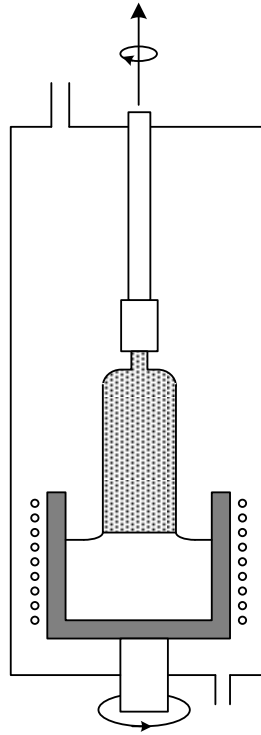


Halbleitertechnologie

von A bis Z



Waferherstellung

www.halbleiter.org

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis		II
Tabellenverzeichnis		III
1 Waferherstellung		1
1.1 Silicium		1
1.2 Herstellung des Rohsiliciums		2
1.2.1 Ausgangsmaterial Siliciumdioxid		2
1.2.2 Reinigung von Rohsilicium		3
1.2.3 Zonenreinigung		4
1.3 Herstellung des Einkristalls		4
1.3.1 Der Einkristall		4
1.3.2 Kristallziehverfahren nach Czochralski		5
1.3.3 Tiegelfreies Zonenziehen		6
1.3.4 Wieso sind Wafer rund?		7
1.4 Entstehung der Wafer		9
1.4.1 Wafervereinzelung und Oberflächenveredelung		9
1.4.2 Historische Entwicklung der Wafergröße		11
1.5 Dotiertechniken		13
1.5.1 Begriff		13
1.5.2 Diffusion		13
1.5.3 Diffusionsverfahren		14
1.5.4 Ionenimplantation		16

Abbildungsverzeichnis

1.1	Bohrsches Atommodell von Silicium	1
1.2	Darstellung der Zonenreinigung	4
1.3	Kristallorientierungen	5
1.4	Kristallziehen nach Czochralski	6
1.5	Tiegelfreies Zonenziehen	7
1.6	Verschiedene Wafertypen	9
1.7	Innenloch- und Drahtsäge	10
1.8	Kantenverrundung	10
1.9	Wafergrößen in der Übersicht	12
1.10	Diffusionsvorgänge im Kristallgitter	14
1.11	Diffusion mit Oxidmaske	15
1.12	Darstellung einer Implantationsanlage	17
1.13	Channelingeffekt im Einkristallgitter	18

Tabellenverzeichnis

1.1 Typische Daten von Wafern 11

1 Waferherstellung

1.1 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.

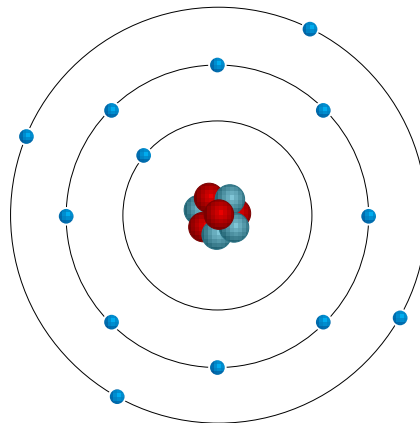


Abb. 1.1: Bohrsches Atommodell von Silicium

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 und spielt in der Halbleiterfertigung nur eine untergeordnete Rolle, bietet aber Vorteile gegenüber den anderen Formen von Silicium bei der Herstellung von Dünnschichtsolarzellen.

1.2 Herstellung des Rohsiliciums

1.2.1 Ausgangsmaterial Siliciumdioxid

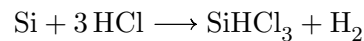
Silicium, das in der Halbleiterfertigung Verwendung findet, wird aus Quarz gewonnen. Dabei muss Sauerstoff, der sich bereits bei Raumtemperatur sehr schnell mit Silicium verbindet, und der auch beim Quarz in Verbindung mit Silicium als Siliciumdioxid vorliegt, entfernt werden. Das geschieht knapp über dem Schmelzpunkt von Silicium (1414 °C) in Öfen unter Verwendung von Kohlenstoff. Bei 1460 °C spaltet sich der Sauerstoff vom Silicium ab und reagiert mit Kohlenstoff (C) zu Kohlenmonoxid (CO):



