

Halbleitertechnologie von A bis Z

Waferherstellung

Silicium	3
<i>Eigenschaften von Silicium</i>	3
Herstellung von Rohsilicium	4
<i>Ausgangsmaterial Siliciumdioxid</i>	4
<i>Reinigung des Rohsiliciums</i>	5
<i>Zonenreinigung</i>	6
Herstellung des Einkristalls	7
<i>Der Einkristall</i>	7
<i>Kristallziehverfahren nach Czochralski</i>	8
<i>Tiegelfreies Zonenziehen</i>	9
Der Wafer	10
<i>Wafervereinzelung und Oberflächenveredelung</i>	10
<i>Historische Entwicklung der Wafergröße</i>	13
<i>Wieso sind Wafer rund?</i>	14
Dotiertechniken	15
<i>Dotieren</i>	15
<i>Diffusion</i>	16
<i>Diffusionsverfahren</i>	17
<i>Ionenimplantation</i>	19

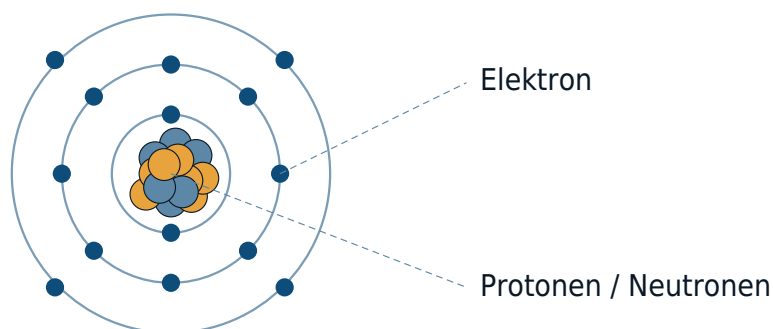
Silicium

Eigenschaften von Silicium

Silicium ist das chemische Element mit der Ordnungszahl 14 im Periodensystem der Elemente, es steht in der 4. Hauptgruppe und der 3. Periode. Silicium ist ein klassischer Halbleiter, seine Leitfähigkeit liegt also zwischen der von Leitern und Nichtleitern. Silicium (von lat. *silex* / *silicis*: Kieselstein) kommt in der Natur ausschließlich als Oxid vor: als Siliciumdioxid (SiO_2) in Form von Sand, Quarz oder als Silicat (Verbindungen von Silicium mit Sauerstoff, Metallen u.a.). Silicium gibt es also sprichwörtlich wie Sand am Meer, dementsprechend ist es ein sehr günstiges Ausgangsmaterial, dessen Wert erst mit der Verarbeitung bestimmt wird. Andere Halbleiter wie Germanium oder der Verbindungshalbleiter Galliumarsenid bieten teils wesentlich bessere elektrische Eigenschaften als Silicium: die Ladungsträgerbeweglichkeit und die daraus resultierenden Schaltgeschwindigkeiten sind bei Germanium und GaAs deutlich höher. Doch Silicium hat entscheidende Vorteile gegenüber anderen Halbleitern.

Diese Vorrangstellung gilt für integrierte Schaltungen, nicht für die Halbleitertechnik insgesamt. In der Leistungselektronik haben sich Siliciumcarbid und Galliumnitrid einen festen Platz erobert, weil sie höhere Spannungen, höhere Temperaturen und schnelleres Schalten vertragen. Und für alles, was Licht aussenden soll, ist Silicium ungeeignet: Sein Bandübergang gibt die Energie als Wärme ab statt als Licht, weshalb Leuchtdioden und Laser aus Verbindungshalbleitern bestehen.

Bohrsches Atommodell von Silicium



Auf einem Siliciumkristall lassen sich sehr leicht Oxidschichten erzeugen, das entstandene Siliciumdioxid ist ein hochwertiger Isolator, der sich gezielt auf

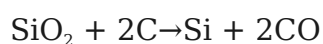
dem Substrat aufbringen lässt. Bei den angesprochenen Halbleitern Germanium und GaAs ist es dagegen sehr kostenintensiv ähnliche Isolationsschichten zu erzeugen. Auch die Möglichkeit, durch Dotierung ganz gezielt die Leitfähigkeit des reinen Siliciums zu verändern macht das Halbmetall so bedeutsam. Andere Stoffe sind zudem teilweise sehr giftig, und Verbindungen mit diesen Elementen nicht so langlebig und stabil wie bei Silicium. Voraussetzung für den Einsatz von Silicium in der Halbleiterfertigung ist jedoch, dass das Silicium in einer hochreinen Form als Einkristall vorliegt. Das bedeutet, dass die Siliciumatome im Kristallgitter absolut regelmäßig angeordnet sind und sich keine undefinierten Fremdatome im Kristall befinden.

Neben der einkristallinen Form gibt es noch Polysilicium (poly = viel) und amorphes Silicium (a-Si). Während das einkristalline Silicium als Wafer die Grundlage für die Mikroelektronik ist, wird polykristallines Silicium in verschiedenen Bereichen als Schicht auf dem Wafer erzeugt, um bestimmte Aufgaben zu erfüllen (z.B. Maskierschicht, Gate im Transistor u.a.). Es lässt sich einfach erzeugen und leicht strukturieren. Polysilicium setzt sich aus vielen einzelnen, zu einander unregelmäßig angeordneten Einkristallen zusammen. Amorphes Silicium besitzt keinen regelmäßigen Gitteraufbau sondern eine ungeordnete Gitterstruktur. In der Chipfertigung spielt es nur eine untergeordnete Rolle, außerhalb davon jedoch keineswegs: Weil es sich großflächig und bei niedriger Temperatur auf Glas abscheiden lässt, sind die Schaltelemente hinter jedem Flachbildschirm daraus aufgebaut, und auch in Dünnschichtsolarzellen wird es eingesetzt.

