

Halbleitertechnologie von A bis Z

Dotiertechniken

Diffusion	3
<i>Dotieren</i>	3
<i>Diffusion</i>	3
<i>Diffusionsverfahren</i>	5
<i>Fick'sche Gesetze und Konzentrationsprofile</i>	6
<i>Thermisches Budget in der Prozessintegration</i>	7
<i>Wo Diffusion heute noch eingesetzt wird</i>	7

Diffusion

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 in diesem Bereich beschriebenen Dotiertechniken das partielle Dotieren der Siliciumscheiben. Das Einbringen des Fremdstoffs kann mit verschiedenen Methoden erreicht werden: [Diffusion](#), [Ionenimplantation](#) (und Legierung).

Diffusion

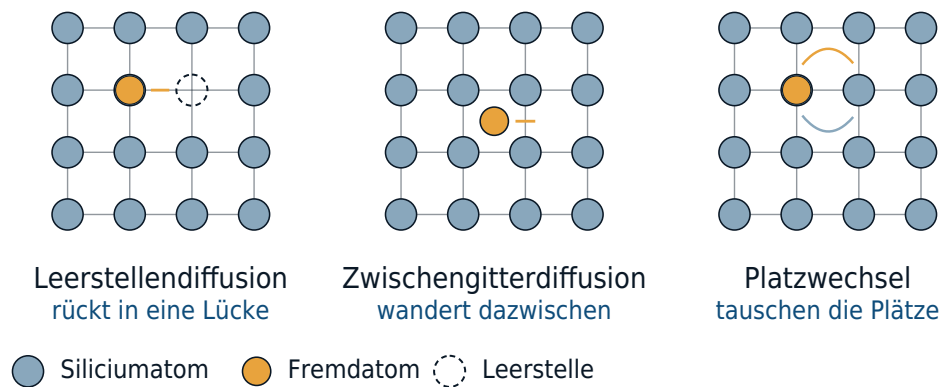
Zur gezielten Dotierung wird die Diffusion heute kaum noch eingesetzt; sie ist durch die [Ionenimplantation](#) abgelöst worden. Zu verstehen ist sie trotzdem unverzichtbar, denn sie hört nicht auf zu wirken: Jeder spätere Hochtemperaturschritt lässt bereits eingebrachte Dotierstoffe weiterwandern. Das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



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.

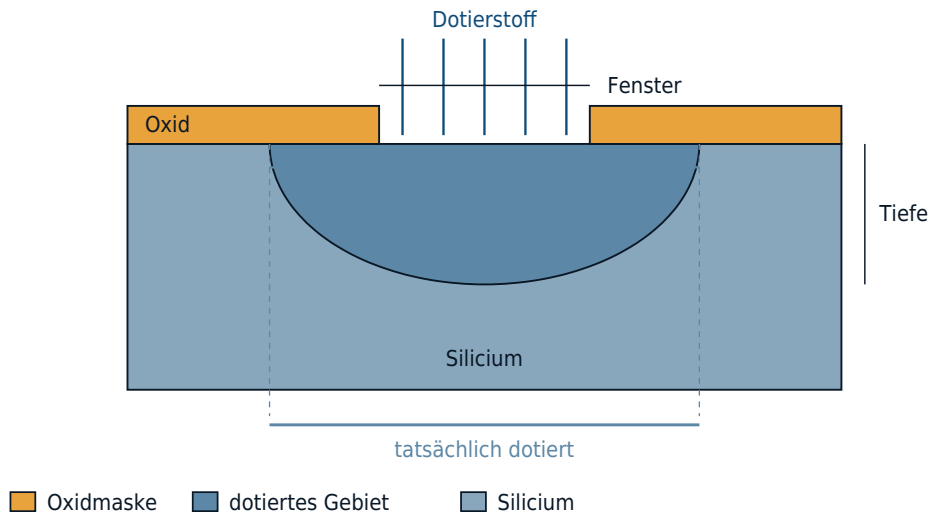
Charakteristik:

- 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.

Fick'sche Gesetze und Konzentrationsprofile

Die qualitative Beschreibung aus dem vorigen Absatz lässt sich präzisieren: Diffusion folgt den Fickschen Gesetzen. Das erste besagt, dass der Teilchenstrom proportional zum Konzentrationsgefälle ist; das zweite beschreibt, wie sich das Konzentrationsprofil über die Zeit verändert. Je nach Randbedingung ergeben sich daraus zwei charakteristische Profilformen, die in der Praxis gezielt genutzt werden.