Zugesetztes Eisen verhindert, dass sich Silicium mit Kohlenstoff zu Siliciumkarbid verbindet. Das Kohlenmonoxid ist bei diesen Temperaturen gasförmig, und kann leicht vom flüssigen Silicium getrennt werden. Jedoch ist das Rohsilicium noch stark verunreinigt. Es enthält noch bis zu 5 % Fremdstoffe, wie z.B. Eisen, Aluminium, Phosphor und Bor. Diese Stoffe müssen in weiteren Prozessen entfernt werden.

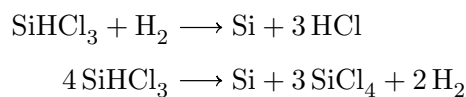
1.2.2 Reinigung von Rohsilicium

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:



Das Silicium schlägt sich auf den Siliciumseelen nieder, die dadurch auf über 300 mm dicke Stäbe anwachsen. 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.

1.2.3 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.

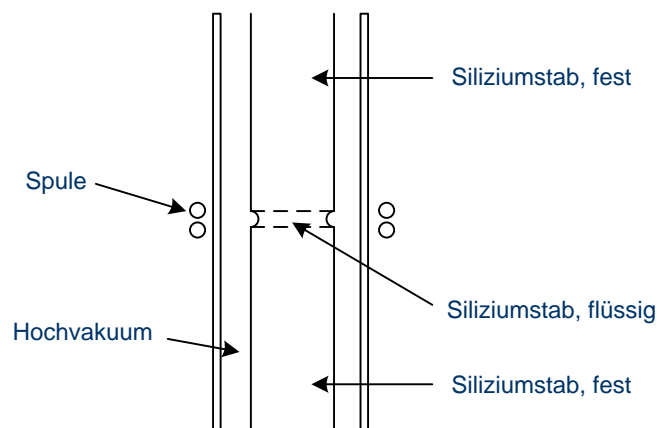


Abb. 1.2: Darstellung der Zonenreinigung

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.

1.3 Herstellung des Einkristalls

1.3.1 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.

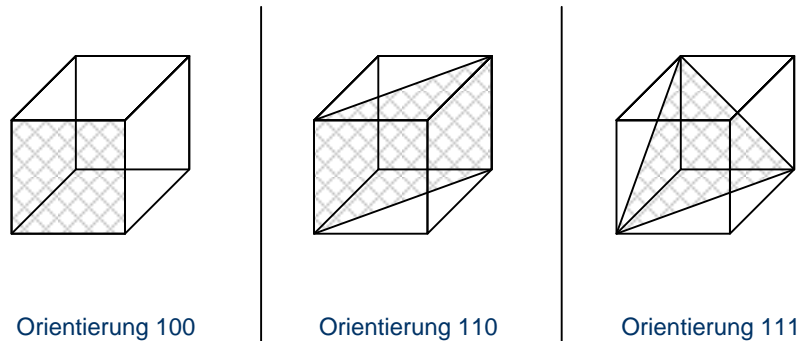


Abb. 1.3: Kristallorientierungen

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.

1.3.2 Kristallziehverfahren nach Czochralski

Das Silicium, das nach der Zonenreinigung in polykristalliner Form 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 $2 - 25 \text{ cm/h}$ beträgt, bestimmt. Je schneller gezogen wird,

