Halbleitertechnologie von A bis Z

Nasschemie

Ätztechnik allgemein 3
Übersicht 3
Nassätzen 4
Prinzip 4
Anforderung 5
Tauchätzung 6
Sprühätzung 7
Anisotrope Siliciumätzung 8
Ätzlösungen für isotrope Ätzungen 10
Trocknen der Scheiben 12
Scheibenreinigung 13
Der Reinraum 13
Arten der Verunreinigung 14
Mikroskopische Verunreinigungen 15
Molekulare Verunreinigungen 16
Alkalische und metallische Verunreinigungen 16
Reinigungstechniken 17

Ätztechnik allgemein

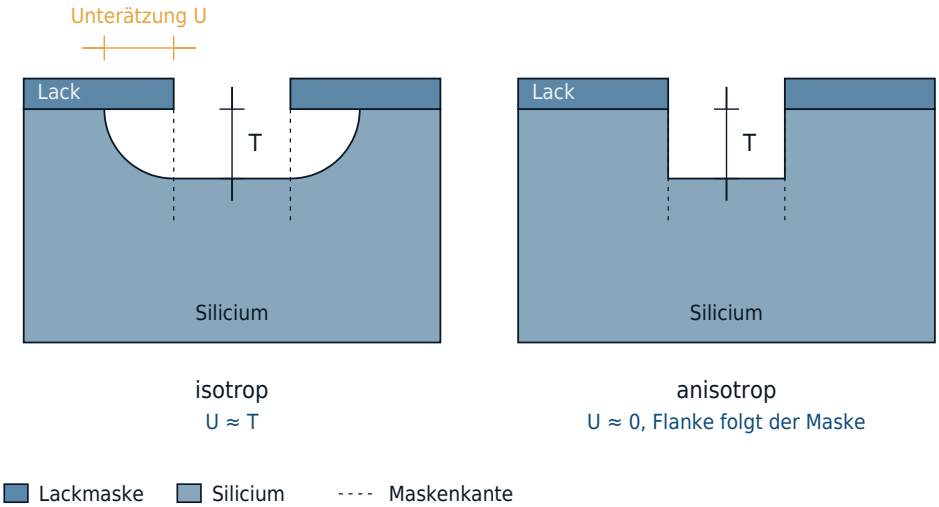
Übersicht

In der Halbleiterfertigung müssen verschiedenste Schichten geätzt werden. Sei es zur ganzflächigen Entfernung oder zum Übertragen eines strukturierten Fotolackfilms in eine darunter liegende Schicht. Dabei lässt sich die Ätztechnik in das nasschemische Ätzen und das Trockenätzen unterteilen. Darüber hinaus unterscheidet man zwischen isotropen und anisotropen Prozessen, sowie dem chemischen und dem physikalischen Charakter des Ätzprozesses.

Bei einem isotropen Ätzprozess geschieht die Ätzung in alle Richtungen. So werden Schichten nicht nur in ihrer Dicke abgetragen, sondern auch in ihrer lateralen Ausdehnung. Bei anisotropen Ätzungen wird die Schicht nur in einer Richtung abgetragen. Je nach Prozess kann ein isotroper oder ein anisotroper Ätzvorgang erwünscht sein.

Isotrope und anisotrope Ätzung

Bei idealer Isotropie ist die Unterätzung etwa so groß wie die Ätztiefe



Nasschemisches Ätzen greift meist ungerichtet an: Die Lösung erreicht die Fläche unter der Maske ebenso wie den Grabenboden – die Struktur wird dadurch breiter als die Maskenöffnung. Anisotrope Verfahren wie RIE ätzen dagegen gerichtet und übertragen die Maskengeometrie nahezu unverändert.

Ein wichtiger Parameter der Ätzprozesse ist die Selektivität. Diese gibt das Abtragsverhältnis zweier Schichten an. Ist die Selektivität 2:1, so wird die eine Schicht doppelt so schnell durch den Ätzprozess entfernt wie die andere.

Die im Folgenden beschriebene Nasschemie wird jedoch nicht allein zum Ätzen

von Schichten verwendet, sondern kommt auch bei anderen Prozessen zum Einsatz:

- Nassätzen: zum ganzflächigen Entfernen von dotierten und undotierten Oxidschichten
- Scheibenreinigung
- Lackentfernen
- Rückseitenbehandlung: Entfernen von Schichten die bei Ofenprozessen auf den Scheibenrückseiten entstanden sind
- Polymerentfernung: Entfernung von Nebenprodukten die beim Plasmaätzen entstehen und sich auf den Scheiben festsetzen
- Kantenentschichtung: gezieltes Entfernen von Schichten am äußersten Rand der Scheibe, wo sie später abplatzen und Partikel erzeugen würden

Auf Grund des meist isotropen Ätzprofils wird das Nassätzen kaum zur Strukturierung verwendet. Eine Ausnahme ist hier die Mikromechanik. Auf Grund der Gitterstruktur von Siliciumeinkristallen können mit nasschemischen Ätzlösungen definierte Strukturen erzeugt werden, welche bspw. Flankenwinkel von 90° oder 54,74° besitzen.

