Halbleitertechnologie von A bis Z

Dotiertechniken

Diffusion 3
Dotieren 3
Diffusion 3
Diffusionsverfahren 5
Fick’sche Gesetze und Konzentrationsprofile 6
Thermisches Budget in der Prozessintegration 7
Wo Diffusion heute noch eingesetzt wird 7
Ionenimplantation 8
Ionenimplantation 8
Eindringtiefe und Ausheilen 9
Channeling 10
Charakteristik und Implantertypen 11
Plasma-Doping (PLAD) 12
Halo- und Well-Implantate in der CMOS-Integration 13
Amorphisierung und Defektausheilung 14
Dosismetrologie 15

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).

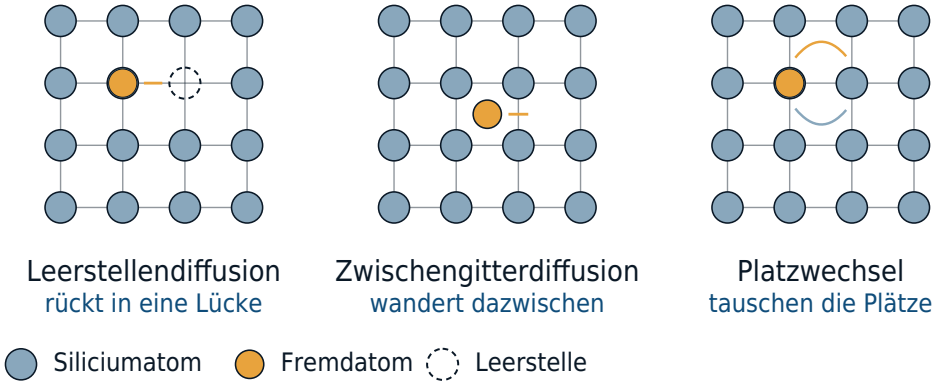
Diffusion

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 gesamt 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.

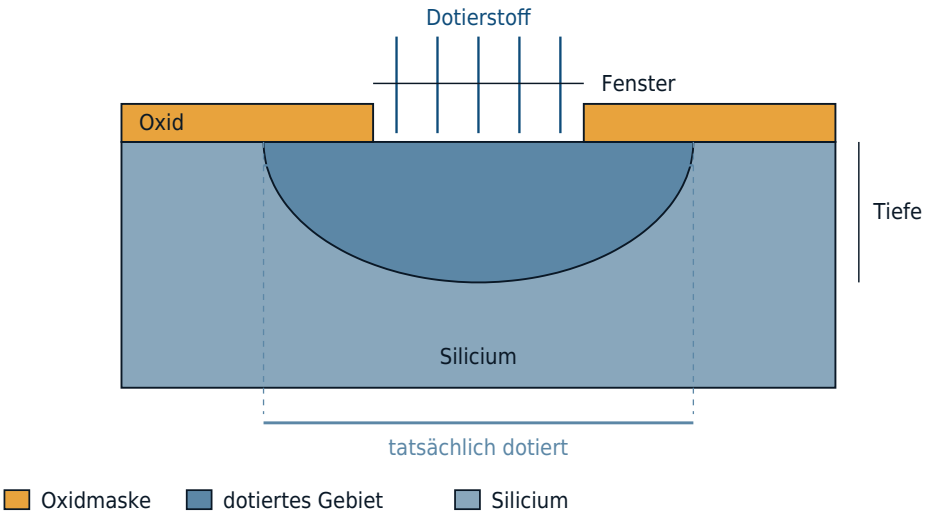
Charakteristik:

- 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

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 · 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 · 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 Leistungsbauelemente: 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.

