühlt, zieht sich das Siliziumsubstrat stärker zusammen als die Siliziumdioxidschicht. Während des Prozesses kommt es daher zu mechanischen Spannungen zwischen den Schichten. Dadurch entsteht ein mechanischer Stress auf der Waferoberfläche, der zu einer sehr geringen, aber doch messbaren Durchbiegung des Wafers führt. Der Stress bewirkt auch, dass die Oxidationsrate geringer wird, da die Diffusion der Gasmoleküle in den gestressten Bereichen langsamer wird. Dieser Stress kann insbesondere an den Kanten auf strukturierten Schichten so groß werden, dass dadurch Kristallfehler im Siliziumsubstrat entstehen. Solche Kristallfehler können das elektrische Verhalten einzelner Bauelemente stark beeinflussen. Wie stark der Stress auf dem Siliziumwafer wird, hängt von der Art und Dicke der erzeugten Schicht ab. Insbesondere bei der Erzeugung des dicken Feldoxides müssen die Wafer deshalb langsam abkühlen.

Oxidschichten sind gute elektrische Isolatoren und werden deshalb als Funktionsschichten zur Isolierung bei aktiven Bauelementen eingesetzt. Diese Schichten sind z. B. das Gateoxid bei einem MOS-Transistor oder das Tunneloxid einer EEPROM-Zelle. Dazu soll die Schicht möglichst dünn sein und trotzdem eine hohe Spannungsfestigkeit aufweisen. Die Spannungsfestigkeit der Oxidschicht hängt von ihrer Dichte ab. Oxidschichten haben eine mittlere Dichte von $2,2 \text{ g/cm}^3$, die aber stark von den Produktionsbedingungen abhängt. Je trockener die Oxidation und je tiefer die Oxidationstemperatur ist, um so dichter und homogener und damit elektrisch stabiler wird die Oxidschicht. Die Oxidationsrate ist dann jedoch sehr gering. Für stark belastbare, extrem dünne

Oxidschichten wird eine trockene Oxidation mit Temperaturen unter 800 °C verwendet. Die typische Durchbruchfeldstärke beträgt dann ca. 1 V/nm. Dies bedeutet, dass ein Gateoxid von 40 nm Dicke eine maximale Spannung von 40 V verträgt. Bei einer höheren Spannung kann die Oxidschicht durchschlagen. Dabei treten starke Ströme durch das Gateoxid, die das Oxid lokal weg-schmelzen lassen und den Transistor dadurch zerstören. Auch zur Isolierung der Metallleiterbahn zum Siliziumwafer werden thermische Oxidschichten eingesetzt. Dieses Feldoxid muss möglichst dick sein, um das Aufschalten des parasitären Feldtransistors zu vermeiden (Kapitel 2). Da hier die Anforderungen an die elektrischen Eigenschaften nicht so hoch sind, werden diese Schichten mit Hilfe der feuchten Oxidation erzeugt.

Einen weiteren direkten Einfluss auf die Funktion des Transistors hat die Reinheit des Gateoxids. So können bewegliche Ionen im Gateoxid mit der Zeit die Transistor-Schwelspannungen bei MOS-Transistoren verändern. Bewegliche Ladungen entstehen durch Verunreinigungen mit Alkaliionen, insbesondere mit Natrium und Kalium. Diese diffundieren schon bei Temperaturen unter 100 °C in den Oxidschichten, können diese aber nicht verlassen. Die beweglichen Natriumionen können durch Chlorionen im Oxid gebunden werden (Abb. 5.4). Dadurch nimmt die Zahl der beweglichen Ladungen im Oxid ab, und es verbessert sich die Stabilität der elektronischen Schaltungen. Auch das Durchbruchverhalten wird durch die Chloratome im Oxid verbessert. Deshalb wird während der thermischen Oxidation häufig ein Chlorgas (HCl) zugegeben, und es entsteht ein so genanntes *TLC-Oxid*. Dies verändert allerdings die Oxidationsrate, was bei der Produktion berücksichtigt werden muss. Ein zusätzliches Problem für die Stabilität der MOS-Transistoren können die vielen freien Siliziumbindungen verursachen, die sich nach einer Oxidation noch an der Grenzfläche Silizium/SiO₂ befinden. Diese ungesättigten Verbindungen sind oft geladen und können ein geladenes Fremdatom (Ionen) einfangen. Diese Ladungen verändern ebenfalls die elektrischen Eigenschaften der Transistoren. Es zeigt sich, dass bei höherer Oxidationstemperatur und nasser Oxidation die Grenzflächenladung niedriger ist als bei der trockenen Oxidation. Dieses hängt mit den frei werdenden Wasserstoffatomen zusammen, die sich mit den ungesättigten Siliziumverbindungen verbinden. Ein späteres Heizen (Tempern) in einer Wasserstoffatmosphäre hat den gleichen Effekt und trägt daher zur Stabilität der Schaltung bei. Daher wird solch ein Tempern häufig noch am Ende des Herstellungsprozesses durchgeführt.