Aus dem Verlust der Strukturierungsaufgabe folgt allerdings nicht, dass die Nasschemie an Bedeutung verloren hätte – im Gegenteil. Je kleiner die Strukturen wurden, desto mehr Prozessschritte kamen hinzu und desto empfindlicher reagiert das Bauelement auf Verunreinigungen. Ein moderner Fertigungsablauf enthält mehr nasschemische Schritte als je zuvor, nur sind es überwiegend Reinigungs-, Abtrags- und Vorbehandlungsschritte statt Strukturierungen. Gleichzeitig hat sich die Anlagentechnik von der Charge zur Einzelscheibenbearbeitung verschoben.

Nassätzen

Prinzip

Das Prinzip beim Nassätzen ist die Umwandlung des festen Materials der Schicht in flüssige Verbindungen unter zu Hilfenahme einer chemischen Lösung. Die Selektivität ist sehr hoch, da die eingesetzten Chemikalien genau auf die vorhandenen Schichten abgestimmt werden können; sie beträgt bei den meisten Lösungen mehr als 100:1.

Der Vorgang läuft in drei Teilschritten ab, die nacheinander durchlaufen werden müssen:

1. Die reaktiven Teilchen gelangen aus der Lösung an die Oberfläche der zu

ätzenden Schicht.
2. An der Oberfläche findet die chemische Reaktion statt; dabei entsteht eine lösliche Verbindung.
3. Das Reaktionsprodukt löst sich von der Oberfläche und wird in die Lösung abtransportiert.

Welcher dieser Schritte der langsamste ist, bestimmt das Verhalten des gesamten Prozesses. Ist die eigentliche Reaktion der Engpass, spricht man von einem reaktionsbegrenzten Prozess: Die Ätzrate hängt dann stark von der Temperatur ab und steigt näherungsweise exponentiell mit ihr an, dafür ätzt der Prozess über die ganze Scheibe gleichmäßig. Ist dagegen der An- und Abtransport der Engpass, ist der Prozess diffusionsbegrenzt. Die Temperaturabhängigkeit ist dann schwächer, dafür wirkt sich jede Ungleichmäßigkeit der Strömung unmittelbar auf den Abtrag aus – an den Rändern der Scheibe wird schneller geätzt als in der Mitte.

Für die Praxis folgt daraus: Reaktionsbegrenzte Prozesse werden über eine sehr genaue Temperierung geführt, diffusionsbegrenzte über die Bewegung der Lösung, also über Umwälzung, Rotation der Scheibe oder Ultraschall. In engen Gräben und Kontaktlöchern wird jeder Prozess diffusionsbegrenzt, weil die Lösung dort kaum ausgetauscht wird. Das ist einer der Gründe, weshalb sich die Nassätzung für feine Strukturen nicht eignet.

Anforderung

Folgende Anforderungen müssen von den chemischen Lösungen erfüllt werden:

- die Maskierschicht darf nicht angegriffen werden
- die Selektivität muss hoch sein, sowohl gegenüber der Maskierung als auch gegenüber der darunter liegenden Schicht
- die Ätzung muss durch Verdünnung mit Wasser gestoppt werden können
- es dürfen sich keine gasförmigen Reaktionsprodukte bilden, da die Bläschen vereinzelt Bereiche abschatten können
- konstante Ätzrate über lange Zeit
- die Reaktionsprodukte müssen direkt gelöst werden, damit keine Partikel die Ätzlösung verunreinigen
- die Lösung muss die Oberfläche vollständig benetzen; wasserabweisende Flächen und enge Gräben werden sonst nicht erreicht
- keine Einträge von Alkali- oder Schwermetallionen, die als bewegliche Ladungen in das Oxid gelangen und Bauelemente unbrauchbar machen würden
- gute Umweltverträglichkeit und leichte Entsorgung