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

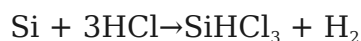
heißen Zone mit weiterem Siliciumdioxid zu Silicium umgesetzt. Siliciumcarbid ist also kein Störprodukt, sondern ein notwendiges Zwischenprodukt; über das Verhältnis von Kohlenstoff zu Quarz wird eingestellt, dass es am Ende wieder aufgebraucht ist. Das Kohlenmonoxid ist bei diesen Temperaturen gasförmig 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

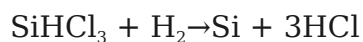
Die Reinigung erfolgt auf dem Umweg über eine gasförmige Verbindung: Man überführt das Silicium in Trichlorsilan, reinigt dieses durch Destillation und scheidet daraus wieder festes Silicium ab. Das Verfahren ist nach seinem Entwickler als Siemens-Prozess bekannt und liefert bis heute den größten Teil 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 (SiHCl₃) und Wasserstoff (H₂):

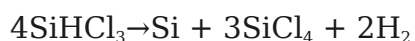


Die Fremdstoffe, die sich ebenfalls mit dem enthaltenen Chlor verbinden, gehen erst bei höheren Temperaturen in den gasförmigen Zustand über. So lässt sich das Trichlorsilan abtrennen. Lediglich Kohlenstoff, Phosphor und Bor, die ähnliche Kondensationstemperaturen haben, können hier nicht herausgefiltert 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.

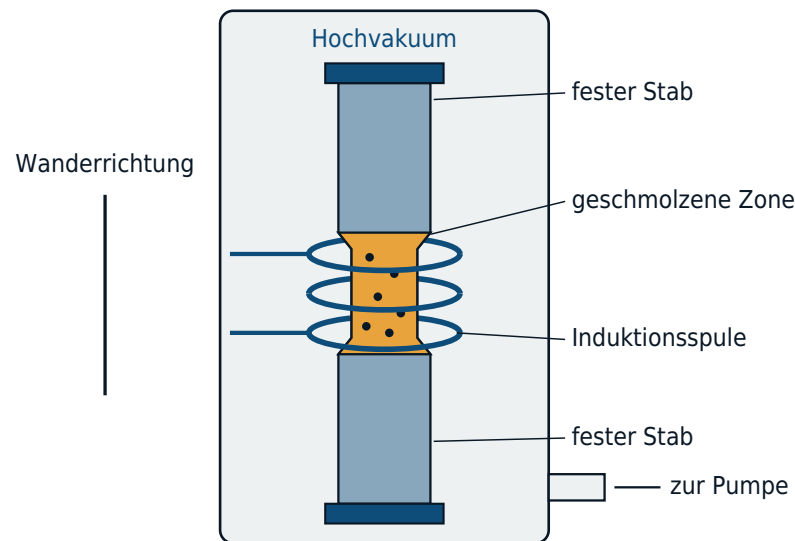
Zonenreinigung

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 weiter verarbeitet 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.

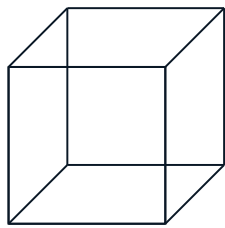
Am Ende dieser Prozesse hat das für die Halbleiterfertigung aufbereitete Silicium eine Reinheit von über 99,9999999 %, dies entspricht weniger als einem Fremdatom pro 1 Mrd. Siliciumatomen.

Herstellung des Einkristalls

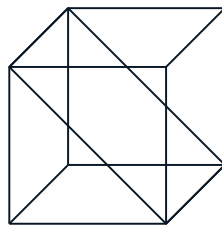
Der Einkristall

Ein Einkristall (Monokristall), wie er in der Halbleiterfertigung benötigt wird, ist eine regelmäßige Anordnung von Atomen. Daneben gibt es polykristallines (Zusammensetzung von vielen kleinen Einkristallgittern) und amorphes Silicium (ungeordnete Struktur). Je nachdem, welche Lage das Gitter im Raum hat, besitzen Siliciumscheiben unterschiedliche Oberflächenstrukturen, die Einfluss auf verschiedene Parameter, wie die Ladungsträgerbeweglichkeit, von Bauelementen haben.

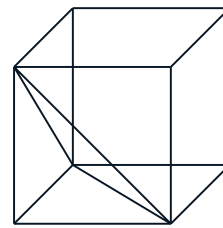
Kristallorientierungen



Orientierung 100



Orientierung 110



Orientierung 111

In der Chipfertigung wird nahezu ausschließlich (100)-orientiertes Silicium verwendet. Der Grund liegt an der Grenzfläche zum Gateoxid: Dort bleiben nach der Oxidation ungesättigte Bindungen zurück, und ihre Zahl ist bei dieser Orientierung am geringsten. Die (111)-Orientierung hat die dichteste Belegung mit Bindungen und damit die meisten Störstellen; sie oxidiert dafür am schnellsten.

Auch in der Mikromechanik ist die Kristallorientierung von besonderer Bedeutung. So lassen sich auf (110)-Silicium Mikrokanäle mit senkrechten Wänden herstellen, wohingegen sich bei (100)-Orientierung Flankenwinkel von $54,74^\circ$ ergeben.

Kristallziehverfahren nach Czochralski

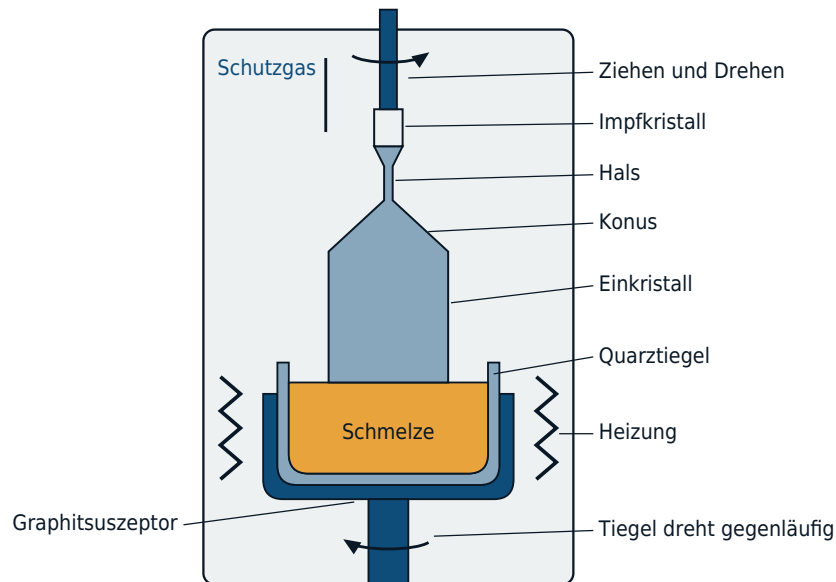
Das polykristalline Silicium, das nach der Zonenreinigung vorliegt, wird in einem Quarztiegel knapp über dem Schmelzpunkt von Silicium aufgeschmolzen. Der Schmelze können jetzt Dotierstoffe (z.B. Bor oder Phosphor) hinzugefügt werden, um entsprechende elektrische Eigenschaften des Einkristalls zu erzielen.