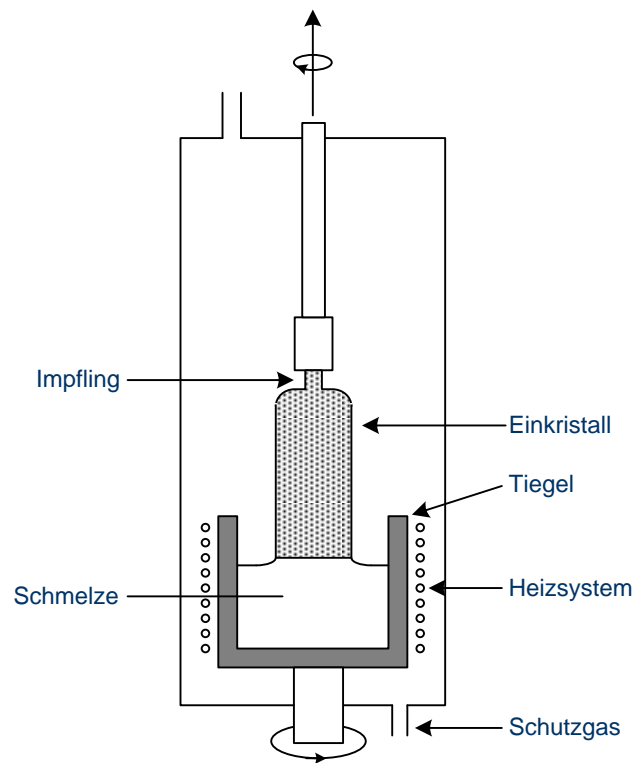


Abb. 1.4: Kristallziehen nach Czochralski

desto dünner wird der Kristall. Die gesamte Apparatur befindet sich in einer Schutzgasatmosphäre, damit es nicht zu einer Oxidation des Siliciums kommt.

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).

1.3.3 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.

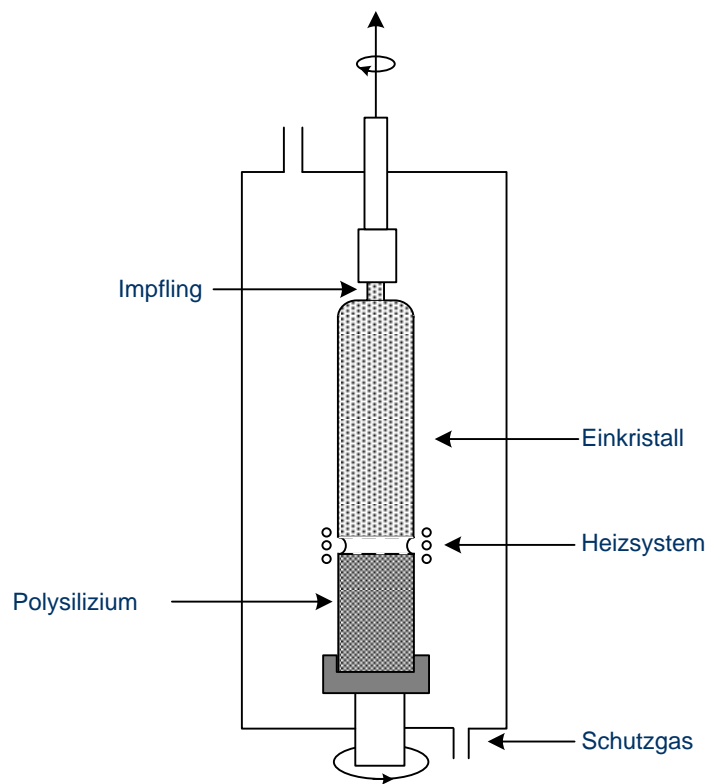


Abb. 1.5: Tiagelfreies Zonenziehen

1.3.4 Wieso sind Wafer rund?

Oft stellt sich die Frage, wieso Wafer rund sein müssen, wo die Mikrochips doch rechteckig sind. 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.

Wäre es nun sinnvoll, die hochreinen Siliciumstäbe vom Waferhersteller in eine rechteckige Form sägen zu lassen, und das überschüssige Material wieder einzuschmelzen und erneut zu verwenden?

Auch wenn dies technisch machbar wäre, 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.

1.4 Entstehung der Wafer

1.4.1 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.