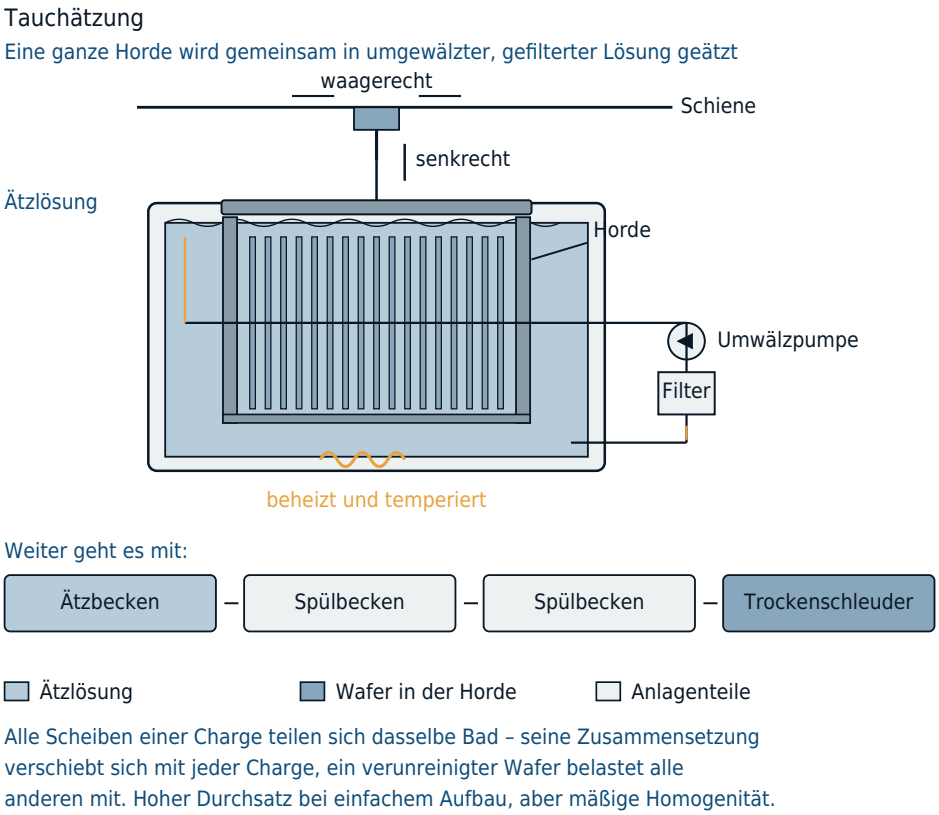
Die letzte Anforderung ist in der Praxis die schwierigste. Die wirksamsten Ätzlösungen sind zugleich die gefährlichsten, und ein Teil der eingesetzten

Chemikalien lässt sich nicht durch harmlosere ersetzen. Aufwand für Abluft, Abwasser und Arbeitsschutz macht daher einen erheblichen Anteil der Betriebskosten einer nasschemischen Anlage aus.

Tauchätzung

Beim Tauchätzverfahren wird eine ganze Horde mit Wafern auf einmal in einem Becken mit der Ätzlösung prozessiert. Durch Filter und Umwälzpumpen werden Partikel von den Wafern ferngehalten. Da die Konzentration der Ätzlösung mit zunehmender Menge an bearbeiteten Scheiben abnimmt, muss sie oft erneuert werden.

Die Ätzrate, also der Materialabtrag pro Zeit, muss genau bekannt sein, um reproduzierbare Ätzungen durchführen zu können. Eine exakte Temperierung der Ätzlösung ist erforderlich, da die Ätzrate der meisten chemischen Lösungen mit der Temperatur zunimmt.



Die Hebevorrichtung kann die Horde waagerecht und senkrecht transportieren. Nachdem die Wafer geätzt wurden wird die Ätzung auf den Wafern durch Spülen in mehreren Tauchbecken gestoppt; anschließend kommen die Wafer in eine Trockenschleuder.

Die Vorteile der Tauchätzung sind die hohe Durchsatzrate an Wafern und der relativ einfache Aufbau der Ätzanlagen. Die Homogenität des Schichtabtrags ist jedoch gering.

Ein grundsätzliches Problem des Verfahrens ist das Bad selbst: Alle Scheiben einer Charge sehen dieselbe, im Lauf der Zeit veränderliche Lösung. Ihre Zusammensetzung verschiebt sich mit jeder bearbeiteten Charge, gelöstes Material reichert sich an, und ein einzelner verunreinigter Wafer kann die ganze Charge und alle nachfolgenden beeinträchtigen. Die Konzentration wird deshalb laufend gemessen und nachdosiert, und die Standzeit eines Bades ist begrenzt.

Für kritische Schritte ist die Tauchätzung daher weitgehend durch die Einzelscheibenbearbeitung ersetzt worden. Sie hat sich aber dort gehalten, wo lange Ätzzeiten bei hohen Temperaturen anfallen und die Homogenitätsanforderung moderat ist – das klassische Beispiel ist das Entfernen von Siliciumnitrid in heißer Phosphorsäure, das je nach Schichtdicke eine Stunde und länger dauert und einzeln pro Scheibe unwirtschaftlich wäre.