Ein Impfkristall (Einkristall) an einem drehbaren Stab wird an die Oberfläche der Siliciumschmelze gebracht. Dieser Keim gibt die Orientierung des Kristalls vor. Beim Kontakt des Keims mit der Schmelze lagert sich Silicium am Keim an und übernimmt dessen Kristallstruktur. Dadurch, dass die Tiegeltemperatur nur wenig über dem Schmelzpunkt von Silicium liegt, erstarrt das angelagerte Silicium sofort am Keimling und der Kristall wächst.

Der Keim wird unter ständigem Drehen langsam nach oben gezogen, wobei stetiger Kontakt zur Schmelze besteht. Der Tiegel dreht sich dabei entgegengesetzt zum Impfkristall. Eine konstante Temperierung der Schmelze ist unerlässlich, um ein gleichmäßiges Wachstum zu gewährleisten. Der Durchmesser des Einkristalls wird durch die Ziehgeschwindigkeit, die 2-25 cm/h beträgt, bestimmt. Je schneller gezogen wird, desto dünner wird der

Kristall. Die gesamte Apparatur befindet dabei sich in einer Schutzgasatmosphäre, damit es nicht zu einer Oxidation des Siliciums kommt.

Kristallziehen nach Czochralski
Der Impfkristall gibt die Orientierung des Kristalls vor



Durchmesser über Ziehgeschwindigkeit und Schmelztemperatur eingestellt.

Ein wesentlicher Nachteil dieses Verfahrens ist, dass sich die Schmelze während des Vorgangs immer mehr mit Dotierstoffen anreichert, da sich die Dotierstoffe in der Schmelze besser lösen, als im Festkörper. Somit ist die Dotierstoffkonzentration entlang des Siliciumstabes nicht konstant. Zudem können sich Verunreinigungen oder Metalle aus dem Tiegel lösen und im Kristallgitter eingebaut werden.

Die Vorteile dieses Verfahrens sind die geringen Kosten, und die Möglichkeit, größere Wafer herzustellen, als dies beim Zonenziehen der Fall ist (s. unten).

Tiegelfreies Zonenziehen

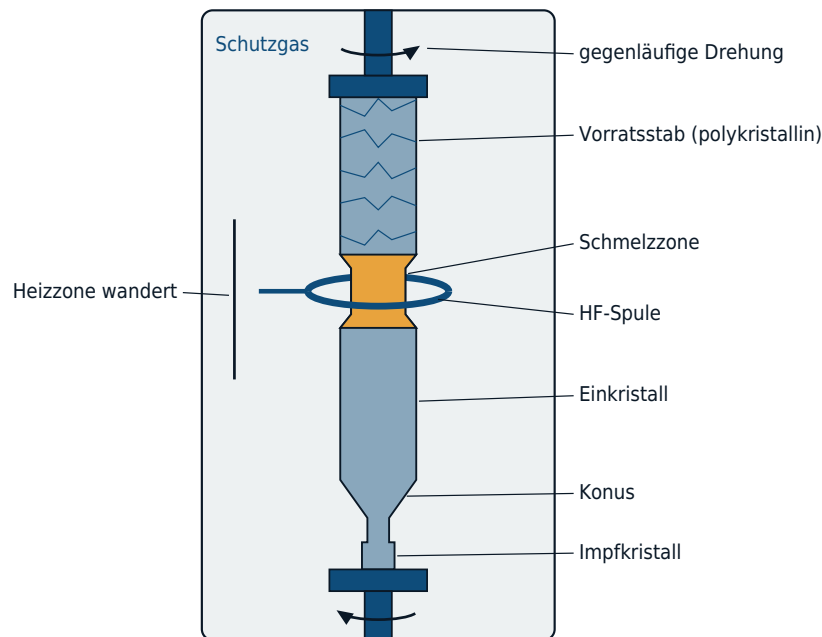
Im Gegensatz zum Kristallziehverfahren nach Czochralski wird beim tiegelfreien Zonenziehen nicht das gesamte Polysilicium geschmolzen, sondern, wie bei der Zonenreinigung, nur ein kleiner Bereich (wenige Millimeter).

Auch hier dient ein Impfkristall, der an das Ende des polykristallinen Siliciumstabs herangeführt wird, als Vorgabe der Kristallstruktur. Der Polykristall wird aufgeschmolzen und übernimmt die Struktur des Keimlings. Die Heizzone wird langsam am Stab entlang geführt, der polykristalline Siliciumstab wandelt sich langsam in einen Einkristall um.

Da nur ein kleiner Bereich des polykristallinen Siliciums aufgeschmolzen wird, können sich kaum Verunreinigungen anlagern (wie bei der Zonenreinigung verlagern sich die Fremdatome ans Ende des Siliciumstabs). Die Dotierung erfolgt hier durch Zusätze der Dotierstoffe ins Schutzgas (z.B. mit Diboran oder Phosphin), welches die Apparatur umströmt.

Tiegelfreies Zonenziehen

Nur wenige Millimeter des Stabs sind geschmolzen



Ohne Tiegel kein Kontakt zu Fremdmaterial; dotiert wird über das Schutzgas.

Der Wafer

Wafervereinzelung und Oberflächenveredelung

Der Einkristallstab wird zunächst auf den gewünschten Durchmesser abgedreht und bekommt dann, je nach Kristallorientierung und Dotierung, einen oder zwei Flats. Der größere Flat dient dazu, die Wafer in der Fertigung exakt ausrichten zu können. Der zweite Flat dient zur Erkennung des Scheibentyps (Kristallorientierung, p-/n-Dotierung), ist aber nicht immer vorhanden. Bei Wafern ab 200 mm Durchmesser werden an Stelle der Flats sogenannte Notches verwendet. Dabei handelt es sich um eine winzige Einkerbungen am Scheibenrand, die ebenfalls eine Ausrichtung der Wafer ermöglicht, aber sehr viel weniger kostbare Fläche des Wafers beansprucht.