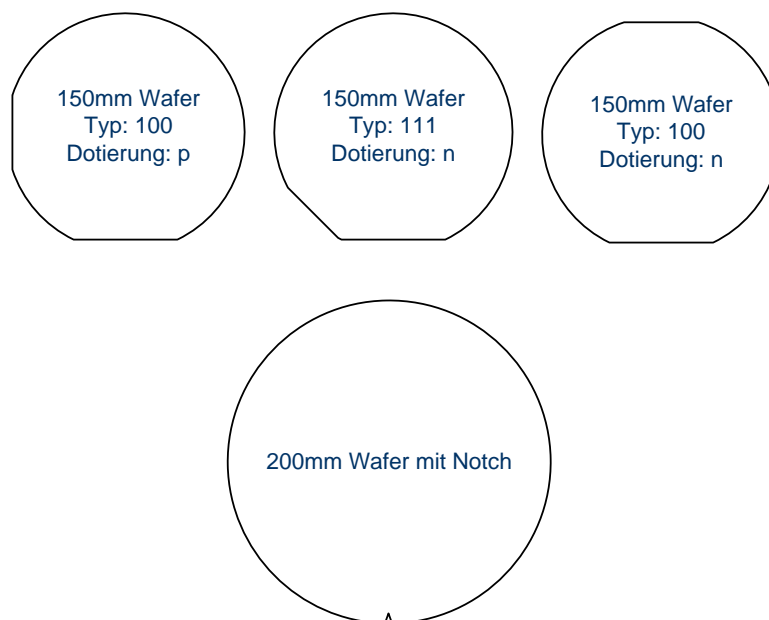


Abb. 1.6: Verschiedene Wafertypen

Sägen:

Mit einer Innenlochsäge, deren Schnittkante mit Diamantsplittern besetzt ist, wird der Einkristallstab in dünne Scheiben zersägt. Die Innenlochsäge bietet eine hohe Genauigkeit beim Sägen ohne Unebenheiten hervorzurufen. Bis zu 20 % des Kristallstabs gehen beim Sägen der Scheiben auf Grund der Dicke des Sägeblatts verloren. Heutzutage wird jedoch immer öfter das sogenannte Drahtsägen angewandt, bei dem mehrere Wafer auf einmal aus dem Stab geschnitten werden können. 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 $0,1 - 0,2\text{ mm}$ dick.

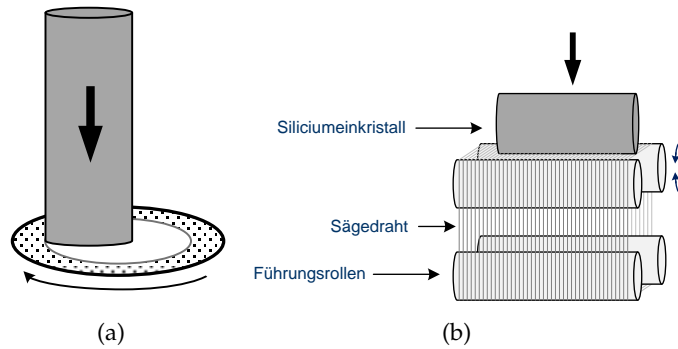


Abb. 1.7: Innenloch- und Drahtsäge

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 $50\ \mu\text{m}$ ($0,05\text{ mm}$) 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. $2\ \mu\text{m}$.

Scheibenrand abrunden:

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

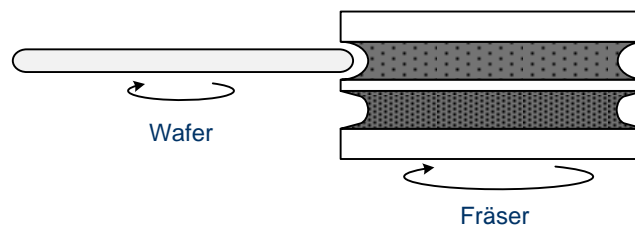


Abb. 1.8: Kantenverrundung

Ätzen:

In einem Tauchätzschritt, mit einer Mischung aus Fluss-, Essig- und Salpetersäure, werden noch einmal $50\ \mu\text{m}$ 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 $3\ \text{nm}$ ($0,000003\ \text{mm}$). Dazu werden die Scheiben mit einem Gemisch aus Natronlauge (NaOH), Wasser und Siliciumdioxidkörnern behandelt. Das Siliciumdioxid entfernt weitere $5\ \mu\text{m}$ von der Scheibenoberfläche, Die Natronlauge entfernt Oxid und beseitigt Bearbeitungsspuren der Siliciumdioxidkörner.