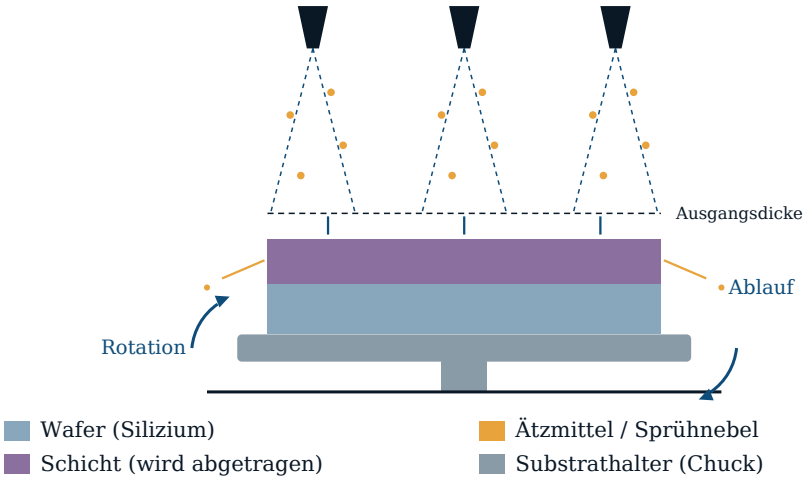
Sprühätzung

Die Sprühtechnik ist vergleichbar mit der Sprühentwicklung in der Fototechnik. Durch die Rotation auf dem Chuck unter stetiger Zugabe frischer Ätzlösung ist die Homogenität sehr gut. Bläschen können sich hier auf Grund der schnellen Drehung nicht bilden, jedoch ist auch hier der Nachteil, dass jeder Wafer einzeln prozessiert werden muss.

Alternativ zu der sequentiellen Prozessierung gibt es auch die Sprühätzung mehrerer Horden gleichzeitig in einer Trommel, bei der die Wafer schnell um die Sprühvorrichtung im Zentrum kreisen. Direkt im Anschluss werden die Scheiben unter Rotation in heißer Stickstoffatmosphäre getrocknet.

Sprühätzung

Ganzflächiger Schichtabtrag ohne Maskierung



Beim ganzflächigen Sprühätzen wird die Ätzlösung ohne strukturierende Maske gleichmäßig auf die gesamte Waferoberfläche gesprüht. Die Rotation sorgt für eine homogene Verteilung und einen kontrollierten, ganzflächigen Schichtabtrag bis zur gewünschten Zieldicke.

Was als Nachteil begann, ist heute der Regelfall: Die Einzelscheibenbearbeitung hat sich für nahezu alle kritischen nasschemischen Schritte durchgesetzt. Der Grund liegt in der Kontrolle. Jede Scheibe sieht ausschließlich frische Chemie, die Prozesszeit ist auf die Sekunde einstellbar, und ein Fehler betrifft immer nur eine Scheibe statt einer ganzen Charge.

Eine moderne Einzelscheibenanlage verfügt über mehrere schwenkbare Düsen, die nacheinander verschiedene Medien auf die rotierende Scheibe geben – Ätzlösung, Spülwasser, Trocknungsmittel – ohne dass die Scheibe den Prozessraum verlässt. Der Verbrauch je Scheibe liegt dabei um Größenordnungen unter dem eines Bades, was die Kosten für Chemie und Entsorgung erheblich senkt.

Möglich wird damit auch, was in einem Becken grundsätzlich nicht geht: die räumlich begrenzte Behandlung einer Scheibe. Über eine Düse am Rand lässt sich ausschließlich die äußerste Kante entschichten, über eine Zuführung von unten ausschließlich die Rückseite behandeln, während die Vorderseite durch einen Stickstoffstrom geschützt bleibt.

Anisotrope Siliciumätzung

Auch beim Nassätzen lässt sich ein nahezu anisotropes Profil erzielen, indem man die unterschiedliche Ätzrate der Kristallebenen ausnutzt. Ursache ist die Zahl der Bindungen, mit denen ein Siliciumatom in der jeweiligen Ebene

gehalten wird: Die dicht belegte {111}-Ebene wird erheblich langsamer abgetragen als {100} und {110} – in Kalilauge um mehr als den Faktor 100. Die Ätzung läuft deshalb so lange in die Tiefe, bis sie auf {111}-Ebenen trifft; diese bleiben stehen und bilden die Flanken. Die Form der Struktur ergibt sich damit aus der Kristallorientierung der Scheibe, nicht aus der Ätzzeit.

Welche Profile daraus entstehen – V-Gräben und Trapeze auf (100)-Scheiben, senkrechte Wände auf (110)-Scheiben – und wie sich die Ätztiefe aus der Maskenöffnung ergibt, ist im Kapitel zur Mikromechanik ausführlich beschrieben.