Prädeposition hält die Oberflächenkonzentration konstant auf der Löslichkeitsgrenze des Dotierstoffs im Silicium – die Quelle liefert unbegrenzt nach. Daraus ergibt sich ein komplementäres Fehlerfunktionsprofil (erfc-Profil): steil abfallend, mit einer durch die Löslichkeitsgrenze gedeckelten Gesamtdosis.

Drive-in dagegen arbeitet ohne Nachschub: Die bereits eingebrachte Dosis ist fix, nur die vorhandenen Atome wandern bei der Prozesstemperatur weiter ins Substrat. Das ergibt ein Gauß-Profil, das mit der Zeit breiter und flacher wird, während die Gesamtdosis erhalten bleibt.

In der Praxis werden beide Schritte kombiniert: eine kurze Prädeposition legt eine exakt definierte Gesamtdosis fest, ein anschließender Drive-in-Schritt ohne

weitere Zufuhr formt daraus das gewünschte Tiefenprofil. Die charakteristische Eindringtiefe wächst dabei mit der Wurzel aus dem Produkt von Diffusionskoeffizient und Zeit ($D \cdot t$) – genau dieses Produkt ist das thermische Budget, das ein Wafer bei einem Diffusionsschritt „verbraucht“.

Thermisches Budget in der Prozessintegration

Weil Diffusion nie ganz zum Stillstand kommt, addiert sich das Produkt $D \cdot t$ über alle Hochtemperaturschritte hinweg, die ein Wafer im Lauf der Fertigung durchläuft – das thermische Budget. Diese Kopplung diktiert einen wesentlichen Teil der Reihenfolge im gesamten Frontend-Ablauf: Schritte, die selbst ein hohes thermisches Budget benötigen – Wannen-Drive-in, Feldoxidwachstum, Gettering – müssen früh im Prozessablauf passieren, solange noch keine flachen, empfindlichen Profile existieren, die dadurch verwaschen würden. Die flachsten und am engsten tolerierten Profile, allen voran die Source/Drain-Extensions, entstehen deshalb so spät wie möglich und werden anschließend nur noch minimal thermisch belastet – mit den bereits erwähnten kurzen Ausheilverfahren wie Spitzenheizen oder Blitzlampenausheilung.

Neben der reinen Diffusion verändert auch die Segregation an der Oxid-Silicium-Grenze das Profil bei jedem nachfolgenden Oxidationsschritt (siehe [Thermische Oxidation](#)).

Dieses Prinzip erklärt auch den grundsätzlichen Trend der letzten Jahrzehnte: Wo immer ein flaches, präzises Profil gebraucht wird, verdrängt Ionenimplantation mit knappem Ausheilschritt die klassische Diffusion, weil sie das thermische Gesamtbudget des Wafers deutlich schont.

Wo Diffusion heute noch eingesetzt wird

Trotz der Verdrängung durch Ionenimplantation ist Diffusion keineswegs obsolet – sie bleibt überall dort erste Wahl, wo tiefe, wenig kritische Profile gefragt sind oder das thermische Budget keine Rolle spielt.

Tiefe Wannen und Leistungsbaulemente: Für Sperrschichttiefen von mehreren Mikrometern, wie sie in Leistungshalbleitern oder älteren, unkritischeren Technologien vorkommen, wäre Ionenimplantation nur mit unpraktikabel hohen Beschleunigungsspannungen möglich – Diffusion erledigt das mit einem einfachen Ofenprozess.

Gettering: Schnell diffundierende Metallverunreinigungen wie Eisen, Kupfer oder Nickel lassen sich durch einen gezielten Hochtemperaturschritt aus dem aktiven Bauelementbereich heraus in eine Opferzone (etwa mechanisch geschädigte Rückseite oder eine hochdotierte Schicht) diffundieren, wo sie

unschädlich sind. Dieser Prozess nutzt die Diffusion selbst als Reinigungsmechanismus.

Solarzellen: Die Emitterschicht kristalliner Siliciumsolarzellen wird industriell nach wie vor überwiegend per POCl_3 -Rohrdiffusion hergestellt – günstig, hoher Durchsatz, und die Anforderungen an Profiltiefe und -schärfe liegen weit unter denen der Logikfertigung.