

Halbleitertechnologie von A bis Z

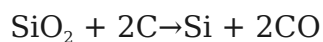
Waferherstellung

Herstellung von Rohsilicium	3
<i>Ausgangsmaterial Siliciumdioxid</i>	3
<i>Reinigung des Rohsiliciums</i>	3
<i>Zonenreinigung</i>	4

Herstellung von Rohsilicium

Ausgangsmaterial Siliciumdioxid

Silicium, das in der Halbleiterfertigung Verwendung findet, wird aus Quarz gewonnen. Dabei muss Sauerstoff, der sich bereits bei Raumtemperatur sehr schnell mit Silicium verbindet, und der auch beim Quarz in Verbindung mit Silicium als Siliciumdioxid vorliegt, entfernt werden. Das geschieht im Lichtbogenofen unter Verwendung von Kohlenstoff, bei Temperaturen, die im heißen Bereich des Ofens bis etwa 2000 °C reichen. Der Sauerstoff löst sich dabei vom Silicium und reagiert mit dem Kohlenstoff (C) zu Kohlenmonoxid (CO):



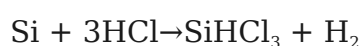
Diese Gleichung fasst zusammen, was im Ofen tatsächlich in mehreren Stufen abläuft. In der kühleren Zone entsteht zunächst Siliciumcarbid, das sich in der heißen Zone mit weiterem Siliciumdioxid zu Silicium umsetzt. Siliciumcarbid ist also kein Störprodukt, sondern ein notwendiges Zwischenprodukt; über das Verhältnis von Kohlenstoff zu Quarz wird eingestellt, dass es am Ende wieder aufgebraucht ist. Das Kohlenmonoxid ist bei diesen Temperaturen gasförmig und kann leicht vom flüssigen Silicium getrennt werden.

Das so gewonnene Rohsilicium (metallurgisches Silicium) ist etwa 98 bis 99 % rein. Der Rest sind Fremdstoffe wie Eisen, Aluminium, Calcium, Phosphor und Bor. Für Bauelemente ist das um viele Größenordnungen zu unrein – diese Stoffe müssen in weiteren Prozessen entfernt werden.

Reinigung des Rohsiliciums

Die Reinigung erfolgt auf dem Umweg über eine gasförmige Verbindung: Man überführt das Silicium in Trichlorsilan, reinigt dieses durch Destillation und scheidet daraus wieder festes Silicium ab. Das Verfahren ist nach seinem Entwickler als Siemens-Prozess bekannt und liefert bis heute den größten Teil des weltweit erzeugten Reinstsiliciums.

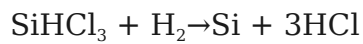
Mittels des Trichlorsilanprozesses werden viele Verunreinigungen durch Destillation herausgefiltert. Das Rohsilicium und Chlorwasserstoff (HCl) reagieren bei ca. 300 °C zu gasförmigem Trichlorsilan (SiHCl_3) und Wasserstoff (H_2):



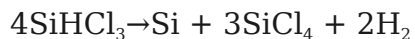
Die Fremdstoffe, die sich ebenfalls mit dem enthaltenen Chlor verbinden, gehen erst bei höheren Temperaturen in den gasförmigen Zustand über. So lässt sich

das Trichlorsilan abtrennen. Lediglich Kohlenstoff, Phosphor und Bor, die ähnliche Kondensationstemperaturen haben, können hier nicht herausgefiltert werden.

Der Trichlorsilanprozess lässt sich umkehren, so dass man anschließend das gereinigte Silicium in polykristalliner Form erhält. Dies geschieht unter Zugabe von Wasserstoff in einem Quarzgefäß, in dem sich beheizte, dünne Siliciumstäbe (Siliciumseelen) befinden, bei ca. 1100 °C:



und



Das Silicium schlägt sich auf den Siliciumseelen nieder, die dadurch über mehrere Tage hinweg auf etwa 150 bis 200 mm dicke Stäbe anwachsen. Diese werden anschließend zerkleinert und als Bruchstücke weiterverarbeitet.