Mehr im Kapitel Anisotropes Ätzen von Silicium →

Ätzlösungen

Die Ätzung erfolgt mit Kali-, Natron- oder Lithiumlauge (KOH, NaOH, LiOH), mit Tetramethylammoniumhydroxid (TMAH) oder mit einer EDP-Lösung (ein Gemisch aus Wasser, Pyrazin, Brenzkatechin und Ethylendiamin). Verantwortlich für die Reaktion ist in jedem Fall die OH^--Gruppe (Hydroxidgruppe) der Stoffe:

$$Si + 2OH^- + 2H_2O \rightarrow SiO_2(OH)_2^{2-} + 2H_2$$

Die Wahl der Lösung ist weniger eine Frage der Ätzrate als eine Frage der Verträglichkeit mit der übrigen Fertigung. Kalilauge ätzt am stärksten anisotrop, bringt aber Kaliumionen ein: Alkaliionen sind im Gateoxid beweglich, verschieben die Einsatzspannung von Transistoren und machen ein Bauelement unbrauchbar. In einer Fertigungslinie, in der auch integrierte Schaltungen entstehen, ist Kalilauge deshalb ausgeschlossen. TMAH enthält keine Metallionen und ist mit der CMOS-Fertigung verträglich; die Anisotropie fällt geringer aus, dafür wird Siliciumdioxid kaum angegriffen. EDP wird wegen seiner Giftigkeit heute weitgehend gemieden. TMAH ist als Lösung für die Bearbeitung ebenfalls keineswegs harmlos, sondern über die Haut hochgiftig – in deutlich verdünnter Form, nämlich als 2,38-prozentige Lösung, ist derselbe Stoff der Standardentwickler der Fototechnik.

Begrenzen der Ätztiefe

Da die Ätzung von selbst nur an {111}-Ebenen stoppt, muss die Tiefe auf andere Weise festgelegt werden, wenn eine Membran definierter Dicke entstehen soll. Üblich sind zwei Wege: eine sehr hoch mit Bor dotierte Schicht, die von der Lauge kaum noch angegriffen wird, oder eine elektrochemische Führung, bei der ein p-n-Übergang unter Spannung gesetzt wird und die Ätzung an ihm zum Stehen kommt.

Anwendungen

Für die Strukturierung integrierter Schaltungen spielt die anisotrope Nassätzung keine Rolle. Außerhalb davon ist sie ein Standardverfahren:

- Mikromechanik: Membranen für Drucksensoren, Massen für Beschleunigungssensoren, Düsen für Tintenstrahldruckköpfe
- Solarzellen: eine kurze Behandlung in verdünnter Lauge erzeugt auf (100)-Silicium eine dichte Folge kleiner Pyramiden. Diese Textur lässt einfallendes Licht mehrfach auf die Oberfläche treffen und senkt den Reflexionsgrad erheblich.
- Optik und Aufbautechnik: V-Gräben zur Aufnahme und Ausrichtung von Glasfasern, Justierstrukturen für die Montage

Ätzlösungen für isotrope Ätzungen

Für die jeweiligen Materialien stehen unterschiedliche Ätzlösungen zur Verfügung. Oxidschichten werden in der Halbleiterindustrie mit Flusssäure HF geätzt:

$SiO_2 + 6HF \rightarrow H_2SiF_6 + 2H_2O$

Die Lösung wird dabei mit NH_4F gepuffert um die HF-Konzentration konstant zu halten. Bei einer Mischung aus einer 40-prozentigen NH_4F-Lösung und 49-prozentigen Flusssäure (Verhältnis 10:1) beträgt die Ätzrate bei thermischem Oxid 50 nm/min. TEOS-Oxide werden mit ca. 150 nm/min und PECVD-Oxide mit ca. 350 nm/min deutlich schneller geätzt. Die Selektivität gegenüber kristallinem Silicium, Siliciumnitrid und Polysilicium ist wesentlich größer als 100:1.

Dass die Ätzrate so stark von der Herkunft des Oxids abhängt, ist dabei kein Nebeneffekt, sondern ein nützliches Werkzeug: Über die Ätzrate in gepufferter Flusssäure lässt sich umgekehrt die Dichte und damit die Qualität einer abgeschiedenen Oxidschicht beurteilen.

Eine kurze Behandlung in stark verdünnter Flusssäure, der HF-Dip, entfernt das natürliche Oxid, das sich auf jeder Siliciumoberfläche an Luft innerhalb kurzer Zeit bildet. Er steht deshalb vor vielen Prozessen, bei denen ein sauberer Kontakt zum Silicium nötig ist, etwa vor der Epitaxie, vor der Gateoxidation oder vor dem Aufbringen von Metall. Die Oberfläche ist danach mit Wasserstoff abgesättigt und damit wasserabweisend – sie perlt sichtbar ab. Da sich sofort wieder neues Oxid bildet, muss der nachfolgende Schritt zügig folgen.

Siliciumnitrid wird mit heißer Phosphorsäure H_3PO_4 bei etwa 160 °C geätzt. Dabei ist die Selektivität zu SiO_2 jedoch mit 10:1 sehr gering. Bei Polysilicium wird die Selektivität zum Nitrid im Wesentlichen vom Gehalt der Phosphorsäure

bestimmt. Um die Selektivität gegenüber Oxid zu erhöhen, wird der Lösung gelöstes Silicium zugesetzt, so dass sie bezüglich Siliciumdioxid abgesättigt ist und dieses kaum noch angreift.