Sägen

Historisch wurde der Einkristallstab mit einer Innenlochsäge zerteilt, deren Schnittkante mit Diamantsplittern besetzt ist. Sie schneidet genau, aber immer nur eine Scheibe auf einmal, und bis zu 20 % des Kristallstabs gehen dabei durch die Dicke des Sägeblatts verloren. Bei den heutigen Stabdurchmessern und Scheibenpreisen ist das nicht mehr vertretbar; Standard ist deshalb das Drahtsägen, bei dem mehrere hundert Wafer in einem Durchgang aus dem Stab geschnitten werden. Dabei wird ein langer Draht, welcher mit einer Suspension aus Siliciumcarbidkörnern und einem Trägermittel wie Glykol oder Öl benetzt wird, über rotierende Walzen geführt. Der Siliciumkristall wird in das Drahtgitter abgelassen und so zu Wafern vereinzelt. Der Draht bewegt sich im Gegenschritt mit ca. 10 m/s und ist typischerweise 0,1–0,2 mm dick. Zunehmend wird statt der aufgeschlammten Körner ein Draht verwendet, in dessen Oberfläche die Diamantkörner fest eingebunden sind. Er schneidet schneller, erzeugt weniger Abfall und macht die Entsorgung der verbrauchten Suspension überflüssig.

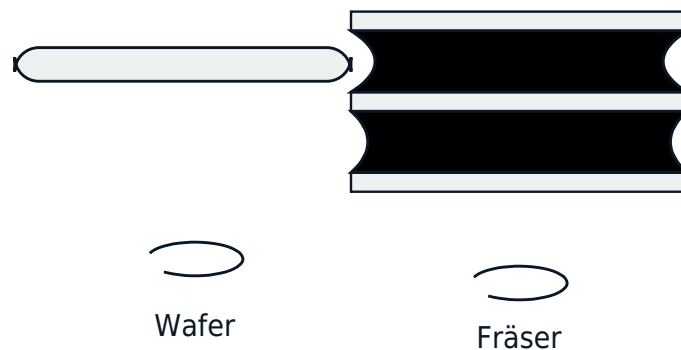
Nach dem Sägen besitzen die Scheiben eine aufgeraute Oberfläche und, auf Grund der mechanischen Belastung, Gitterschäden im Kristall. Zum Veredeln der Oberfläche durchlaufen die Scheiben mehrere Prozessschritte.

Läppen

Mit körnigen Schleifmitteln (z.B. Aluminiumoxid) werden 50 μm (0,05 mm) der Scheibenoberfläche auf einer rotierenden Stahlscheibe abgetragen. Die Körnung wird dabei stufenweise verringert, jedoch wird die Oberfläche auf Grund der mechanischen Behandlung erneut geschädigt. Die Ebenheit nach dem Läppen beträgt ca. 2 μm .

Scheibenrand abrunden

In späteren Prozessen dürfen die Scheiben keine scharfen Kanten besitzen, da aufgebrachte Schichten ansonsten abplatzen können. Dazu wird der Rand der Scheiben mit einem Diamantfräser abgerundet.



Ätzen

In einem Tauchätzschritt, mit einer Mischung aus Fluss-, Essig- und Salpetersäure, werden noch einmal 50 μm abgetragen. Da es sich hierbei um einen chemischen Vorgang handelt, wird die Oberfläche nicht geschädigt. Kristallfehler werden endgültig behoben.

Polieren

Dies ist der letzte Schritt zum fertigen Wafer. Am Ende des Polierschrittes besitzen die Wafer noch eine Unebenheit von weniger als 3 nm (0,000003 mm). Dazu werden die Scheiben mit einem Gemisch aus Natronlauge (NaOH), Wasser und Siliciumdioxidkörnern behandelt. Das Siliciumdioxid entfernt weitere 5 μm von der Scheibenoberfläche, die Natronlauge entfernt Oxid und beseitigt Bearbeitungsspuren der Siliciumdioxidkörner.

Danach folgen eine abschließende Reinigung und eine Vermessung jeder einzelnen Scheibe auf Ebenheit, Dicke und Partikel. Ein erheblicher Teil der Wafer erhält anschließend noch eine **epitaktische Schicht**: eine dünne,

besonders reine und definiert dotierte Siliciumlage, die auf die polierte Oberfläche aufgewachsen wird. Die eigentlichen Bauelemente entstehen dann in dieser Schicht, während die Scheibe darunter nur noch Träger ist.

Historische Entwicklung der Wafergröße

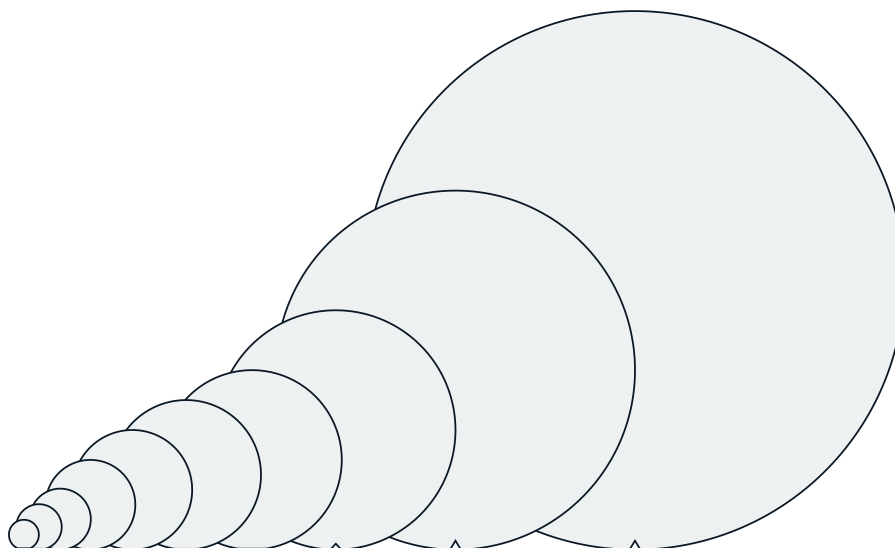
Die Herstellung von integrierten Schaltkreisen auf Siliciumwafern begann Mitte der 1960er Jahre auf Scheiben mit einem Durchmesser von 25 mm. Seither ist der Durchmesser in Stufen gewachsen; seit Ende der 1990er Jahre ist der 300-mm-Wafer das größte Format der Serienfertigung. Seine Fläche ist rund 140-mal so groß wie die der ersten 25-mm-Scheiben.