Das Verfahren ist außerordentlich energieaufwendig, denn die Stäbe müssen die ganze Zeit über auf Temperatur gehalten werden, während die Kammerwand gekühlt wird. Als Alternative hat sich die Abscheidung im Wirbelbett etabliert: Dort wachsen kleine Siliciumkörner in einem von Gas durchströmten Bett heran, was deutlich weniger Energie erfordert und fortlaufend statt chargenweise arbeitet. Die Reinheit reicht allerdings nicht an den Siemens-Prozess heran, weshalb dieses Material vor allem in die Solarindustrie geht.

Genau darin liegt eine wichtige Unterscheidung: Solartaugliches Silicium muss etwa sechs Neunen erreichen (99,9999 %), elektroniktaugliches dagegen neun bis elf. Mit dem Czochralski-Verfahren könnte man dieses Polysilicium bereits in einen Einkristall umwandeln, jedoch ist der Reinheitsgrad für die Herstellung von Bauelementen noch immer nicht hoch genug.

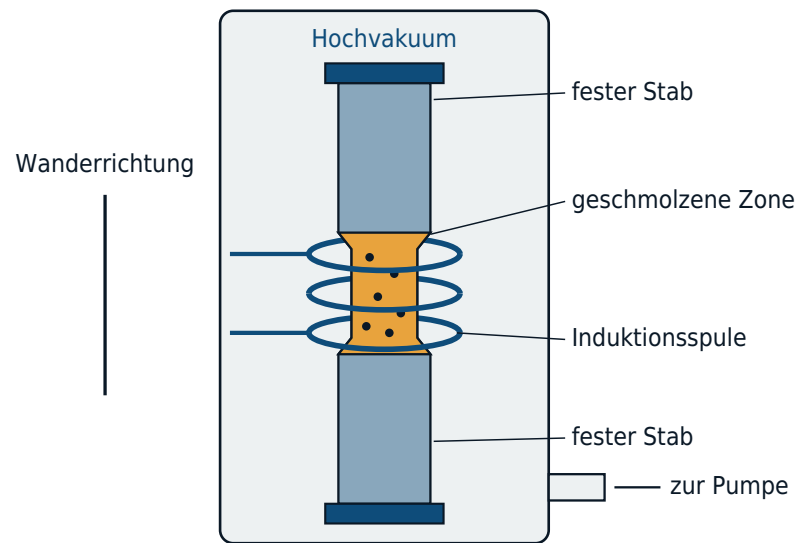
Zonenreinigung

Um die Reinheit weiter zu erhöhen wird die Zonenreinigung verwendet. Um die Siliciumstäbe wird eine Spule gelegt, die hochfrequenter Wechselstrom durchfließt. Dadurch schmilzt das Silicium im Inneren der Stäbe und die Verunreinigungen sinken auf Grund der hohen Löslichkeit nach unten (die Oberflächenspannung des Siliciums verhindert, dass die Schmelze herausfließt). Durch mehrfache Wiederholung dieses Verfahrens wird der Gehalt der Fremdstoffe im Silicium so weit gesenkt, dass es zum Einkristall weiterverarbeitet werden kann.

Darstellung der Zonenreinigung

Zonenreinigung eines Siliciumstabs

Die Oberflächenspannung hält die Schmelze zwischen den festen Enden



Verunreinigungen bleiben in der Schmelze und wandern mit der Zone.

Die Prozesse werden alle im Vakuum durchgeführt, um weitere Verunreinigungen zu verhindern.

Am Ende dieser Prozesse hat das für die Halbleiterfertigung aufbereitete Silicium eine Reinheit von über 99,9999999 %, dies entspricht weniger als einem Fremdatom pro 1 Mrd. Siliciumatomen.