

1 Nasschemie

1.1 Scheibenreinigung

1.1.1 Der Reinraum

Die Halbleiterfertigung findet in Reinräumen statt um die hochkomplexen Schaltungen der Halbleiterbauteile vor Verunreinigungen zu schützen, die die Funktionsfähigkeit der Elemente beeinflussen können. Die Reinräume werden nach der Größe der Partikel und deren Anzahl pro Kubikfuß (= cbf; 1 Fuß = 30,48 cm) klassifiziert:

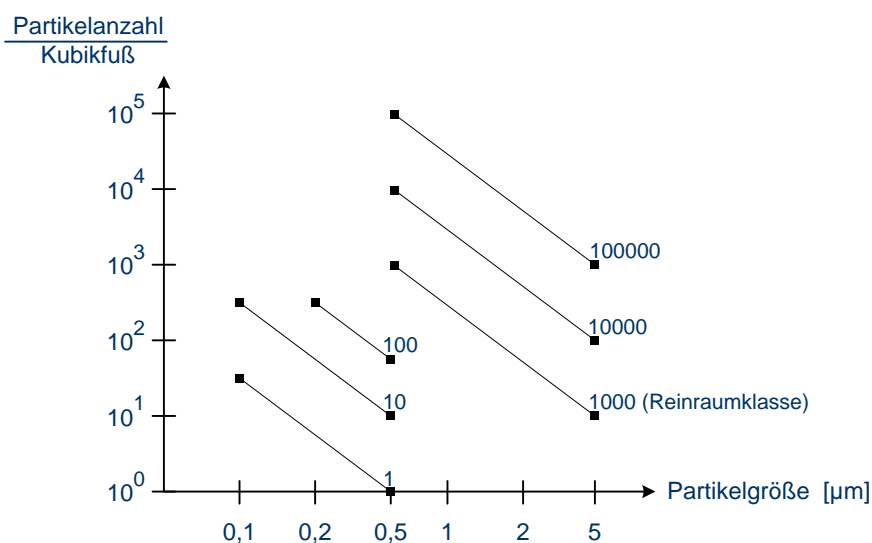


Abb. 1.1: Reinraumklassen

In einem Reinraum Klasse 100 ist die maximal zulässige Partikelgröße $0,5 \mu\text{m}$, es dürfen nicht mehr als 100 solcher Partikel in einem Kubikfuß Luft vorhanden sein. In einem Operationssaal beträgt die Reinraumklasse 100 oder 1000. Stadtluft hat in einem Volumen von 1 cbf 15-100 Millionen Partikel der Größe $5 \mu\text{m}$.

Die Luft in Reinräumen für die Mikroelektronik wird über Feinstfilter gereinigt und dann durch die Decke geblasen. Durch Löcher im Boden wird die Luft abgesaugt. Dieser Laminarstrom der Luft transportiert Partikel von oben nach unten durch den Boden ab, damit keine Verunreinigungen von außen in den Reinraum eindringen können herrscht dort immer etwas Überdruck. Da die von den Produktionsanlagen erwärmte Luft nach oben steigt und sich so mit dem nach unten gerichteten Laminarstrom Verwirbelungen ergeben können, kann der Laminarstrom auch von unten nach oben verlaufen. Dies ist vor allem dann der Fall, wenn die Wafer in Boxen transportiert werden, die direkt an den Anlagen andocken und so geöffnet werden, dass Partikel aus der Umgebung nicht zu den Wafern gelangen können. Dabei handelt es sich in der Regel um sogenannte FOUPs (Front Opening Unified Pod).

Die Fertigung im Reinraum ist in der Abbildung nur der Bereich zwischen rosafarbener Lüftungsanlage und dem gelben Bodenbereich. Darunter befindet sich das Basement mit den Versorgungsanlagen (Pumpen etc.), oben der gesamte Lüftungsbereich. Der Reinraum ist meistens in einzelne Gänge unterteilt (im Bild: Mittelgang, T8, M23), um die Luftverwirbelungen möglichst gering zu halten. Viele Reinräume sind von einem so genannten Grauraum umgeben, in dem sich die Anlagen befinden. Über eine Wand getrennt befinden sich dann nur die Bedienfelder und die Schleusen zum Einbringen der Wafer in die Anlagen im Reinraum.

Das Personal trägt spezielle Reinraumanzüge, die keine Partikel absondern. Dabei bedeckt der Anzug, je nach Bedarf den kompletten Körper. Der Kopf wird entweder mit einem simplen Haarnetz bzw. einer Haube und einem Mundschutz oder mit einer kompletten Maske bedeckt. Zusätzlich gibt es besonders partikelarme Schuhe, evtl. Unterbekleidung und Handschuhe. Im Eingangsbereich des Reinraums können sich eine oder mehrere Luftduschen befinden, die vor Betreten noch einmal alle Partikel vom Anzug abblasen.