1.4.2 Historische Entwicklung der Wafergröße

Die Herstellung von integrierten Schaltkreisen auf Siliciumwafern begann Mitte der 1960-er Jahre auf Scheiben, mit einem Durchmesser von $25\ \text{mm}$. Heutzutage werden in modernen Halbleiterfertigungen Wafer mit einem Durchmesser von $150 - 300\ \text{mm}$ eingesetzt. Ab 2013 wollen die ersten Chiphersteller auf Wafer mit einem Durchmesser von $450\ \text{mm}$ umsteigen, die Waferfläche beträgt dann mehr als das 300-fache der winzigen 1-Zoll-Wafer vor gut 50 Jahren.

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 $300\ \text{mm}$ Wafer hergestellt werden, wie es auf einem $200\ \text{mm}$ Wafer der Fall ist.

Typ	Durchmesser [mm]	Dicke [μm]	1. Flat [mm]	Durchbiegung [μm]
6 Zoll	$150\pm 0,5$	≈ 700	55-60	25
8 Zoll	$200\pm 0,5$	≈ 700	55-60	25
12 Zoll	$300\pm 0,5$	≈ 700	55-60	25

Tab. 1.1: Typische Daten von Wafern

Beim Übergang zu einer Wafergröße von $450\ \text{mm}$ ergeben sich zahlreiche Probleme, die es zu meistern gilt. So muss u.a. die Durchbiegung beachtet werden, damit sich

die übereinander gelagerten Wafer während des Transports nicht berühren. Ebenso müssen Auflageflächen von Waferhandler in Fertigungsanlagen neu gestaltet werden.

Durch Schichtspannungen können sich größere Wafer wesentlich leichter verformen. Auf Grund der Materialkosten und der zu beachtenden Eigenfrequenz der Wafer, können diese jedoch nicht einfach dicker gemacht werden können.

Auch ermöglicht ein größerer Wafer nicht automatisch eine billigere Produktion, da auch eine größere Fläche bearbeitet werden muss. Im Vergleich zu 300-mm-Wafern müssen die Energiekosten pro cm^2 um den Faktor 2,25 gesenkt werden, um die Fertigungskosten auf einem ähnlichen Niveau zu halten. Da die Herstellung der Wafer mehr als doppelt so lange dauert, ist auch die Wahrscheinlichkeit größer, dass sich Fehler ins Kristallgitter einbauen.

Und auch die Bearbeitung der Wafer stellt eine große Herausforderung dar, da alle Prozesse auf eine deutlich größere Fläche angepasst werden müssen.