Kristallines und polykristallines Silicium, werden zunächst mit Salpetersäure (HNO_3) oxidiert, das Siliciumdioxid wird dann mit Flusssäure geätzt:

1. $3Si + 4HNO_3 \rightarrow 3SiO_2 + 4NO + 2H_2O$
2. $SiO_2 + 6HF \rightarrow H_2SiF_6 + 2H_2O$

Aluminium wird bei ca. 50 °C mit einer Mischung aus Phosphor-, Salpeter- und Essigsäure geätzt. Die Salpetersäure oxidiert das Aluminium, die Phosphorsäure löst das entstandene Oxid, und die Essigsäure setzt die Oberflächenspannung herab, damit die Lösung die Struktur vollständig benetzt und der entstehende Wasserstoff nicht als Bläschen haften bleibt. Titan wird mit einer Lösung aus Ammoniakwasser NH_4OH, Wasserstoffperoxid H_2O_2 und Wasser (Verhältnis 1:3:5) geätzt. Da die Lösung auch Silicium angreift wenn das Peroxid verbraucht ist, ist die Standzeit der Lösung gering. Dieselbe Mischung dient in stärkerer Verdünnung als Reinigungslösung für die Scheibenreinigung.

Umgang mit Flusssäure

Flusssäure nimmt unter den Prozesschemikalien eine Sonderstellung ein und verdient eine ausdrückliche Warnung. Sie ist nur eine schwache Säure und verursacht auf der Haut zunächst kaum Schmerz, dringt aber tief in das Gewebe ein. Dort bindet das Fluorid das Calcium des Körpers, was zu Verätzungen bis in den Knochen und zu Störungen des Herzrhythmus führen kann. Beschwerden treten oft erst Stunden nach dem Kontakt auf, wenn der Schaden bereits entstanden ist. Der Umgang setzt daher entsprechende Schutzausrüstung, ein bereitliegendes Calciumgluconat-Gel und eine Unterweisung voraus – in der Fertigung wird Flusssäure ausschließlich in geschlossenen Anlagen gehandhabt.

Einordnung

Generell eignet sich das nasschemische Ätzen für das Abtragen kompletter Schichten auf einem Wafer. Die Selektivität von der zu ätzenden Schicht zu der darunter liegenden ist meist sehr gut, so dass keine Gefahr besteht falsche Schichten abzutragen. Zudem ist der Abtrag pro Zeiteinheit sehr hoch, in Tauchätzverfahren lassen sich viele Scheiben gleichzeitig ätzen. Bei kleinen Strukturen kann die Nassätzung jedoch nicht eingesetzt werden, da das isotrope Ätzprofil dafür nicht geeignet ist. In diesem Fall werden die Schichten mit Trockenätzverfahren anisotrop abgetragen.

Bei sehr feinen Strukturen kommt ein zweiter Grund hinzu, der nichts mehr mit dem Ätzprofil zu tun hat: Die Flüssigkeit muss am Ende wieder von der Scheibe herunter, und genau dabei können die freigelegten Strukturen zerstört werden.

Trocknen der Scheiben

Am Ende jedes nasschemischen Schrittes steht das Spülen mit hochreinem Wasser und das Trocknen. Was nach einem Nebenschritt klingt, ist bei feinen Strukturen der kritischste Teil des gesamten Prozesses.

Warum Trocknen ein Problem ist

Solange eine Flüssigkeit zwischen zwei benachbarten Stegen steht, zieht ihre Oberflächenspannung die Stege zusammen. Die Kraft wächst, je enger die Strukturen stehen und je höher sie sind. Berühren sich zwei Stege einmal, halten sie über die Bindungen ihrer Oberflächen aneinander fest und richten sich nicht wieder auf. Dieser Strukturkollaps – im Englischen als *stiction* bezeichnet, aus *static friction* – ist bei schlanken Stegen der häufigste Ausfallgrund am Ende eines Nassprozesses. Betroffen sind vor allem freistehende Elemente der Mikromechanik und hohe schmale Lackstege der Fototechnik.

Ein Trocknen durch bloßes Abschleudern oder Verdampfen verschärft das Problem, weil die zurückweichende Flüssigkeitsfront dabei genau durch die Struktur hindurchläuft. Die Verfahren zielen deshalb alle darauf, den Übergang von flüssig zu trocken entweder zu entschärfen oder ganz zu vermeiden.

