

Halbleitertechnologie von A bis Z

Waferherstellung

Dotiertechniken	3
<i>Dotieren</i>	3
<i>Diffusion</i>	3
<i>Diffusionsverfahren</i>	5
<i>Ionenimplantation</i>	6

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

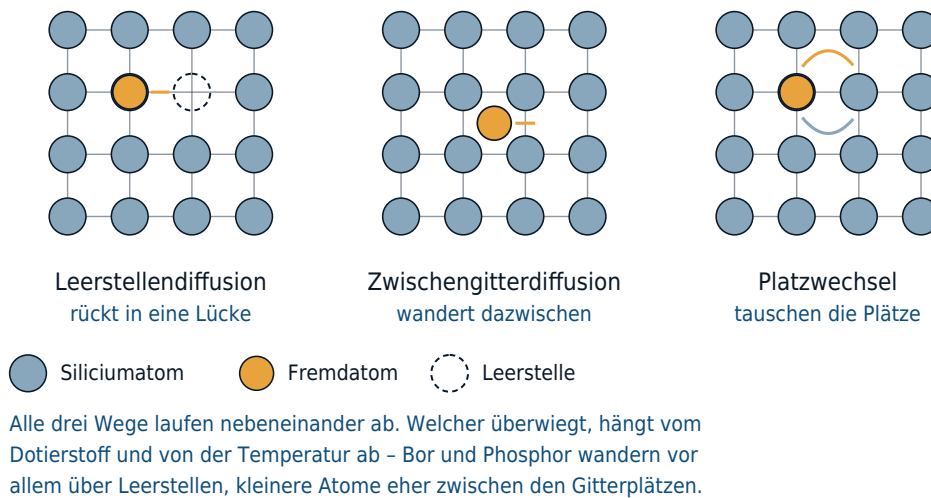
Zur gezielten Dotierung wird die Diffusion heute kaum noch eingesetzt; sie ist durch die [Ionenimplantation](#) abgelöst worden. Zu verstehen ist sie trotzdem unverzichtbar, denn sie hört nicht auf zu wirken: Jeder spätere Hochtemperaturschritt lässt bereits eingebrachte Dotierstoffe weiterwandern. Das 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



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.

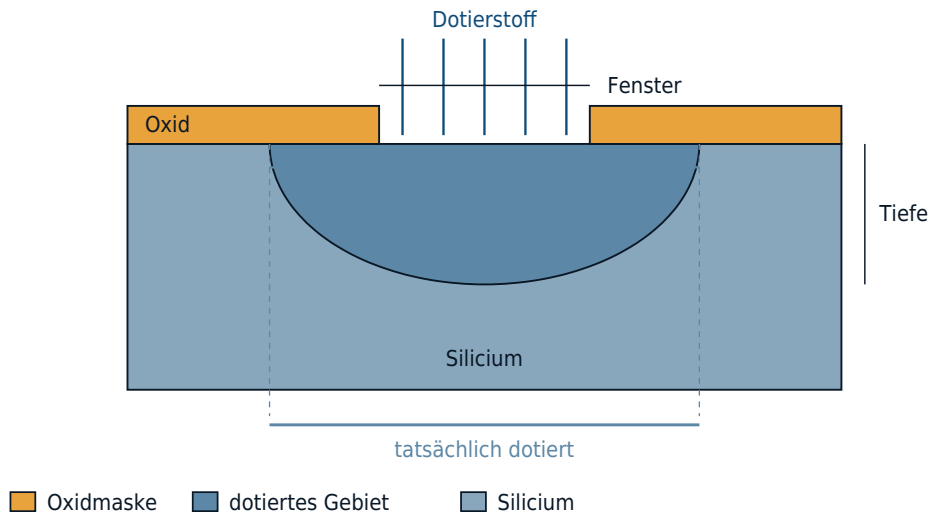
Charakteristik:

- 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.

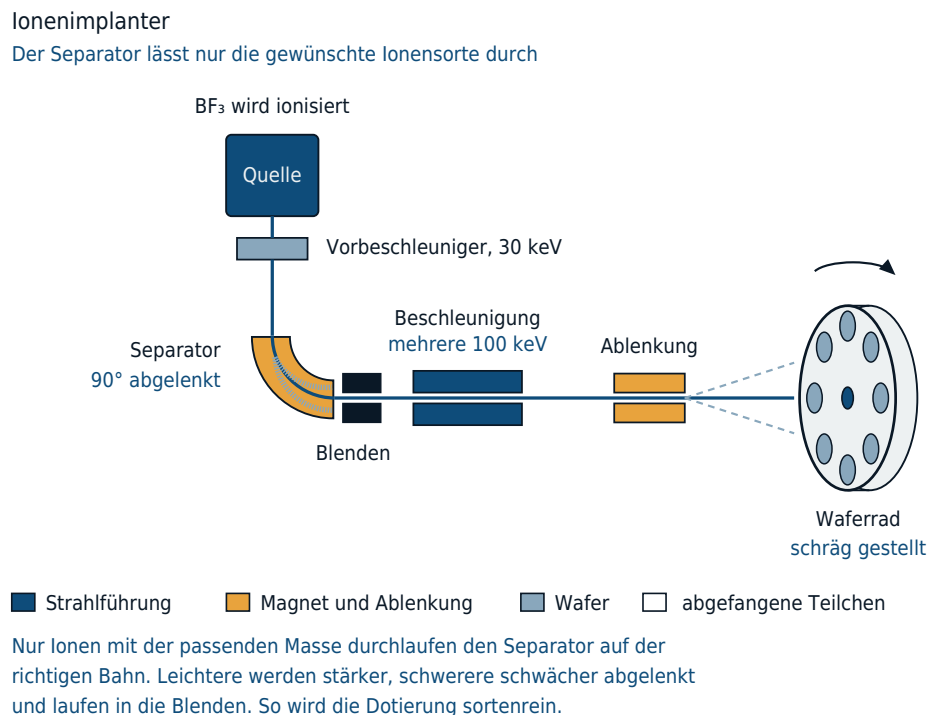
Ein Implanter besteht aus folgenden Komponenten:

- 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.