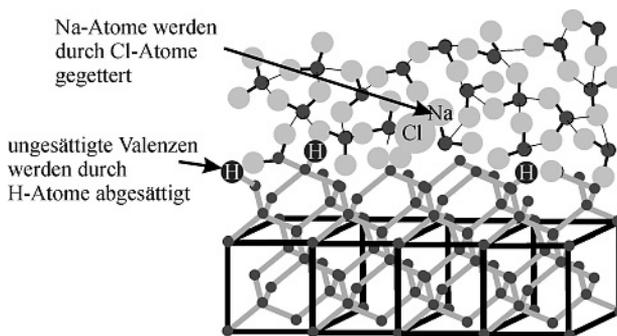


Abb. 5.4: Durch die Zugabe von Chlor werden Natriumionen im Oxid gebunden und unbeweglich.

Merksatz: Siliziumdioxid ist eine Glasschicht, die zur elektrischen Isolation eingesetzt wird. Die Durchbruchspannung hängt stark von der Temperatur, der Feuchtigkeit und der Reinheit während des Herstellungsprozesses ab.

Eine weitere Aufgabe von thermischen Oxidschichten ist die Bildung einer Diffusionsbarriere. Die Dotierstoffe Bor und Phosphor diffundieren bei kleinen Konzentrationen nur sehr langsam in Oxidschichten. Sie können auch nicht vom Silizium in eine Oxidschicht eindringen. Daher verhindern schon sehr dünne Oxidschichten das Ausgasen von Bor und Phosphor aus dem Siliziumwafer. Dies wird im Produktionsprozess oft ausgenutzt, damit eingebrachte Dotierungen den Wafer nicht mehr verlassen können. Natriumionen können sich zwar sehr schnell in Oxidschichten bewegen, aber eine Grenzschicht vom Oxid zum Silizium können sie nur schwer überwinden. Thermische Oxidschichten werden oft auch als Hilfsschichten im Prozess z. B. als Maske bei der Implantation oder zum Reinigen der Siliziumoberfläche verwendet. Diese Hilfsschichten werden anschließend wieder vollständig wegätzt, da sie für die Funktion der Schaltung nicht benötigt werden. Beim Ätzen der thermischen Oxidschicht wird die Ätzgeschwindigkeit stark von der Dotierstoffkonzentration in der Schicht beeinflusst. So kann die Ätzgeschwindigkeit bei einer hohen Phosphor-Konzentration um den Faktor 10 ansteigen. Der Einbau von Bor bewirkt dagegen ein Sinken der Ätzrate. Bei einer sehr hohen Konzentration des Dotierstoffes wandelt sich das Oxid in ein Silikatglas um, indem auch die Dotierstoffe oxidiert sind. Das Silikatglas hat deutlich andere Eigenschaften als eine reine Siliziumdioxidschicht, und es entsteht eine sehr scharfe Grenze zwischen den Schichten.