1.1.2 Arten der Verunreinigung

Trotz des Reinraums gibt es verschiedene Arten von Verunreinigungen, die hauptsächlich vom Personal in der Fertigungslinie, der Umgebungsluft, von Chemikalien (Gasen, Lösungen) und den Anlagen verursacht werden:

- **mikroskopische Verunreinigungen:** z.B. Partikel aus der Umgebungsluft oder Gasen

- **molekulare Verunreinigungen:** z.B. Kohlenwasserstoff aus Öl in den Pumpsystemen
- **ionische Verunreinigung:** z.B. Handschweiß
- **atomare Verunreinigung:** z.B. Schwermetalle aus Lösungen, Abrieb von Festkörpern

1.1.3 Mikroskopische Verunreinigungen

Mikroskopische Verunreinigungen sind Partikel, die sich an der Waferoberfläche anlagern. Quellen dieser Verunreinigungen sind die Umgebungsluft, Kleidung des Personals, Abriebe an beweglichen Teilen in Prozessanlagen, unzureichend gefilterte Flüssigkeiten, wie Ätzchemikalien oder Reinigungs- und Entwicklerlösungen, oder Ätzrückstände nach Prozessen beim Trockenätzen.

Mikroskopische Verunreinigungen verursachen Abschattungseffekte, wenn sie z.B. an der Scheibenoberfläche die Belichtung des Fotolacks verhindern, bei der Kontaktbelichtung kommt es zu schlechten Auflösungen, wenn sich relativ große Partikel zwischen Maske und Scheibe befinden. Des Weiteren können sie bei Implantationsprozessen oder beim Trockenätzen beschleunigte Ionen von der Scheibenoberfläche fernhalten.

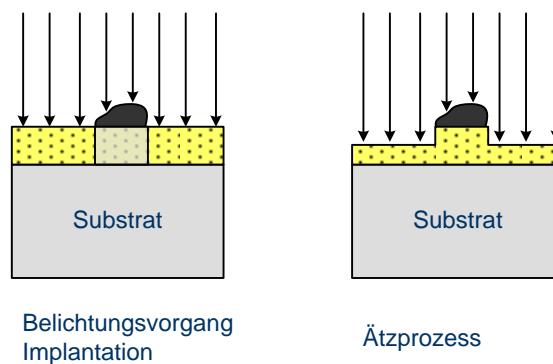
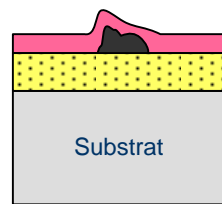


Abb. 1.2: Abschattung bei Ätz- und Implantationsprozessen durch Partikel

Partikel können auch von Schichten eingeschlossen werden, so dass Unebenheiten entstehen. Nachfolgende Schichten können an diesen Stellen aufplatzen oder es sammelt sich Fotolack an, in Folge dessen es durch die zu dicke Lackschicht zu nicht vollständig belichteten Bereichen kommt.



Unebenheiten durch
Partikeleinschlüsse

Abb. 1.3: Partikeleinschluss

1.1.4 Molekulare Verunreinigungen

Molekulare Verunreinigungen resultieren aus Lack- und Lösemittelresten auf den Wafern oder durch Ölnebelablagerungen aus Vakuumpumpen. Diese Verunreinigungen können sich sowohl auf der Scheibenoberfläche befinden, als auch in die Schichten eindiffundieren. Die oberflächlich anhaftenden Verunreinigungen behindern teilweise die Haftung nachfolgender Schichten, im Falle von Metallisierungen (dünne Leiterbahnen) erheblich. Durch die Diffusion in Oxide wird die elektrische Belastbarkeit dieser Schichten verschlechtert.

1.1.5 Alkalische und metallische Verunreinigungen

Die Hauptquelle dieser Verunreinigungen ist der Mensch, der ständig über die Haut, aber auch über die Atemluft Salze aussondert. Aber auch durch unzureichend deionisiertes Wasser gelangen (Alkali-)Ionen von Natrium oder Kalium auf die Scheiben. Schwermetalle die in Ätzlösungen vorhanden sind können zur Kontamination führen. Durch Strahlen in Anlagen (Implanter, Trockenätzen) kann Material von Wänden abgesputtert werden, das sich dann auf den Scheiben niederschlägt.

Ionische Verunreinigungen beeinflussen beispielsweise die elektrischen Eigenschaften von MOS-Transistoren, da ihre Ladung die Schwellspannung - also die Spannung ab der der Transistor leitend wird - verändert. Schwermetalle wie Eisen oder Kupfer liefern freie Elektronen, so dass die Leistungsaufnahme in Dioden steigt. Metalle können aber auch Rekombinationszentren für freie Ladungsträger bilden, so stehen in der Schaltung nicht genug freie Ladungsträger zur einwandfreien Funktion zu Verfügung.

