

Halbleitertechnologie von A bis Z

Abscheidung

PVD-Verfahren	3
MBE: Molekularstrahlepitaxie	3
Aufdampfen	4
Sputtern: Kathodenzerstäubung	5

PVD-Verfahren

MBE: Molekularstrahlepitaxie

Das Aufwuchsverhalten bei der Molekularstrahlepitaxie (Molecular beam epitaxy, MBE) entspricht dem der [Siliciumgasphasenepitaxie](#). Jedoch wird in diesem Fall das Silicium auf eine andere Weise auf dem Wafer abgeschieden.

Der Prozess findet unter Ultrahochvakuum statt (UHV, 10^{-8} Pa), der zu prozessierende Wafer wird mit der Oberseite nach unten an der Decke der Prozesskammer gehalten, und auf ca. 600–800 °C erhitzt damit sich das natürliche Oxid verflüchtigt.

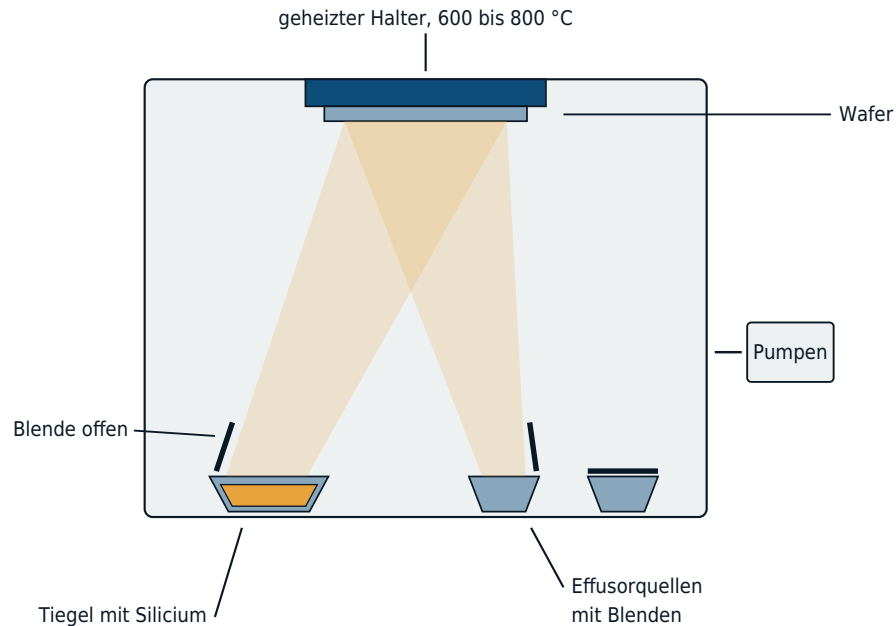
Silicium wird dabei mit einem Elektronenstrahl in einem Tiegel verdampft, und scheidet sich dann auf dem Wafer ab. Dotierstoffe können in einer Effusorquelle verdampft werden und gelangen so mit dem Siliciumdampf auf den Wafer. Durch gezielte Temperaturregelung und mittels Blenden kann der Teilchenstrahl genau dosiert werden. Bei diesem Verfahren ist es außerdem möglich Schichten aus verschiedenen Stoffen übereinander wachsen zu lassen, die sonst auf Grund der unterschiedlichen Atomgrößen nicht möglich wären. So lassen sich Silicium und Germanium als Schicht erzeugen, die bei Hochfrequenzanwendungen in der Bipolartechnik von Nöten ist.

Genau darin liegt die Stärke des Verfahrens: Weil die Atome einzeln und ohne chemische Reaktion ankommen, lässt sich die Zusammensetzung von Atomlage zu Atomlage ändern. Für Schichtfolgen aus Verbindungshalbleitern, wie sie in Laserdioden und Hochfrequenzbauelementen gebraucht werden, ist das unverzichtbar. In der Siliciumfertigung spielt die MBE dagegen keine Rolle – dort ist sie zu langsam.

Jedoch ist der Aufwand bei dieser Epitaxie zur Erzeugung des UHV sehr hoch. Um diesen Druck, der weniger als dem billionsten Teil des normalen Luftdrucks entspricht, zu erreichen, müssen mehrere Pumpen kombiniert werden und die Prozesskammer lange abgepumpt werden. Dabei kann nur ein Wafer auf einmal prozessiert werden, das Wachstum beträgt nur ca. 1 µm pro Stunde.