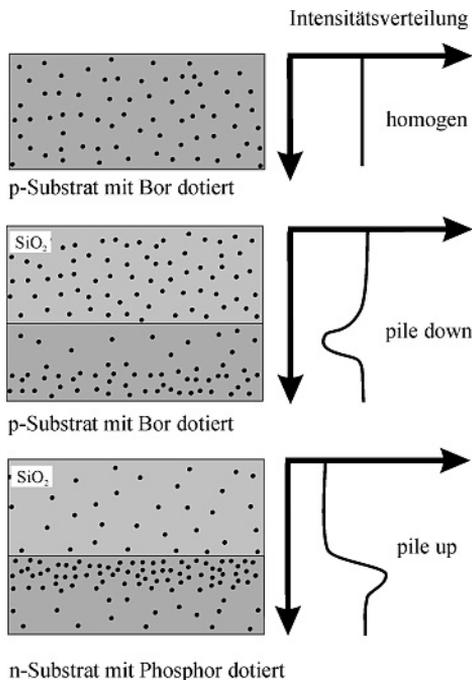


Abb. 5.5: Durch die Segregation kommt es entweder zum pile-down oder zum pile-up-Effekt.

5.1.5 Segregation

Bei der Oxidation von dotierten Siliziumoberflächen entsteht ein weiterer Effekt, der als Segregation bezeichnet wird. Befinden sich Dotierstoffe im Silizium, das durch die thermische Oxidation in eine Oxidschicht umgewandelt wird, kommt es zu einer Verschiebung der Dotierstoffkonzentration (Abb. 5.5). Die im Silizium befindlichen Dotierstoffe werden entweder bevorzugt im Silizium oder im Oxid eingebaut. Dafür entscheidend ist die Löslichkeit des Elements im Silizium oder in der Oxidschicht. Dies beschreibt der *Segregationskoeffizient* k

$$k = \text{Löslichkeit im Si} / \text{Löslichkeit im SiO}_2$$

Bei einem Segregationskoeffizienten < 1 ist die Löslichkeit in der Oxidschicht größer als im Silizium. Dies führt zu einer Verarmung der Dotierstoffe an der Siliziumoberfläche und wird als *pile-down-Effekt* bezeichnet. So ist der Segregationskoeffizient bei Bor 0,3, und es kommt bei jeder thermischen Oxidation zu einer Absenkung der Borkonzentration an der Siliziumoberfläche (Abb. 5.5). Das führt bei NMOS-Transistoren zu einer sehr geringen Schwellspannung und damit zur Notwendigkeit der Nachdotierung mit Bor unter die Oxidschicht. Da dies erst ab 1970 mit der Einführung der Ionenimplanter möglich wurde, konnten vorher nur die sehr viel langsameren PMOS-Transistoren gebaut werden. Diese Transistortypen liegen in einem n-dotiertem Gebiet, das mit Phosphor dotiert ist. Hier kann die Schwellspannung mit Hilfe der Phosphorkonzentration eingestellt werden. Phosphor hat einen Segregationskoeffizienten > 1 , und es kommt hier zu einer Anreicherung der Dotierstoffe an der Siliziumoberfläche. Dieser *pile-up-Effekt* muss ebenfalls im Prozessablauf berücksichtigt werden. Die Segregationskoeffizienten sind messtechnisch nur schwer zu erfassen und deshalb nur sehr ungenau bekannt.

Merksatz: Durch den Segregationseffekt kommt es beim Bor zu einer Verarmung (*pile-down*) und beim Phosphor zu einer Anreicherung (*pile-up*) der Dotierstoffe an der Siliziumoberfläche.

5.1.6 Oxidationsöfen

Zur thermischen Oxidation werden horizontale oder vertikale Öfen eingesetzt, die bis zu 200 Wafer gleichzeitig prozessieren können (Abb. 5.6). Die Wafer werden dazu in ein Quarzglasrohr eingefahren, indem sie durch elektrische Heizelemente auf über 1000 °C erhitzt werden können. Damit auf allen Wafern die gleiche Schichtdicke erzeugt wird, darf die Temperatur auf den einzelnen Wafern vom Sollwert nur maximal $\pm 0,5$ °C abweichen. Dies ist mit einem einzelnen Heizelement nicht zu erreichen. Um die Wärmeunterschiede an den beiden Rohrenden auszugleichen, sind dort weitere, unabhängig regelbare Heizelemente vorhanden. Üblich sind heute 3-Zonen-Öfen für Wafer mit einem Durchmesser bis zu 150 mm. Für eine genauere Temperatureinstellung werden 5-Zonen-Öfen eingesetzt, die neben einer verbesserten Temperaturverteilung auch ein günstigeres dynamisches Verhalten zeigen. Damit lassen sich auch gut Temperaturrampen einstellen, die notwendig sind, wenn die Reaktionsgase an einem Rohrende schneller verbraucht sind. Damit die Wafer an diesem Rohrende keine dünnere Schicht aufweisen, wird durch eine höhere Temperatur das Schichtwachstum hier beschleunigt. Bei 8"-Wafern mit einem Durchmesser von 200 mm werden häufig *Vertikalöfen* eingesetzt, bei denen die Wafer in die Höhe gestapelt werden. Dadurch