Ionenimplantation

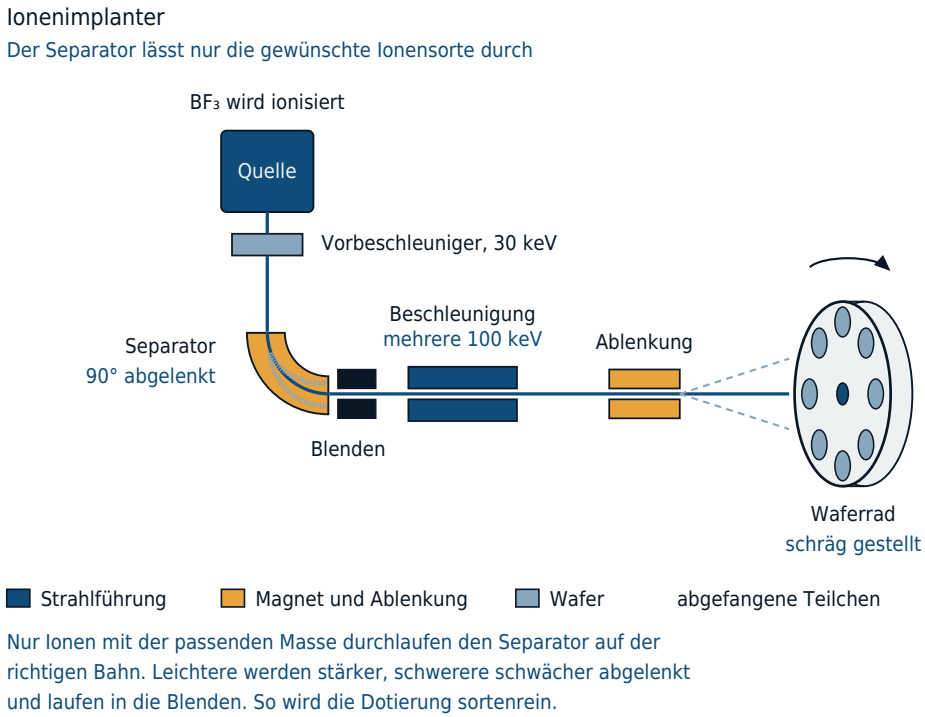
Ionenimplantation

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 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 und Ausheilen

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.

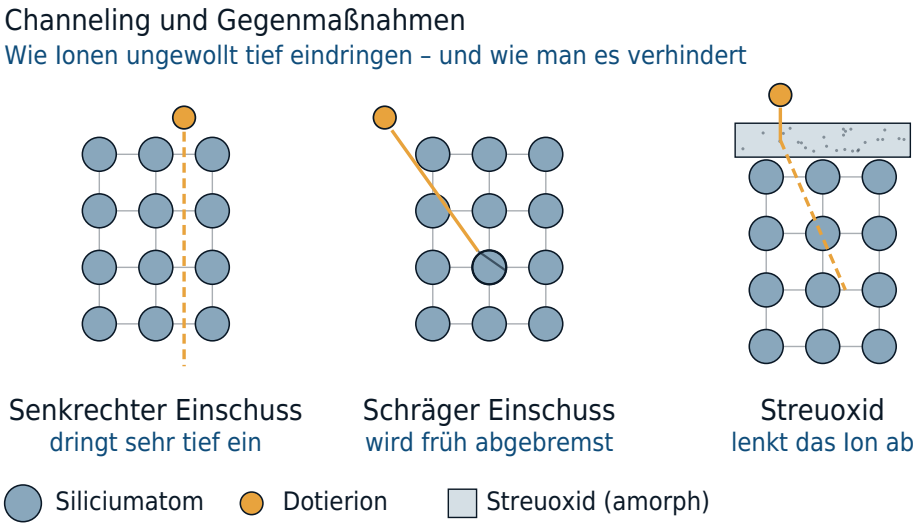
Genau hier liegt der Zielkonflikt des Verfahrens: Die Temperatur muss hoch genug sein, um die Dotierstoffe auf Gitterplätze zu bringen, und die Zeit kurz genug, damit sie dabei nicht auswandern. Beides gleichzeitig erreicht man nur, indem man die Heizdauer immer weiter verkürzt. Aus dem Ofenprozess über 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 und Implantertypen

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/cm^2), Hochstromimplanter für Dosen von $1 \cdot 10^{15}$–$1 \cdot 10^{17}$ 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.

Plasma-Doping (PLAD)

Bei Strukturen, die nicht mehr flach auf dem Wafer liegen, sondern wie FinFET-Finnen oder Gate-All-Around-Nanosheets in die dritte Dimension ragen, stößt der klassische, gerichtete Ionenstrahl an seine Grenzen: Seitenwände liegen quer zum Strahl und werden kaum dotiert, selbst mit gekippter Scheibe. Plasma-Doping (PLAD) löst dieses Problem, indem es auf die Strahlführung des klassischen Implanters komplett verzichtet.

Der Wafer liegt dabei auf einer gepulsten Hochspannungselektrode in einer Plasmakammer, in der ein Prozessgas des gewünschten Dotierstoffs (z. B. Diboran B_2H_6 oder Phosphin PH_3) gezündet wird. Jeder Hochspannungspuls stößt eine Plasmarandschicht (Sheath) um den Wafer herum auf, durch die die Ionen zur Oberfläche hin beschleunigt werden – nicht als schmaler Strahl aus einer Richtung, sondern flächig aus dem gesamten Plasma. Weil die Randschicht der Kontur des Wafers folgt, werden auch Seitenwände von Finnen und Stegen nahezu konform mitdotiert.