MBE-Anlage

Die Atome fliegen einzeln durch das Ultrahochvakuum auf den Wafer



Jede Quelle lässt sich einzeln zuschalten; das Wachstum liegt bei etwa einem Mikrometer je Stunde. Nur so lässt sich die Zusammensetzung von Atomlage zu Atomlage ändern. Der Druck liegt bei 10^{-8} Pa.

Aufdampfen

Beim Aufdampfen können metallische Schichten, wie z.B. Aluminium, auf den Wafern erzeugt werden. Das Material befindet sich in einem Tiegel aus hochschmelzbarem Metall wie Tantal und wird dort erhitzt bis es in den gasförmigen Zustand übergeht. Der Metalldampf trifft senkrecht auf die Scheibe, so dass Kanten nicht gut bedeckt werden, die entstandene Schicht ist polykristallin. Alternativ zum Schmelzen im Tiegel kann das Metall auch mit einem Elektronenstrahl verdampft werden. Mit dieser Elektronenstrahlmethode ist es möglich eine, im Vergleich zur thermischen Aufdampfung, sehr genaue Abscheiderate zu erzielen. Da die Kantenabdeckung nicht sehr gut ist, werden diese zwei Verfahren meist zur ganzflächigen Rückseitenbeschichtung für die spätere elektrische Kontaktierung verwendet.

In der Fertigung integrierter Schaltungen ist das Aufdampfen weitgehend durch das Sputtern verdrängt worden, das dichtere Schichten und eine bessere Kantenbedeckung liefert. Erhalten hat es sich dort, wo gerade die schlechte Kantenbedeckung erwünscht ist: Beim Abhebeverfahren wird zuerst eine Lackmaske strukturiert, dann das Metall aufgedampft und anschließend der Lack samt dem darauf liegenden Metall abgelöst. Weil die Flanken der Lackmaske kaum bedeckt werden, reißt der Film an der Kante sauber ab. So

lassen sich Metalle strukturieren, die sich schlecht ätzen lassen.

Schematische Darstellung einer Aufdampfanlage

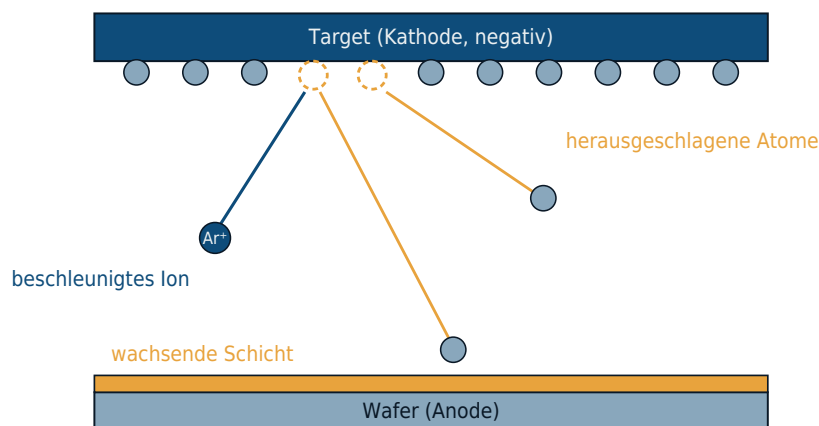


Sputtern: Kathodenzerstäubung

Bei der Kathodenzerstäubung werden Ionen (meist Argon) auf ein Target beschleunigt und schlagen dort Atome oder Moleküle heraus, das Target besteht dabei aus dem Material der aufzubringenden Schicht. Die mittlere Weglänge dieser Teilchen ist wenige Millimeter lang, d.h. sie stoßen oft zusammen, dadurch werden auf der Scheibe auch vertikale Flächen gut bedeckt. Die abgeschiedenen Teilchen bilden eine poröse Schicht, die durch Temperung verdichtet werden kann. Die Kathodenzerstäubung lässt sich in das passive (inerte) und das reaktive Sputtern unterteilen.