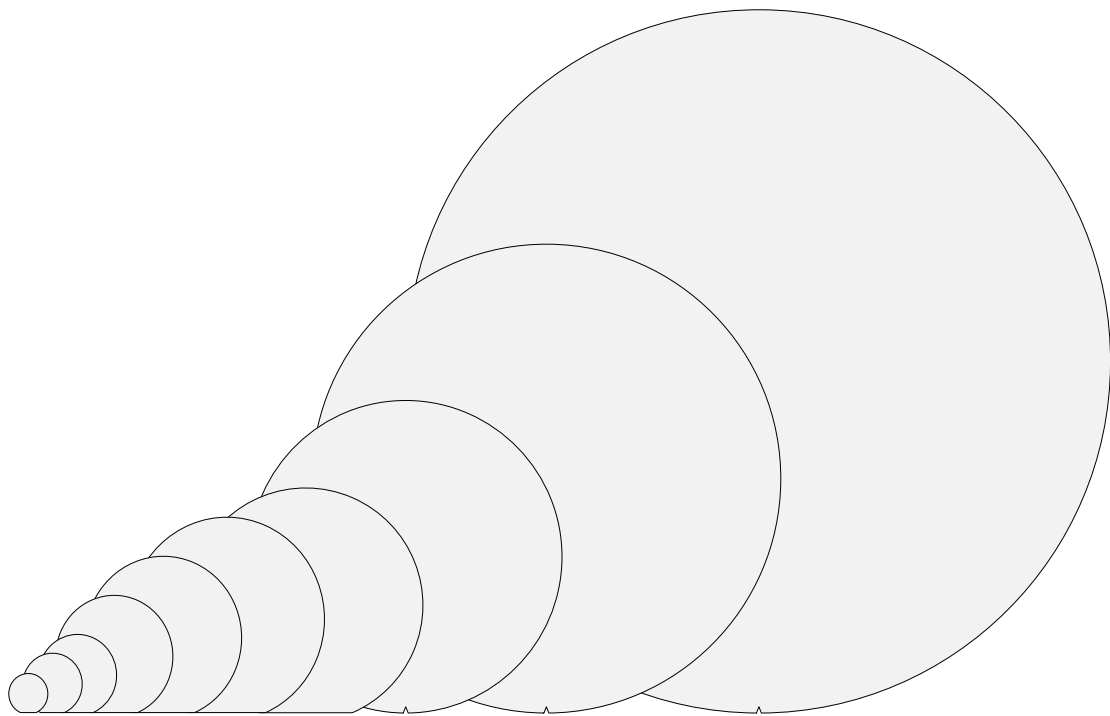


Abb. 1.9: Wafergrößen in der Übersicht: 25, 38, 51, 75, 100, 125, 150, 200, 300, 450 [mm] (Maßstabsgetreu)

1.5 Dotiertechniken

1.5.1 Begriff

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 beschriebenen Dotiertechniken das partielle Dotieren der Siliciumscheiben. Das Einbringen des Fremdstoffs kann mit verschiedenen Methoden erreicht werden: Diffusion, Implantation (und Legierung).

1.5.2 Diffusion

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.

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)

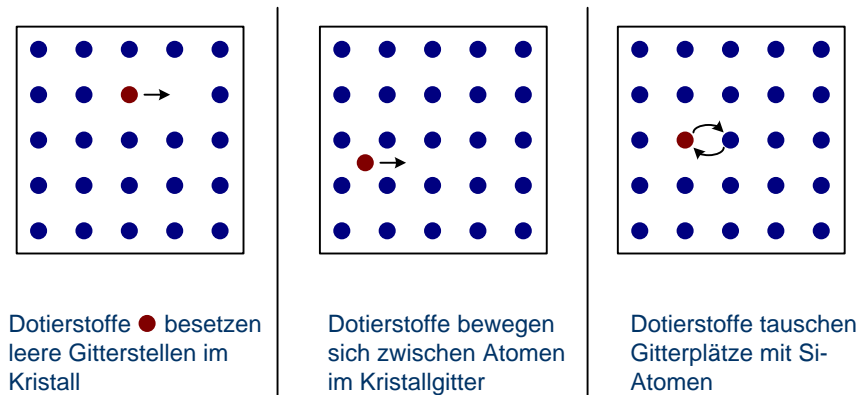


Abb. 1.10: Diffusionsvorgänge im Kristallgitter

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.

1.5.3 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.

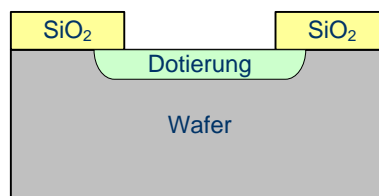
Diffusion mit flüssiger Quelle:

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



Der Dotierstoff wandert auch seitlich unter die Maskierung

Abb. 1.11: Diffusion mit Oxidmaske

1.5.4 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 auf die gewünschte Stelle
- **Waferstation:** Die Wafer werden entweder einzeln oder auf großen rotierenden Rädern in den Ionenstrahl gebracht und bestrahlt