Mit größeren Wafern steigt der Durchsatz in der Herstellung von Chips erheblich, wodurch die Kosten in der Fertigung entsprechend gesenkt werden können. So können bei identischer Strukturgröße mehr als doppelt so viele Chips auf einem 300-mm-Wafer hergestellt werden, wie es auf einem 200-mm-Wafer der Fall ist.

Typische Daten von Wafern:

Typ [mm]	Durchmesser [mm]	Dicke [μm]	1. Flat [mm]	Durchbiegung [μm]
150	$150 \pm 0,5$	~ 700	55 - 60	25
200	$200 \pm 0,5$	~ 800	<i>Notch</i>	35
300	$300 \pm 0,5$	~ 900	<i>Notch</i>	45

Wafergrößen in der Übersicht: 25, 38, 51, 75, 100, 125, 150, 200, 300, 450 [mm] (maßstabsgetreu)



Der Schritt auf 450 mm, der nicht kam

Die Reihe hätte sich mit 450 mm fortsetzen sollen. Um 2008 schlossen sich mehrere große Hersteller und Ausrüster zu einem gemeinsamen Programm zusammen, erste Anlagen und Testwafer entstanden, und der Umstieg wurde für den Anfang der 2010er Jahre angekündigt. Er fand nie statt: Das Programm wurde Mitte der 2010er Jahre stillgelegt, und 300 mm ist bis heute das größte Format geblieben.

Die Gründe dafür stehen bereits in den technischen Schwierigkeiten, die man damals zu lösen suchte:

- Die Durchbiegung wächst mit dem Durchmesser. Damit sich gestapelte Scheiben beim Transport nicht berühren, müssten Abstände, Auflagen und Greifer neu ausgelegt werden.
- Schichtspannungen verformen eine große Scheibe leichter. Dicker machen lässt sie sich nicht beliebig, weil Materialkosten und Eigenfrequenz dagegen sprechen.
- Die größere Fläche muss auch bearbeitet werden. Gegenüber 300 mm müssten die Kosten je Quadratzentimeter um den Faktor 2,25 sinken, damit sich am Ende überhaupt etwas rechnet.
- Ein 450-mm-Kristall wächst mehr als doppelt so lange. In dieser Zeit steigt auch die Wahrscheinlichkeit, dass sich Fehler in das Gitter einbauen.
- Nahezu jede Anlage der Fertigungslinie hätte neu entwickelt werden müssen – bei einem Investitionsbedarf, den einzelne Hersteller nicht mehr allein tragen können.

Der entscheidende Punkt war jedoch ein wirtschaftlicher. Der Nutzen eines größeren Wafers besteht darin, die Fixkosten je Anlage auf mehr Chips zu verteilen. Dieser Vorteil fällt umso geringer aus, je teurer die einzelne Anlage wird – und die Lithografieanlagen wurden in derselben Zeit dramatisch teurer. Der Aufwand für die Umstellung wäre also gestiegen, während der Ertrag daraus sank. Die Industrie hat ihre Investitionen stattdessen in kleinere Strukturen und in die dritte Dimension gelenkt: mehr Bauelemente je Fläche statt mehr Fläche je Scheibe.

Wieso sind Wafer rund?

Oft stellt sich die Frage wieso Wafer rund sind, schließlich sind Mikrochips doch rechteckig. Dadurch ergibt sich auf dem Wafer immer ein Verschnitt, also eine Fläche, auf der keine vollständigen Chips Platz finden, und die am Ende der Halbleiterfertigung verworfen werden muss.

Nach Erläuterung der beiden Herstellungsverfahren - dem [Kristallziehverfahren](#) und dem [Zonenziehen](#) - kann diese Frage leicht beantwortet werden.

Ein Siliciumwafer für die Mikrochipherstellung muss als Einkristall vorliegen. Dies ist nur mit den genannten Verfahren möglich, und diese liefern prinzipbedingt eine kreisrunde Form.

Auch wenn es technisch möglich wäre, die runden Siliciumkristalle nachträglich in eine eckige Form zu bringen (z. B. mittels sägen), so bietet die runde Form der Siliciumwafer trotz rechteckiger Mikrochips dennoch einige Vorteile.

- Das Begradigen der runden Siliciumstäbe bedeutet zusätzlichen Stress für das Material und würde zwangsläufig zu Kristallfehlern führen, die sich auf die Qualität der Chips auswirken würde.
- Runde Wafer sind wesentlich stabiler. Eckige Wafer könnten kaum ohne Beschädigung transportiert und bearbeitet werden.
- Eine gleichmäßige Bearbeitung während der Chipfertigung mit radialsymmetrischen Prozessen (CMP, Spin-on, Ätzen) ist wesentlich einfacher.
- Ein schmaler Randbereich müsste auch bei rechteckigen Wafern immer verworfen werden, da die Scheiben während der Bearbeitung gehalten werden müssen. Abgeschiedene Schichten würden abplatzen und so zusätzliche Partikel verursachen, wenn diese bis an den äußersten Rand reichen.

Mit zunehmender Wafergröße nimmt der Verschnitt auch immer weiter ab.

Rechteckige Wafer findet man hingegen bei der Fertigung von Solarzellen. Zumeist finden hier polykristalline Wafer Anwendung, die in rechteckigen Formen gegossen werden können. Die Fertigung ist verhältnismäßig einfach, so dass auch eckige Wafer bearbeitet werden können. Meist werden die Ecken zusätzlich abgeschrägt. Bei den heute üblichen einkristallinen Solarzellen ist es genau umgekehrt: Sie entstehen aus rund gezogenen Kristallen, die vor dem Sägen quadratisch beschnitten werden – mit abgerundeten Ecken, weil das Wegschneiden der Restkante mehr Material kosten würde als der Flächengewinn einbringt.

Dotiertechniken

Dotieren

Dotieren bedeutet das Einbringen eines Fremdstoffs in den Halbleiterkristall zur gezielten Änderung der Leitfähigkeit durch Elektronenüberschuss oder Elektronenmangel. Im Gegensatz zum Dotieren bei der Waferherstellung selbst, wo der ganze Wafer dotiert wird, ermöglichen die auf dieser Seite beschriebenen Dotiertechniken das partielle Dotieren der Siliciumscheiben. Das

Einbringen des Fremdstoffs kann mit verschiedenen Methoden erreicht werden: **Diffusion**, **Implantation** (und Legierung).