Verfahren

- Schleudertrocknen: Die Scheibe rotiert schnell, die Flüssigkeit wird nach außen abgeschleudert, ein Stickstoffstrom trocknet nach. Einfach und schnell, aber für feine Strukturen ungeeignet und anfällig für zurückbleibende Trockenflecken.
- Isopropanol-Trocknung: Das Spülwasser wird durch Isopropanol verdrängt, dessen Oberflächenspannung nur etwa ein Drittel der von Wasser beträgt. Entsprechend geringer fallen die Kapillarkräfte aus.
- Marangoni-Trocknung: Die Scheibe wird langsam aus dem Wasser gezogen, während an der Wasseroberfläche gezielt Isopropanoldampf zugeführt wird. Der dadurch entstehende Unterschied der Oberflächenspannung entlang der Grenzfläche zieht den Wasserfilm von der Scheibe ab, so dass diese trocken aus dem Bad kommt und keine Flüssigkeit auf ihr verdampfen muss.
- Trocknen mit überkritischem Kohlendioxid: Die Flüssigkeit wird durch Kohlendioxid ersetzt, das anschließend über Druck und Temperatur in den überkritischen Zustand gebracht wird. In diesem Zustand gibt es keine Grenzfläche zwischen flüssig und gasförmig mehr und damit auch keine Oberflächenspannung; das Kohlendioxid kann rückstandsfrei abgelassen werden. Das aufwendigste, aber auch schonendste Verfahren – es kommt dort zum Einsatz, wo alle anderen an ihre Grenze kommen.

Der gleiche Gedanke steht hinter der Entwicklung trockener Alternativen zu einzelnen Nassschritten: Wo eine Schicht mit einem Gas statt mit einer Flüssigkeit entfernt werden kann, entfällt das Problem von vornherein.

Scheibenreinigung

Der Reinraum

Die Halbleiterfertigung findet in Reinräumen statt um die hochkomplexen Schaltungen der Halbleiterbauteile vor Verunreinigungen zu schützen, die die Funktionsfähigkeit der Bauteile beeinflussen können. Die Reinräume werden nach der Größe der Partikel und deren Anzahl pro Kubikfuß (= cbf; 1 Fuß = 30,48 cm) bzw. nach DIN/ISO pro 1 m^3 klassifiziert:

Zulässige Anzahl an Partikeln pro 1m^3

Klasse ↓	≥ 0,1 µm	≥ 0,2 µm	≥ 0,3 µm	≥ 0,5 µm	≥ 1,0 µm	≥ 5,0 µm
ISO 1	10	2				
ISO 2	100	24	10	4		
ISO 3	1.000	237	102	35	8	
ISO 4	10.000	2.370	1.020	352	83	
ISO 5	100.000	23.700	10.200	3.520	832	29
ISO 6	1.000.000	237.000	102.000	35.200	8.320	293
ISO 7	10.000.000	2.370.000	1.020.000	352.000	83.200	2.930

So dürfen sich in einem Klasse-3-Reinraum maximal 1.000 Partikel mit einem Durchmesser ≥0,1 µm befinden, 237 Partikel ≥0,2 µm, 102 Partikel ≥0,3 µm, 35 Partikel ≥0,5 µm und 8 Partikel ≥1 µm. Zum Vergleich: Ein Operationssaal wird je nach Anforderung mit ISO 5 im Laminar-Flow-Bereich über dem Tisch bis ISO 7 im übrigen Raum betrieben, ein Wohnraum liegt bei ISO 8 bis 9. In 1 m^3 Stadtluft finden sich einige hundert Millionen Partikel – davon liegt allerdings der weit überwiegende Teil unter 1 µm; Partikel ab 5 µm bewegen sich eher im Bereich einiger hunderttausend.

Die Luft in Reinräumen für die Mikroelektronik wird über Feinstfilter gereinigt und dann durch die Decke eingeleitet. Durch Löcher im Boden wird die Luft abgesaugt, so dass dieser Laminarstrom Partikel von oben nach unten durch den Boden abtransportiert. Damit keine Verunreinigungen von außen in den Reinraum eindringen können herrscht dort in der Regel ein leichter Überdruck. Um die Wafer bestmöglich gegen Partikel zu schützen, werden diese in Transportboxen von einer Produktionsanlage zur nächsten transportiert. In modernen Reinräumen handelt es sich dabei um so genannte FOUPs (Front

Opening Unified Pod), welche direkt an die Ladestationen der Maschinen andocken und so geöffnet werden, dass die Wafer vom FOUP in die Anlage gelangen, ohne der Reinraumluft ausgesetzt zu werden.

Da die Wafer in den FOUPs vollständig von der Umgebungsluft im Reinraum abgeschottet sind, kann in den Transportboxen eine andere Reinraumklasse herrschen, als im Reinraum selbst. So ist es möglich, die großen Fertigungsbereiche mit einer relativ hohen Reinraumklasse von ISO 5 zu betreiben, während in den FOUPs eine Reinraumklasse von ISO 1 oder ISO 2 herrscht. Dadurch können enorme Kosten gespart werden, da nur ein kleines Volumen der höchsten Reinheitsklasse genügen muss.