Der Preis dafür ist der Verzicht auf den Massenseparator: Da kein Magnetfeld die Ionen nach Masse sortiert, gelangen alle im Plasma ionisierten Spezies gemeinsam auf den Wafer – neben dem gewünschten Dotierion auch Wasserstoff, Molekülbruchstücke und mögliche Verunreinigungen des Prozessgases. Dosis und Sortenreinheit lassen sich damit weniger genau kontrollieren als bei der klassischen Implantation mit Massenseparation (siehe Ionenimplantation). Da der gesamte Wafer gleichzeitig belichtet wird statt Punkt für Punkt abgerastert zu werden, ist der Durchsatz dafür erheblich höher, und die typischerweise sehr niedrigen Pulsenergien im Bereich weniger Kiloelektronenvolt eignen sich gut für extrem flache Dotierprofile.

In der Serienfertigung wird PLAD deshalb gezielt dort eingesetzt, wo klassische Implantation an der Geometrie scheitert – etwa zur Dotierung der Finnenflanken oder als Ersatz für stark gekippte Extension-Implantate, wo die Abschattung durch benachbarte Strukturen sonst zum Problem wird (siehe auch Charakteristik und Implantertypen).

Halo- und Well-Implantate in der CMOS-Integration

Ein fertiger Transistor entsteht nicht durch eine einzelne Implantation, sondern durch das Zusammenspiel mehrerer, zeitlich und energetisch klar getrennter Implantationsschritte, die jeweils eine andere Tiefe und einen anderen Zweck haben.

Wannen (Well-Implantate)

Ganz am Anfang der Frontend-Prozessierung legen Wannenimplantate mit Energien im MeV-Bereich großflächige n- oder p-dotierte Bereiche tief im Substrat an, in denen später die Transistoren des jeweils anderen Typs entstehen – eine n-Wanne beherbergt p-Kanal-, eine p-Wanne n-Kanal-Transistoren. Diese Implantate reichen mehrere hundert Nanometer bis wenige Mikrometer tief und bestimmen vor allem das elektrische Verhalten des Substrats als Ganzes.

Halo- bzw. Pocket-Implantate

Direkt unter der späteren Source- und Drain-Kante sitzt ein gegensätzlich dotierter, schmaler Bereich, das Halo- oder Pocket-Implantat. Es erhöht lokal die Dotierstoffkonzentration am Rand des Kanals und wirkt damit dem Kurzkanaleffekt entgegen: Ohne Halo würde sich die Verarmungszone von Source und Drain bei kurzen Kanallängen so weit ausdehnen, dass sie sich berühren (Punch-through) und der Transistor die Kontrolle über den Kanal verliert. Weil dieser Bereich direkt unter der Gate-Kante liegen muss, wird er mit deutlich stärkerem Kippwinkel implantiert als die übrigen Schritte.

Vierfachrotation

Da auf einem Chip Transistoren in allen vier Richtungen zueinander ausgerichtet sein können, würde ein einzelner gekippter Implantationsschritt nur die Gates symmetrisch dotieren, deren Kanalrichtung zufällig zur Kippebene passt – alle anderen erhielten ein asymmetrisches, richtungsabhängiges Profil. Deshalb wird der Halo-Schritt viergeteilt: Dieselbe Dosis wird in vier Teilschritten bei gleichem Kippwinkel, aber um jeweils 90 ° um die Waferachse gedreht, appliziert. In Summe erhält jedes Gate unabhängig von seiner Orientierung auf dem Chip eine symmetrische Halo-Dotierung von allen vier Seiten.

LDD- und Source/Drain-Implantate

Die Lightly Doped Drain (LDD) genannten Extension-Implantate liegen flach und

niedrigdosiert direkt an der Gate-Kante; sie glätten den Konzentrationsverlauf zwischen Kanal und den tiefen, hochdosierten Source/Drain-Implantaten und senken damit das elektrische Feld an der Drain-Kante – ein zu abrupter Übergang würde sonst heiße Ladungsträger erzeugen, die das Gate-Oxid schädigen. Erst die abschließenden Source/Drain-Implantate mit hoher Dosis liefern die eigentlichen, niederohmigen Anschlussgebiete des Transistors.

Amorphisierung und Defektausheilung

Bei ausreichend hoher Dosis, insbesondere mit schweren Ionen, zerstört die Implantation die Kristallstruktur so gründlich, dass die getroffene Schicht amorph wird – das Silicium verliert lokal seine regelmäßige Gitterordnung vollständig. Statt das zu vermeiden, wird dieser Effekt in modernen Prozessen gezielt genutzt.