1.1.6 Reinigungstechniken

Die Scheiben werden nach jedem nasschemischen Prozessschritt in Reinstwasser gespült, aber auch nach anderen Prozessen werden die Scheiben von Verunreinigungen befreit. Dabei gibt es verschiedene Reinigungstechniken, die die unterschiedlichen Verschmutzungen beseitigen. Der Verbrauch an Reinstwasser in einer Halbleiterfertigung ist dabei extrem hoch und beträgt mehrere Millionen Liter im Jahr. Dabei befinden sich im Reinstwasser fast keine Verunreinigungen mehr, 1-2 ppm (parts per million = Anzahl an Verunreinigungen pro Millionen Wasserteilchen) sind erlaubt (Beispiel, Stand 2002). Das Wasser wird meist direkt vor Ort in Aufbereitungsanlagen gereinigt.

Eine Möglichkeit der Scheibenreinigung ist das Ultraschallbad, bei dem die Wafer in eine Lösung aus Wasser und Ultraschallreinigungs- und Netzmitteln gegeben werden. Durch die Ultraschallanregung lösen sich Partikel von der Oberfläche, Metalle und molekulare Verunreinigungen werden vom Reinigungsmittel teilweise gebunden. Nicht stark anhaftende Partikel können auch mit Stickstoff abgeblasen werden.

Zum Entfernen organischer Verunreinigungen wie Fett, Öl oder Hautschuppen eignen sich Lösungsmittel wie Aceton oder Ethanol. Diese können jedoch Kohlenstoffrückstände hinterlassen.

Ionische Verunreinigungen (Ionen von Kalium, Natrium etc.) werden durch Spülen mit deionisiertem Wasser entfernt. Auch die Reinigung mit rotierenden Bürsten und einer Reinigungsflüssigkeit ist möglich. Jedoch werden bei strukturierten Scheiben die Partikel an den Kanten angelagert, die Bürsten können die Scheibenoberfläche beschädigen. Kontaktlöcher oder andere Vertiefungen können mit einer Hochdruckreinigung bei ca. 50 bar ausgespült werden. Hierbei werden jedoch keine ionischen oder metallischen Verunreinigungen entfernt.

Die Reinigung mit Wasser und verschiedenen Reinigungsmitteln reicht jedoch oft nicht aus. Oftmals müssen Verunreinigungen mit aggressiven Ätzlösungen entfernt oder Oberflächen gezielt minimal abgetragen werden. Gemische aus Wasserstoffperoxid und Schwefelsäure oder Ammoniak oder die Carosche Säure/Piranha-Lösung (Schwefelsäure mit Wasserstoffperoxid) können organische Verunreinigungen bei ca. 90 °C durch Oxidation ablösen.

Ein Gemisch aus Salzsäure und Wasserstoffperoxid bildet Alkalimetalle zu leicht löslichen Chloriden (Salzen) aus, Schwermetalle bilden Komplexe und gehen in Lösung. Mit Flusssäure kann natürliches Oxid entfernt werden, mit einer gezielt aufgebracht

Schicht Oxid mit Wasserstoffperoxid lässt sich die Oberfläche dagegen auch schützen.

Neben der Spülung der Scheiben nach jedem nasschemischen Prozessschritt, durchlaufen die Wafer bei einer vollständigen Reinigung eine Reihe von Reinigungsschritten nacheinander. Dabei ist die Reihenfolge der Reinigungsverfahren wichtig, da sich diese teilweise gegenseitig in der Reinigungswirkung behindern. Die Reinigungssequenz sieht beispielsweise wie folgt aus:

- Abblasen von Partikeln mit Stickstoff
- Reinigung im Ultraschallbad
- Entfernen von organischen Verunreinigungen mit H_2SO_4 - H_2O_2 (Carosche Säure)
- Entfernen feinerer organischer Verunreinigungen mit einer NH_4 - H_2O_2 -Lösung
- Entfernen von metallischen Verunreinigungen mit Salzsäure und Wasserstoffperoxid
- Trocknen der Scheiben in der Trockenschleuder unter heißer Stickstoffatmosphäre

Nach jedem Reinigungsschritt werden die Scheiben in Reinstwasser gespült, gegebenenfalls natürliches Oxid mit Flusssäure entfernt. Je nach aktueller Scheibenoberfläche sehen die Reinigungssequenzen unterschiedlich aus, da die Lösungen manche Schichten angreifen. Bei den immer kleiner werdenden Strukturen wird auch die Reinigung mehr und mehr erschwert. Nicht nur, dass sich kleine Öffnungen nicht so leicht erreichen lassen. Die Oberflächenspannung und Kapillarwirkungen können Strukturen umkippen lassen und so die Schaltung zerstören.