Darstellung eines Klasse 1 Reinraums

(Anklicken für Großansicht, 700 KB · Quelle: unbekannt)

Die Fertigung im Reinraum ist in der Abbildung nur der Bereich zwischen rosafarbener Lüftungsanlage unter dem Dach und dem gelben Bodenbereich. Darunter befindet sich das Basement mit den Versorgungsanlagen (Pumpen, Chemietanks etc.). Manche Reinräume sind von einem so genannten Grauraum umgeben in dem sich die Anlagen befinden, so dass über eine Wand getrennt nur die Bedienfelder und die Schleusen zum Einbringen der Wafer in die Anlagen vom Reinraum aus zugänglich sind.

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 oder einer Haube und einem Mundschutz oder mit einer kompletten Maske bedeckt. Zusätzlich gibt es besonders partikelarme Schuhe, Unterbekleidung und Handschuhe. Im Eingangsbereich des Reinraums befinden sich oft Luftduschen, die vor Betreten noch einmal Partikel vom Anzug abblasen.

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:

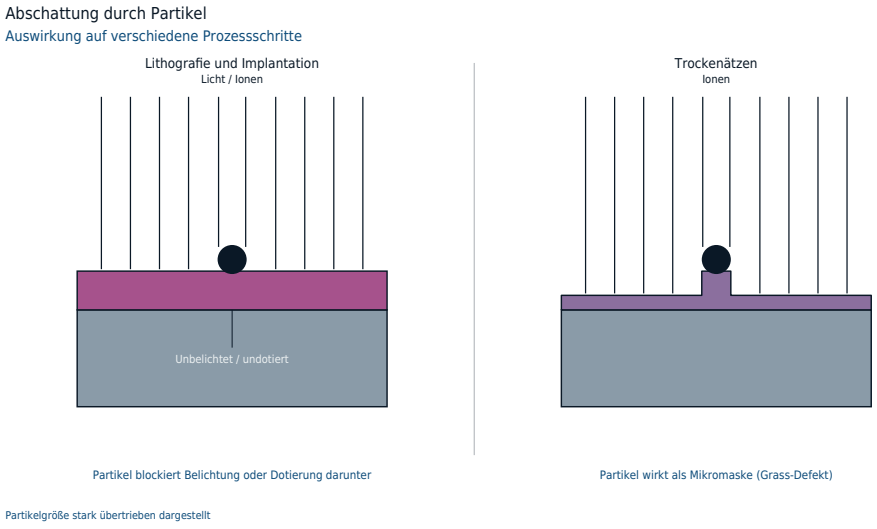
- mikroskopische Verunreinigungen: z.B. Partikel aus der Umgebungsluft oder Gasen
- molekulare Verunreinigungen: z.B. Kohlenwasserstoff aus Öl in den Pumpsystemen
- ionische Verunreinigung: z.B. Handschweiß

- atomare Verunreinigung: z.B. Schwermetalle aus Lösungen, Abrieb von Festkörpern

Mikroskopische Verunreinigungen

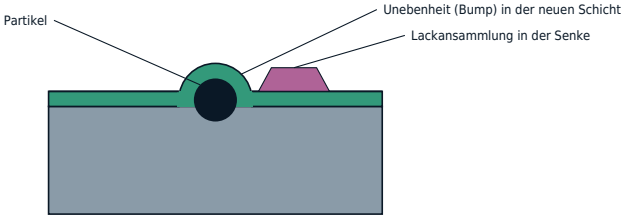
Mikroskopische Verunreinigungen sind Partikel, die sich an der Waferoberfläche anlagern. Quellen dieser Verunreinigungen sind die Umgebungsluft, Kleidung des Personals, Abriebe an beweglichen Teilen in Prozessanlagen, unzureichend gefilterte Flüssigkeiten, wie Ätz- und Reinigungslösungen oder Entwickler,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

Mikroskopische Verunreinigungen verursachen Abschattungseffekte, wenn sie 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.



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.

Partikeleinschluss durch Abscheidung
Unebenheit durch konforme Beschichtung



Nachfolgende Schichten können an der Kuppe aufplatzen

Partikelgröße stark übertrieben dargestellt

Molekulare Verunreinigungen

Molekulare Verunreinigungen resultieren aus Lack- und Lösemittelresten auf den Scheiben 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.

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 dass in der Schaltung nicht mehr genügend freie Ladungsträger zur einwandfreien Funktion zur Verfügung stehen.

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 werden die Verunreinigungen mit aggressiven Ätzlösungen entfernt, oder Oberflächen gezielt minimal abgetragen. Gemische aus Wasserstoffperoxid und Schwefelsäure oder Ammoniak oder die Carosche Säure/Piranha-Lösung (Schwefelsäure mit Wasserstoffperoxid) lösen organische Verunreinigungen bei ca. 90 °C durch Oxidation ab.

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 aufgebrachten 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. Eine Reinigungssequenz kann beispielsweise wie folgt ablaufen:

- Abblasen von Partikeln mit Stickstoff
- Reinigung im Ultraschallbad
- Entfernen von organischen Verunreinigungen mit Caroscher Säure (H_2SO_4–H_2O_2)
- 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.