Voramorphisierung (PAI)

Vor der eigentlichen Dotierstoffimplantation schießt ein Voramorphisierungsschritt (Pre-Amorphization Implant, PAI) elektrisch inaktive Ionen wie Germanium oder Silicium selbst in die Oberfläche und erzeugt so gezielt eine gleichmäßig amorphe Schicht. Der anschließende Dotierstoff trifft dann nicht mehr auf ein Kristallgitter mit offenen Kanälen, sondern auf ungeordnetes Material – Channeling wird dadurch von vornherein unterbunden, unabhängig vom Kippwinkel.

Festphasenepitaxie und End-of-Range-Defekte

Beim anschließenden Ausheilen wächst die amorphe Schicht von der darunterliegenden intakten Kristallstruktur ausgehend wieder einkristallin zusammen (Festphasenepitaxie). Genau an der ursprünglichen Grenze zwischen amorphem und kristallinem Material bleibt dabei jedoch häufig ein Band von Defekten zurück, die End-of-Range-Defekte (EOR-Defekte): Versetzungsringe aus überschüssigen Zwischengitteratomen, die während der Implantation über die eigentliche amorphe Zone hinausgeschossen wurden und beim Ausheilen nicht vollständig eingebaut werden.

Transiente Diffusionsbeschleunigung (TED)

Diese überschüssigen Zwischengitteratome sind nicht nur elektrisch inaktive Kristallfehler, sie beschleunigen auch die Diffusion benachbarter Dotierstoffe – allen voran Bor – für die kurze Dauer ihrer eigenen Ausheilung um ein Vielfaches. Dieser Effekt heißt Transient Enhanced Diffusion (TED) und sorgt

dafür, dass sich Dotierprofile beim Ausheilen deutlich weiter ausbreiten, als es die Gleichgewichtsdiffusion bei der jeweiligen Temperatur erwarten ließe. Da TED nur solange wirkt, wie überschüssige Zwischengitteratome vorhanden sind, zielen Gegenmaßnahmen auf genau diesen Zeitraum: sehr kurze Ausheilzeiten (siehe Eindringtiefe und Ausheilen), die den Defekten keine Zeit zum Wandern lassen, oder eine Kohlenstoff-Co-Implantation, die Zwischengitteratome gezielt abfängt, bevor sie die Dotierstoffdiffusion antreiben können.

Dosismetrologie

Wie viele Ionen tatsächlich in den Wafer gelangt sind, muss sowohl während der Implantation als auch danach überprüfbar sein – beide Kontrollen messen dabei grundsätzlich verschiedene Größen.

Faraday-Cup: Dosiskontrolle in Echtzeit

Im Implanter selbst übernehmen ein oder mehrere Faraday-Cups die Dosiskontrolle: Sie fangen einen bekannten Anteil des Ionenstrahls auf und messen dessen Stromfluss. Durch Integration des Stroms über die Zeit ergibt sich die aufsummierte Ladung und daraus, bezogen auf die bestrahlte Fläche und die Ladung je Ion, die tatsächlich applizierte Dosis. Der Implanter stoppt den Prozess automatisch, sobald die Zieldosis erreicht ist. Mehrere Cups an Rand und Zentrum des Wafers erlauben zudem, die Gleichmäßigkeit des Strahls über die Scheibe zu überwachen. Diese Messung ist schnell und läuft bei jedem Wafer mit, sagt aber nichts darüber aus, wo im Wafer die Ionen tatsächlich gelandet sind oder wie viele davon nach dem Ausheilen elektrisch aktiv sind.

SIMS: das Tiefenprofil im Nachhinein

Die Sekundärionen-Massenspektrometrie (SIMS) trägt die Waferoberfläche mit einem Primärionenstrahl Lage für Lage ab und analysiert die dabei freigesetzten Sekundärionen massenspektrometrisch. Daraus ergibt sich ein hochgenaues Konzentrationsprofil des Dotierstoffs über die Tiefe – die Referenzmethode, um Reichweite, Streuung um die Reichweite (Straggle) und, durch Integration des Profils, die tatsächlich eingebrachte Gesamtdosis zu verifizieren. SIMS ist zerstörend und zu langsam für eine Kontrolle jeder einzelnen Scheibe; sie kommt bei der Prozessqualifizierung und -kalibrierung zum Einsatz, nicht in der laufenden Fertigung.

Für die laufende Fertigung dient stattdessen meist die Vierspitzenmessung (Four-Point-Probe) des Schichtwiderstands: schnell, zerstörungsfrei und empfindlich auf die elektrisch aktive Dosis nach dem Ausheilen – allerdings ohne Tiefenauflösung. Erst die Kombination aus routinemäßiger Faraday-Cup- und

Schichtwiderstandsmessung mit gelegentlicher SIMS-Kalibrierung ergibt ein vollständiges Bild der Dotierung.