Diffusion

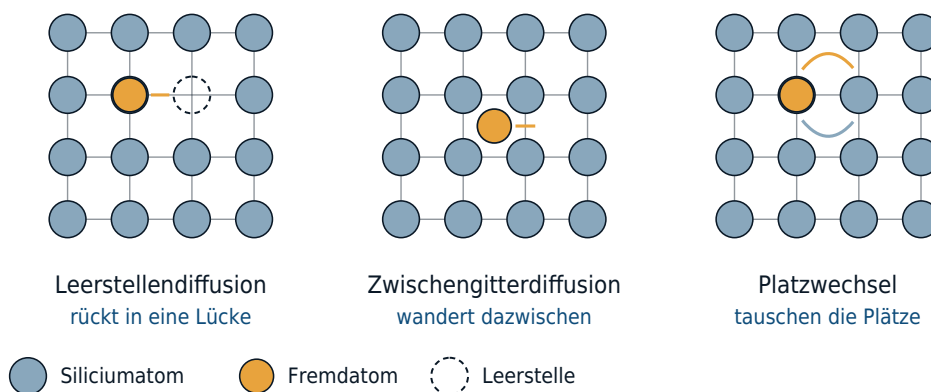
Zur gezielten Dotierung wird die Diffusion heute kaum noch eingesetzt; sie ist durch die **Ionenimplantation** abgelöst worden. Zu verstehen ist sie trotzdem unverzichtbar, denn sie hört nicht auf zu wirken: Jeder spätere Hochtemperatureschritt lässt bereits eingebrachte Dotierstoffe weiterwandern. Das begrenzt, wie viel Wärme einem Wafer nach der Dotierung noch zugemutet werden darf, und ist der Grund, warum Ofenprozesse zunehmend durch sekundenschnelles Heizen ersetzt wurden.

Diffusion bedeutet das selbständige Ausbreiten eines Stoffes in einem anderen Stoff auf Grund eines Konzentrationsunterschiedes, so verteilt sich z.B. ein Tropfen Tinte in einem Wasserglas nach einer bestimmten Zeit gleichmäßig. Im Siliciumkristall finden wir ein festes Gitter von Atomen vor, durch das sich der Dotierstoff bewegen muss. Das kann auf drei Arten geschehen:

- **Leerstellendiffusion:** Die Fremdatome besetzen leere Stellen im Kristallgitter die immer auftreten können. Ähnlich einer Löcherleitung entsteht ein Wechselspiel von besetzten Gitterplätzen und Lücken.
- **Zwischengitterdiffusion:** Die Fremdatome bewegen sich zwischen den Siliciumatomen im Kristallgitter hindurch.
- **Platzwechsel:** Fremdatome die sich im Kristallgitter befinden tauschen mit Siliciumatomen den Gitterplatz.

Diffusion im Kristallgitter

Drei Wege, auf denen der Dotierstoff durch das Gitter wandert



Alle drei Wege laufen nebeneinander ab. Welcher überwiegt, hängt vom Dotierstoff und von der Temperatur ab – Bor und Phosphor wandern vor allem über Leerstellen, kleinere Atome eher zwischen den Gitterplätzen.

Der Dotierstoff kann sich so lange im Halbleiterkristall bewegen, bis entweder ein Konzentrationsgefälle ausgeglichen ist, oder die Temperatur so weit gesenkt wurde, dass die Atome sich nicht mehr bewegen können.

Die Geschwindigkeit des Diffusionsvorgangs hängt von mehreren Faktoren ab:

- Dotierstoff
- Konzentrationsunterschied
- Temperatur
- Substrat
- Kristallorientierung des Substrats (siehe [Herstellung von Einkristallen](#))

Diffusion mit erschöpflicher Quelle

Diffusion mit einer erschöpflichen Quelle bedeutet, dass der Dotierstoff nur begrenzt zur Verfügung steht. Je länger der Diffusionsprozess andauert, umso geringer wird die Konzentration an der Oberfläche; dafür steigt die Eindringtiefe in das Substrat. Der Diffusionskoeffizient eines Stoffes gibt dabei an, wie schnell er sich im Kristall bewegt. Arsen mit einem geringen Diffusionskoeffizienten dringt langsamer in das Substrat ein, als bspw. Phosphor oder Bor.

Diffusion mit unerschöpflicher Quelle

Der Dotierstoff steht hier unbegrenzt zur Verfügung. Die Konzentration an der Oberfläche bleibt somit während des Vorgangs konstant, da Teilchen, die in das Substrat eingedrungen sind, fortwährend nachgeliefert werden.

Diffusionsverfahren

Bei den nachfolgenden Prozessen befinden sich die Wafer in einem Quarzrohr, das über die gesamte Länge auf eine bestimmte Temperatur aufgeheizt wird.

Diffusion aus der Gasphase

Ein Trägergas (Stickstoff, Argon) wird mit dem gewünschten Dotierstoff (ebenfalls in Gasform, z.B. Phosphin (PH_3) oder Diboran (B_2H_6) angereichert und über die Siliciumscheiben geleitet, wo der Konzentrationsausgleich stattfinden kann.

Feststoffdiffusion

Zwischen den Wafern befinden sich Scheiben, auf denen der Dotierstoff aufgebracht wurde. Steigt die Temperatur im Quarzrohr, diffundiert von den Quellscheiben der Dotierstoff in die Atmosphäre aus. Über ein Trägergas wird

der Dotierstoff dann gleichmäßig im Quarzrohr verteilt und gelangt so an die Oberfläche der Wafer.

Diffusion mit flüssiger Quelle

Als flüssige Quelle dienen Borbromid (BBr_3) oder Phosphoroxychlorid (POCl_3). Ein Trägergas wird durch die Flüssigkeit geleitet und transportiert den Dotierstoff so zu den Wafern, wo er dann an die Oberfläche der Siliciumscheiben gelangt.