wird erreicht, dass die Wafer beim Herausfahren aus dem heißen Ofenrohr gleichmäßig über ihre Oberfläche abkühlen. Beim *horizontalen Ofen* stehen die Wafer senkrecht im Ofen und kühlen beim Herausfahren unten schneller ab als oben, da die heiße Luft von unten nach oben aufsteigt. Dies führt zu einem ungleichmäßigen Schichtwachstum, was bei einem großen Waferdurchmesser nicht mehr akzeptabel ist. Bei horizontalen Oxidationsöfen können jedoch mehrere Ofenrohre übereinander angebracht werden, um Platz im Reinraum zu sparen. In Abbildung 5.6 ist ein typischer Horizontalofen dargestellt. Die Steuereinheit kontrolliert den Prozess und kann auftretende Temperaturabweichungen korrigieren. Sie sorgt auch dafür, dass die Wafer weder zu schnell hochgeheizt, noch zu schnell abgekühlt werden, da beides die Wafer zerstören kann. Die Überwachung der Temperatur geschieht über Thermoelemente an der Rohraußenseite, so dass keine metallischen Temperaturfühler im Rohrinernen sind. Da die Temperatur hier von der Temperatur im Rohrinernen abweicht, muss regelmäßig eine Kalibrierung durchgeführt werden. Dazu werden während eines Testlaufes mehrere Thermoelemente in das Rohr eingeschoben und die Temperatur mit der Temperatur am Außenrohr verglichen. Im Gasversorgungsteil befinden sich die Vorratsbehälter für Chemikalien. Hier befindet sich auch ein kleiner Brenner, in dem Wasserstoff- und Sauerstoff-Gas eingeleitet wird und Wasserdampf verbrannt werden kann. Mit diesem als H_2O_2 -Verbrennung bezeichnetem Verfahren kann ein sehr sauberes Sauerstoff/Wasserdampf-Gemisch hergestellt werden. Die Feuchtigkeit der Oxidation kann dann durch das Verhältnis der Sauerstoff-Moleküle zu den Wassermolekülen eingestellt werden. Zu beachten ist, dass die Gase, die in die Reaktionskammer eingelassen werden, sehr heiß sein können. Die Reaktionsgase werden an einem Ende des Rohres eingelassen und an dem gegenüberliegenden Ende in ein Absaugungssystem wieder herausgeleitet. Die gegenüberliegende Öffnung, durch die die Wafer transportiert werden, wird während des Prozesses geschlossen, um das Eindringen von Umgebungsluft durch Kon-

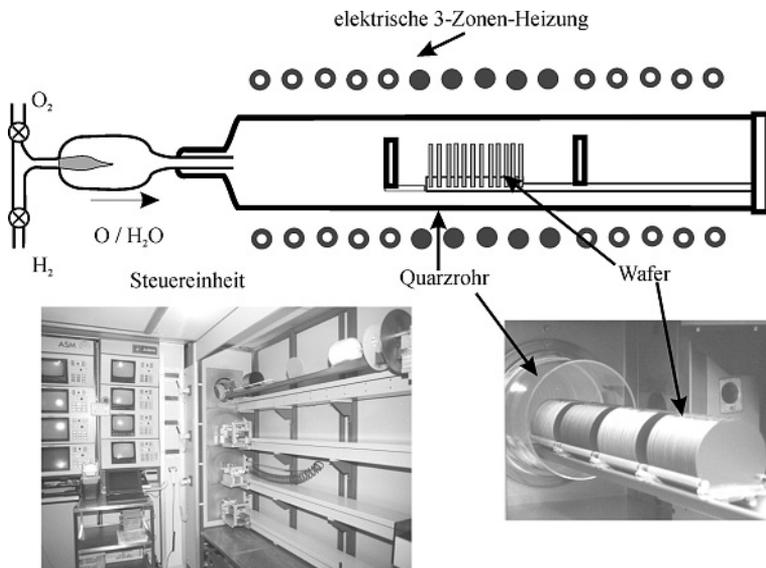


Abb. 5.6: Ein Horizontalofen für die thermische Oxidation.