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 Dotie-

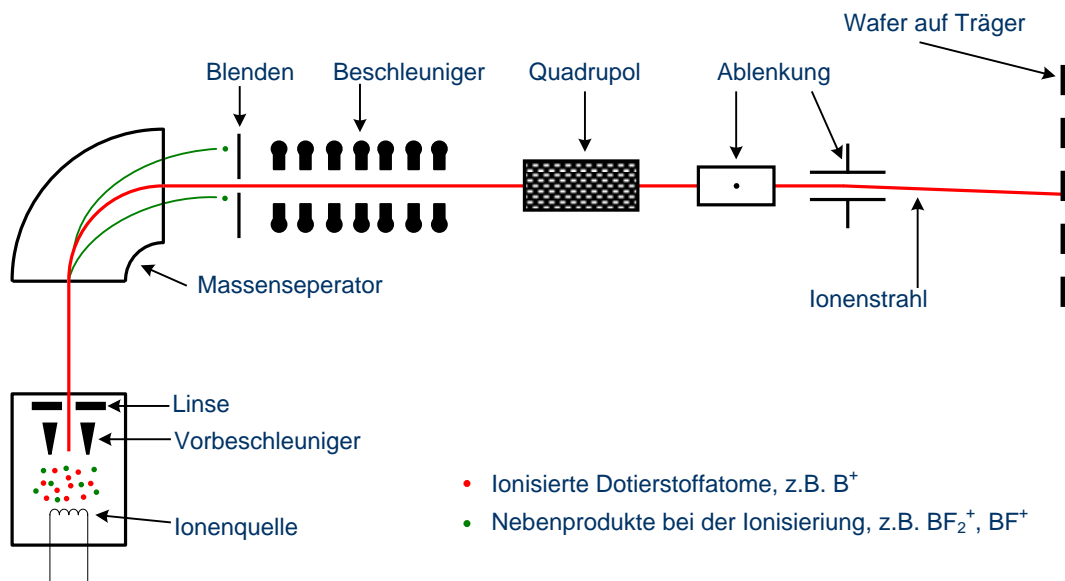


Abb. 1.12: Darstellung einer Implantationsanlage

rionen 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. $1000\text{ }^\circ\text{C}$ 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. $500\text{ }^\circ\text{C}$ ausgeheilt. Da sich die Dotieratome während den hohen Temperaturen im Substrat bewegen, werden diese Schritte nur sehr kurze Zeit durchgeführt.

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 senkrechtres Eintreffen im Substrat verhindert.

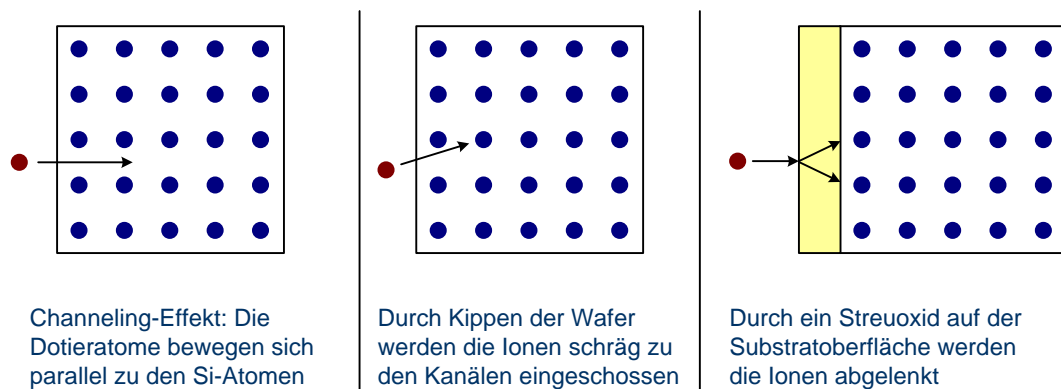


Abb. 1.13: Channelingeffekt im Einkristallgitter

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
- Dreidimensionale Strukturen (z.B. Gräben) können mit der Ionenimplantation nicht dotiert werden
- Der Implantationsprozess findet unter Hochvakuum statt, welches man mit mehreren Turbomolekular- oder Kryopumpen erzeugen kann

Es gibt verschiedene Implantertypen, wobei meistens Mittel- und Hochstromimplanter zum Einsatz kommen. Mittelstromimplanter sind für kleine bis mittlere Dosen an

Ionen geeignet ($1 \cdot 10^{11} - 1 \cdot 10^{15} \text{ Ionen/cm}^2$), Hochstromimplanter für Dosen von $1 \cdot 10^{15} - 1 \cdot 10^{17} \text{ Ionen/cm}^2$.

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.