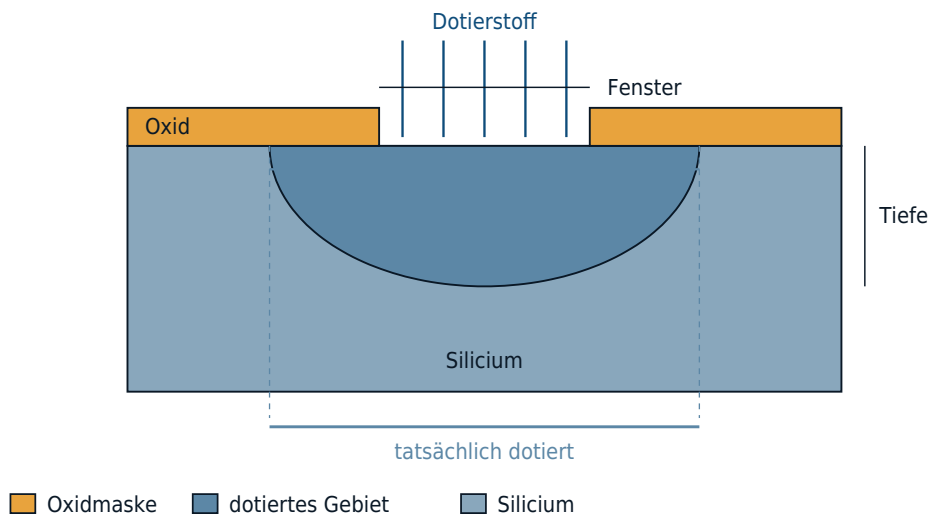
Da nicht der gesamte Wafer dotiert werden soll, werden bestimmte Bereiche mit Siliciumdioxid maskiert. Das Oxid können die Dotierstoffe nicht durchdringen, weshalb an diesen Stellen keine Dotierung stattfindet. Um Spannungen oder gar Brüche der Scheiben zu vermeiden, wird das Rohr schrittweise ($10\text{ }^\circ\text{C}$ pro Minute) auf ca. $900\text{ }^\circ\text{C}$ aufgeheizt, wo der Dotierstoff dann zu den Scheiben geleitet wird. Um den Diffusionsvorgang in Gang zu setzen, wird die Temperatur anschließend auf ca. $1200\text{ }^\circ\text{C}$ erhöht.

Charakteristik:

- Da viele Wafer gleichzeitig bearbeitet werden können ist dieses Verfahren recht günstig
- Befinden sich bereits Fremdstoffe früherer Dotierungen im Kristall können diese bei einer erneuten Temperaturbelastung ausdiffundieren
- Im Quarzrohr lagern sich mit der Zeit Dotierstoffe an, die bei nachfolgenden Dotierungen zusätzlich vom Trägergas zu den Wafern transportiert werden
- Dotierstoffe breiten sich im Kristall nicht nur senkrecht, sondern auch seitlich aus, so dass die Dotierfenster immer großflächiger dotiert werden als gewünscht

Diffusion durch ein Fenster in der Maske

Der Dotierstoff wandert auch zur Seite und unterwandert das Oxid



Die seitliche Ausbreitung beträgt etwa acht Zehntel der Eindringtiefe.
Das dotierte Gebiet fällt dadurch immer breiter aus als das Fenster –
beim Entwurf der Masken muss das einkalkuliert werden.

Ionenimplantation

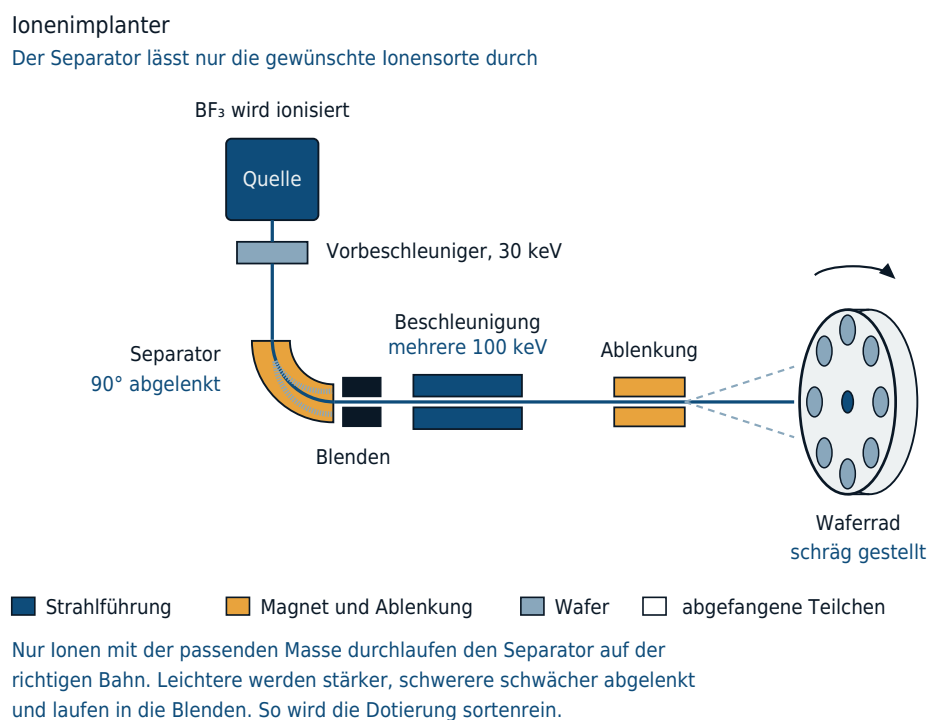
Bei der Ionenimplantation werden geladene Dotierstoffe (Ionen) in einem elektrischen Feld beschleunigt und auf die Wafer gelenkt. Die Eindringtiefe lässt sich sehr genau festlegen, indem die zur Beschleunigung der Ionen benötigte Spannung verringert oder erhöht wird. Da der Prozess bei Raumtemperatur stattfindet, können vorher eingebrachte Dotierungen nicht ausdiffundieren. Wie bei der Diffusion werden Stellen, die nicht dotiert werden sollen, mit einer Maske verdeckt, wobei bei der Implantation eine Maskierung aus Fotolack ausreicht.