vektion und Verwirbelung zu verhindern. Wichtig ist, dass die Gasströmung in der Reaktionskammer so verläuft, dass alle Wafer eine gleichmäßige Versorgung mit den Reaktionsgasen erhalten. Ist das nicht der Fall, kann dies durch die Temperaturregelung in geringem Maße ausgeglichen werden.

Merksatz: Der Oxidationsofen muss eine sehr genaue Temperaturregelung und eine gute Gasführung in der Reaktionskammer besitzen, damit über alle Wafer eine gleichmäßig dicke Oxidschicht erzeugt werden kann.

Als Reaktionskammer wird am häufigsten ein zylindrisches Quarzglasrohr eingesetzt, das von Widerstandsheizelementen umgeben ist. Gelagert wird das Rohr an den beiden Enden in Keramikblöcken, die gleichzeitig die äußere Begrenzung der Heizelemente bilden. Aufgrund seiner niedrigen Kosten und der einfachen Bearbeitung ist Quarz das am häufigsten verwendete Material, aus dem sowohl Prozessrohr als auch die Haltevorrichtungen für die Wafer gefertigt sind. Ein geeignetes Quarzrohr hat einen Durchmesser von 250 mm und erreicht bei einer Wandstärke von 5 mm und einer Länge von 2 m ein Gewicht bis 20 kg. Bei hohen Temperaturen über 1200 °C kann Quarzglas weich werden, wodurch sich das Rohr langsam durchbiegt. Deshalb werden öfters auch Siliziumkarbidrohre (SiC) eingesetzt, die temperaturstabiler, aber auch deutlich teurer sind. Das Quarzglas muss frei von Verunreinigungen, insbesondere frei von Alkalimetallen wie Natrium, sein. Diese diffundieren bei hohen Temperaturen schnell durch das Glas und gelangen dann in die Wafer. Die Quarzglasstücke dürfen niemals mit bloßen Händen angefasst werden, um eine Natriumkontamination zu vermeiden. Zur Verringerung der Natriumkontamination wird das Ofenrohr regelmäßig mit einem HCL-Gas gespült. Dabei bildet sich NaCl, welches ausgespült wird. Wird das Rohr ausgebaut, kann es nasschemisch mit Flusssäure gereinigt werden. Die Wafer müssen im Verlauf des Ofenprozesses fest, aber spannungsfrei gehalten werden. Dafür werden sie in Quarzboote eingesetzt, die bis zu 50 Wafer aufnehmen können. Die Boote werden auf einen Tragarm (Paddel) in das Rohr eingefahren. Da hier vier Boote mit bis zu 200 Wafern gleichzeitig aufgeladen werden, muss das Paddel bei einem Horizontalofen sehr stabil gebaut sein, um das sehr hohe Drehmoment aufnehmen zu können. Dieses stabile Paddel muss bei jedem Prozessdurchlauf mit erwärmt werden, wofür viel Zeit und Energie benötigt wird.

Der Ofenbereich ist einer der kritischsten Bereiche für Verunreinigungen. Hier stehen die Wafer nach der Reinigung offen an der Atmosphäre, und Verunreinigungen, die jetzt auf den Wafer gelangen, können bei den hohen Temperaturen im Ofen gut in den Wafer eindiffundieren. Durch einen starken Gasstrom mit viel Inertgas wird die Reaktionskammer ständig gespült, so dass keine Verunreinigungen auf die Wafer gelangen. Da die Wafer häufig noch warm (bis 200 °C) aus dem Ofen herausgefahren werden, entsteht eine warme Aufwärtsströmung, die Verunreinigungen von den unteren Wafern auf die oberen Wafer bringen kann. Hier ist es besser, die Reinstluftfilter neben den Ofenrohren anzubringen und mit einem horizontalen Laminar Flow die Verunreinigungen zu beseitigen.