

1 Waferherstellung

1.1 Dotiertechniken

1.1.1 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).

1.1.2 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)

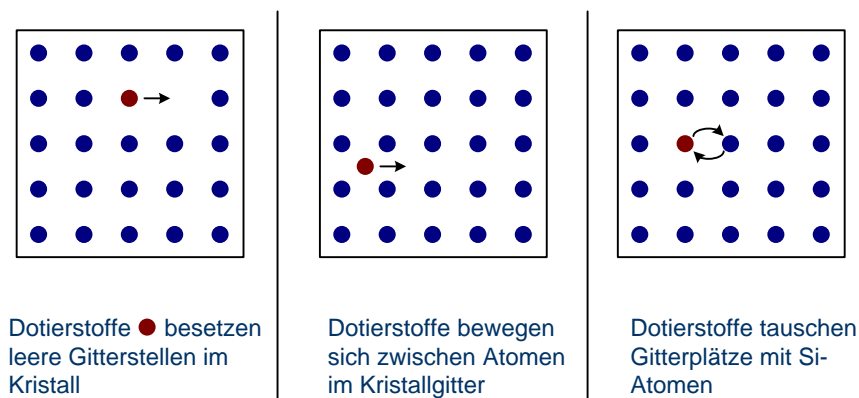


Abb. 1.1: Diffusionsvorgänge im Kristallgitter

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.

1.1.3 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.

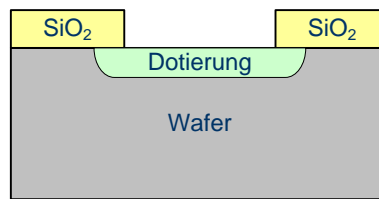
Diffusion mit flüssiger Quelle:

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 °C pro Minute) auf ca. 900 °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 °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. 1.2: Diffusion mit Oxidmaske

1.1.4 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
- **Massenseperator:** 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 Seperator 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

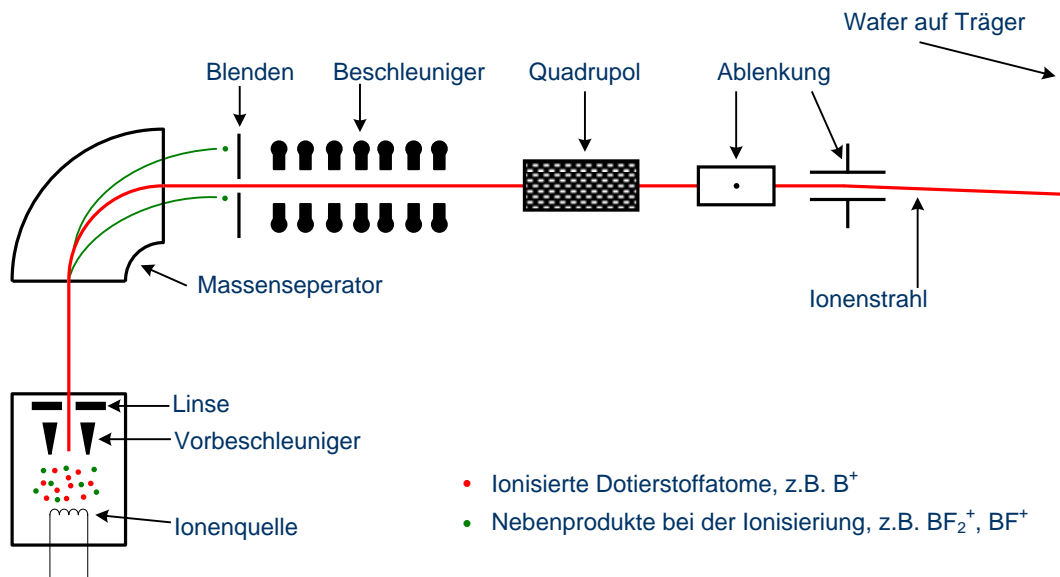


Abb. 1.3: Darstellung einer Implantationsanlage

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. $1000\text{ }^\circ\text{C}$ 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 senkrechtetes Eintreffen im Substrat verhindert.

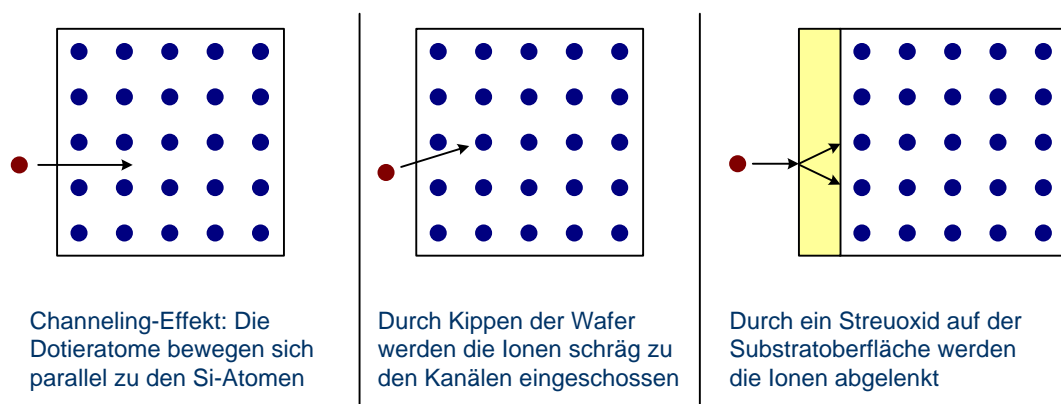


Abb. 1.4: Channelingeffekt im Einkristallgitter

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.