Ein Implanter besteht aus folgenden Komponenten:

- Ionenquelle: Das Dotiergas (z.B. Bortrifluorid BF_3) wird ionisiert (Elektronen werden von einer Glühkathode emittiert und stoßen mit den Gasteilchen zusammen. Durch Stoßionisation werden stets positive Ionen und freie Elektronen erzeugt)
- Vorbeschleuniger: Die Ionen werden mit ca. 30 Kiloelektronenvolt aus der Ionenquelle gezogen
- Massenseparator: Die geladenen Teilchen werden durch ein Magnetfeld um 90° abgelenkt. Zu leichte/schwere Teilchen werden mehr/weniger abgelenkt als die gewünschten Ionen und mit Blenden hinter dem Separator abgefangen

- Beschleunigungsstrecke: Mit mehreren 100 keV werden die Teilchen auf ihre Endenergie beschleunigt (200 keV beschleunigen Borionen auf ca. 2.000.000 m/s)
- Linsen: Über das gesamte System sind Linsen verteilt, die den Ionenstrahl fokussieren
- Ablenkungsvorrichtungen: Kondensatoren lenken die Ionen ab, um die gewünschte Stelle zu bestrahlen
- Waferstation: Die Wafer werden entweder einzeln oder auf großen rotierenden Rädern in den Ionenstrahl gebracht und bestrahlt

Darstellung einer Implantationsanlage



Eindringtiefe von Ionen im Wafer

Im Gegensatz zur Diffusion dringen die Teilchen nicht auf Grund ihrer Eigenbewegung ein, sondern werden mit hoher Geschwindigkeit in das Kristallgitter geschossen. Dabei werden sie durch Zusammenstöße mit den Siliciumatomen abgebremst. Durch den Aufprall werden die Siliciumatome von ihren Gitterplätzen gestoßen, die Dotierionen selbst lagern sich meist auf Zwischengitterplätzen an. Dort sind sie elektrisch nicht aktiv, da keine Bindungen mit anderen Atomen vorliegen, die freie Ladungsträger hervorrufen könnten. Die verschobenen Siliciumatome müssen wieder ins Kristallgitter eingebaut, und die elektrisch nicht aktiven Dotierstoffe aktiviert werden.

Ausheilen des Kristallgitters und Aktivierung der Dotierstoffe

Durch einen Temperaturschritt bei ca. 1000 °C werden die Dotierstoffe auf Gitterplätze bewegt (vorher befinden sich nur ca. 5 % der Dotieratome auf Gitterplätzen). Die Gitterschäden durch die Zusammenstöße werden bereits bei ca. 500 °C ausgeheilt. Da sich die Dotieratome während den hohen Temperaturen im Substrat bewegen, werden diese Schritte nur sehr kurze Zeit durchgeführt.

Genau hier liegt der Zielkonflikt des Verfahrens: Die Temperatur muss hoch genug sein, um die Dotierstoffe auf Gitterplätze zu bringen, und die Zeit kurz genug, damit sie dabei nicht auswandern. Beides gleichzeitig erreicht man nur, indem man die Heizdauer immer weiter verkürzt. Aus dem Ofenprozess über Stunden wurde zunächst das Schnellheizen über Sekunden, dann das Spitzenheizen, bei dem die Zieltemperatur nur durchfahren und nicht gehalten wird, und schließlich das Heizen mit Blitzlampen oder Laser im Millisekundenbereich. Dabei wird nur noch die oberste Schicht der Scheibe erwärmt, während das Substrat darunter kalt bleibt.

Für sehr flache Dotierprofile wird zusätzlich die Ionenmasse erhöht: Statt einzelner Boratome implantiert man Moleküle, die mehrere Boratome enthalten. Sie tragen bei gleicher Beschleunigungsspannung je Boratom weniger Energie und dringen entsprechend weniger tief ein – ein Weg, sehr flache Übergänge zu erzeugen, ohne den Implanter mit unpraktikabel niedrigen Spannungen betreiben zu müssen.

Channeling

Das verwendete Substrat liegt als Einkristall vor, d.h. die Siliciumatome sind regelmäßig angeordnet und bilden Kanäle. Die eingeschossenen Dotierstoffatome verlaufen dann parallel zu diesen Kanälen, werden nur schwach abgebremst und dringen sehr tief in das Substrat ein. Um dies zu verhindern gibt es zwei Möglichkeiten:

- Waferausrichtung: Die Wafer werden um ca. 7° zur Strahlrichtung ausgelenkt. Dadurch werden die Ionen nicht parallel zu den Gitterkanälen eingeschossen und durch Zusammenstöße frühzeitig abgebremst.
- Streuoxid: Auf der Waferoberfläche wird ein dünnes Oxid aufgebracht, das die Ionen ablenkt und ein senkrechtes Eintreffen im Substrat verhindert



Charakteristik

- Die Reproduzierbarkeit der Ionenimplantation ist sehr hoch
- Der Ablauf bei Raumtemperatur verhindert ein Ausdiffundieren anderer Dotierstoffe
- Als Maske dient Fotolack, Oxid wie bei der Diffusion ist nicht nötig
- Ionenimplanter sind teuer, die Kosten pro bearbeiteter Scheibe sind hoch
- Die Dotierstoffe breiten sich nicht seitlich unter der Maskierung aus (nur minimal durch Zusammenstöße)
- Nahezu jedes Element kann in höchster Reinheit implantiert werden
- Ähnlich den Ablagerungen von Dotierstoffen bei der Diffusion im Quarzrohr, können sich an Wänden oder Blenden Ionen ablagern, die bei späteren Implantationen abgelöst werden und auf die Wafer gelangen
- Senkrechte Flächen lassen sich mit einem gerichteten Ionenstrahl schlecht dotieren. Bei schräg gestellter Scheibe gelingt es begrenzt; für Strukturen wie die Finnen eines FinFET wird stattdessen aus einem Plasma heraus dotiert, dessen Ionen aus allen Richtungen auftreffen
- Der Implantationsprozess findet unter Hochvakuum statt, welches mit mehreren Turbomolekular- oder Kryopumpen erzeugt werden muss

Es gibt verschiedene Implantertypen, wobei meistens Mittel- und Hochstromimplanter zum Einsatz kommen. Mittelstromimplanter sind für kleine bis mittlere Dosen an Ionen geeignet ($1 \cdot 10^{11}$ – $1 \cdot 10^{15}$ Ionen/cm²), Hochstromimplanter für Dosen von $1 \cdot 10^{15}$ – $1 \cdot 10^{17}$ Ionen/cm².

Die Ionenimplantation hat sich auf Grund der Vorteile gegenüber der Diffusion größtenteils durchgesetzt.

Dotieren mittels Legierung

Der Vollständigkeit halber sei noch erwähnt, dass es neben diesen beiden Verfahren noch die Dotierung mittels Legierung gibt. Da dieses Verfahren aber Nachteile, wie z.B. Rissbildung im Substrat mit sich bringt, wird es in der heutigen Halbleitertechnik kaum mehr eingesetzt.