Kathodenzerstäubung

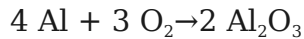
Argonionen schlagen Atome aus dem Target, die sich auf dem Wafer niederschlagen



Die Atome fliegen in alle Richtungen und stoßen unterwegs mit Gasteilchen zusammen. Deshalb werden auch senkrechte Flächen gut bedeckt – die Schicht bleibt dabei porös und wird anschließend durch Tempern verdichtet.

Beim passiven Sputtern wird nur das Material des Targets auf den Scheiben abgeschieden, entsprechend dem Material des Targets lassen sich hochreine Schichten erzeugen, da ein genaues Mischungsverhältnis der Stoffe im Target möglich ist. Beim reaktiven Sputtern wird dem Gas in der Prozesskammer ein Reaktionsgas (z.B. Sauerstoff O_2) hinzugefügt, dass sich mit dem zerstäubten Material des Targets verbindet und sich dann auf dem Wafer absetzt. Dadurch lassen sich aus einem Metalltarget (z.B. Aluminium Al) auch

Isolierungsschichten herstellen:



Zur Erzeugung von metallischen Schichten wird das Gleichstrom-Sputtern (DC-Sputtern) verwendet. Dabei werden die Ionen mit bis zu 3 Kilovolt (kV) auf das Target beschleunigt und entladen sich dort. Da diese Ladungen immer abgeführt werden müssen, kann hier nur ein leitendes Material als Target dienen. Für isolierende Schichten muss das reaktive Sputtern eingesetzt werden. Will man eine isolierende Schicht direkt aus dem Target erzeugen, verwendet man das Hochfrequenzsputtern (RF-Sputtern).

Beim RF-Sputtern liegt die Spannung an je einer Elektrode hinter dem Target (Kathode) und dem Wafer (Anode) an. Durch die hochfrequente Spannung werden die Elektronen bei der positiven Halbwelle am Target von diesem angezogen, wodurch sich das Target negativ auflädt. Durch dieses negative Target werden die Ionen angezogen und schlagen dort Teilchen heraus. Beim Magnetronsputtern befinden sich zusätzlich Magnete hinter dem Target, so dass Elektronen auf Kreisbahnen abgelenkt werden und so häufiger Argonatome ionisieren können, was einen erheblichen Anstieg der Abscheiderate verursacht. Da die Anode mit der Prozesskammer verbunden ist, hat sie auf die Oberfläche bezogen im zeitlichen Mittel eine wesentlich geringere Potentialdifferenz gegenüber dem Plasma als die Kathode, weshalb die Ionen nur zum Target und nicht zum Wafer wandern.

Um die Kantenabdeckung zu erhöhen verwendet man das BIAS-Sputtern, bei dem am Substrat eine negative Spannung angelegt wird. Dadurch werden auch hier, wie am Target, Teilchen der erzeugten Schicht abgetragen und die Oberfläche eingeebnet. Jedoch muss darauf geachtet werden, dass kein Abtrag des Substrats erfolgt. Dieses so genannte Rückätzen ist auch das Prinzip der meisten Plasmaätzanlagen.

Sputtern in enge Strukturen

Die herausgeschlagenen Teilchen sind ungeladen und fliegen in alle Richtungen. Über einem engen, tiefen Kontaktloch bedeutet das: Der größte Teil trifft den Rand der Öffnung, nur wenig gelangt bis auf den Grund. Die Öffnung wächst zu, bevor der Boden bedeckt ist.

Abhilfe schafft es, die abgestäubten Teilchen selbst zu ionisieren. In einem dichten Plasma zwischen Target und Scheibe verlieren sie ein Elektron und lassen sich anschließend durch eine Spannung an der Scheibe senkrecht nach unten beschleunigen. Der Materialstrom wird dadurch gerichtet und erreicht auch den Grund tiefer Löcher. Auf diese Weise werden die Tantalbarriere und die Kupferkeimschicht im [Damascene-Verfahren](#) abgeschieden – die Keimschicht

muss lückenlos und an den Seitenwänden ebenso vorhanden sein wie am Boden, sonst wächst das Kupfer bei der anschließenden Galvanik nicht durchgehend auf.

Das Sputtern eignet sich somit zur Erzeugung von metallischen Schichten mit guter Konformität und sehr guter Reproduzierbarkeit. Der Aufwand ist gering, der Unterdruck mit 5 Pa recht einfach zu erzeugen.