

Halbleitertechnologie von A bis Z

Waferherstellung

Der Wafer	3
<i>Wafervereinzelung und Oberflächenveredelung</i>	3
<i>Historische Entwicklung der Wafergröße</i>	5
<i>Wieso sind Wafer rund?</i>	7

Der Wafer

Wafervereinzelung und Oberflächenveredelung

Der Einkristallstab wird zunächst auf den gewünschten Durchmesser abgedreht und bekommt dann, je nach Kristallorientierung und Dotierung, einen oder zwei Flats. Der größere Flat dient dazu, die Wafer in der Fertigung exakt ausrichten zu können. Der zweite Flat dient zur Erkennung des Scheibentyps (Kristallorientierung, p-/n-Dotierung), ist aber nicht immer vorhanden. Bei Wafern ab 200 mm Durchmesser werden an Stelle der Flats sogenannte Notches verwendet. Dabei handelt es sich um eine winzige Einkerbungen am Scheibenrand, die ebenfalls eine Ausrichtung der Wafer ermöglicht, aber sehr viel weniger kostbare Fläche des Wafers beansprucht.



Sägen

Historisch wurde der Einkristallstab mit einer Innenlochsäge zerteilt, deren Schnittkante mit Diamantsplittern besetzt ist. Sie schneidet genau, aber immer nur eine Scheibe auf einmal, und bis zu 20 % des Kristallstabs gehen dabei durch die Dicke des Sägeblatts verloren. Bei den heutigen Stabdurchmessern und Scheibenpreisen ist das nicht mehr vertretbar; Standard ist deshalb das

Drahtsägen, bei dem mehrere hundert Wafer in einem Durchgang aus dem Stab geschnitten werden. Dabei wird ein langer Draht, welcher mit einer Suspension aus Siliciumcarbidkörnern und einem Trägermittel wie Glykol oder Öl benetzt wird, über rotierende Walzen geführt. Der Siliciumkristall wird in das Drahtgitter abgelassen und so zu Wafern vereinzelt. Der Draht bewegt sich im Gegenschritt mit ca. 10 m/s und ist typischerweise 0,1-0,2 mm dick. Zunehmend wird statt der aufgeschlammten Körner ein Draht verwendet, in dessen Oberfläche die Diamantkörner fest eingebunden sind. Er schneidet schneller, erzeugt weniger Abfall und macht die Entsorgung der verbrauchten Suspension überflüssig.

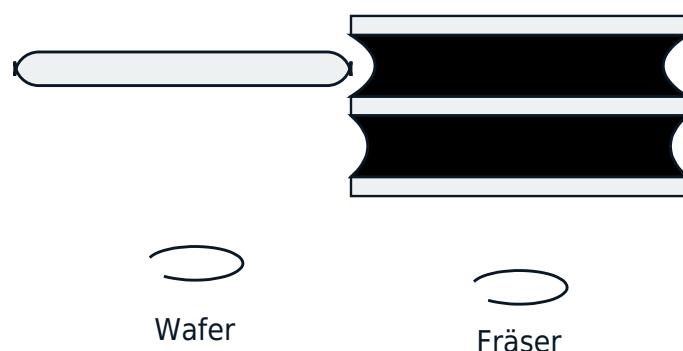
Nach dem Sägen besitzen die Scheiben eine aufgeraute Oberfläche und, auf Grund der mechanischen Belastung, Gitterschäden im Kristall. Zum Veredeln der Oberfläche durchlaufen die Scheiben mehrere Prozessschritte.

Läppen

Mit körnigen Schleifmitteln (z.B. Aluminiumoxid) werden 50 µm (0,05 mm) der Scheibenoberfläche auf einer rotierenden Stahlscheibe abgetragen. Die Körnung wird dabei stufenweise verringert, jedoch wird die Oberfläche auf Grund der mechanischen Behandlung erneut geschädigt. Die Ebenheit nach dem Läppen beträgt ca. 2 µm.

Scheibenrand abrunden

In späteren Prozessen dürfen die Scheiben keine scharfen Kanten besitzen, da aufgebrachte Schichten ansonsten abplatzen können. Dazu wird der Rand der Scheiben mit einem Diamantfräser abgerundet.



Ätzen

In einem Tauchätzschritt, mit einer Mischung aus Fluss-, Essig- und

Salpetersäure, werden noch einmal 50 µm abgetragen. Da es sich hierbei um einen chemischen Vorgang handelt, wird die Oberfläche nicht geschädigt. Kristallfehler werden endgültig behoben.

Polieren

Dies ist der letzte Schritt zum fertigen Wafer. Am Ende des Polierschrittes besitzen die Wafer noch eine Unebenheit von weniger als 3 nm (0,000003 mm). Dazu werden die Scheiben mit einem Gemisch aus Natronlauge (NaOH), Wasser und Siliciumdioxidkörnern behandelt. Das Siliciumdioxid entfernt weitere 5 µm von der Scheibenoberfläche, die Natronlauge entfernt Oxid und beseitigt Bearbeitungsspuren der Siliciumdioxidkörner.

Danach folgen eine abschließende Reinigung und eine Vermessung jeder einzelnen Scheibe auf Ebenheit, Dicke und Partikel. Ein erheblicher Teil der Wafer erhält anschließend noch eine **epitaktische Schicht**: eine dünne, besonders reine und definiert dotierte Siliciumlage, die auf die polierte Oberfläche aufgewachsen wird. Die eigentlichen Bauelemente entstehen dann in dieser Schicht, während die Scheibe darunter nur noch Träger ist.

Historische Entwicklung der Wafergröße

Die Herstellung von integrierten Schaltkreisen auf Siliciumwafern begann Mitte der 1960er Jahre auf Scheiben mit einem Durchmesser von 25 mm. Seither ist der Durchmesser in Stufen gewachsen; seit Ende der 1990er Jahre ist der 300-mm-Wafer das größte Format der Serienfertigung. Seine Fläche ist rund 140-mal so groß wie die der ersten 25-mm-Scheiben.

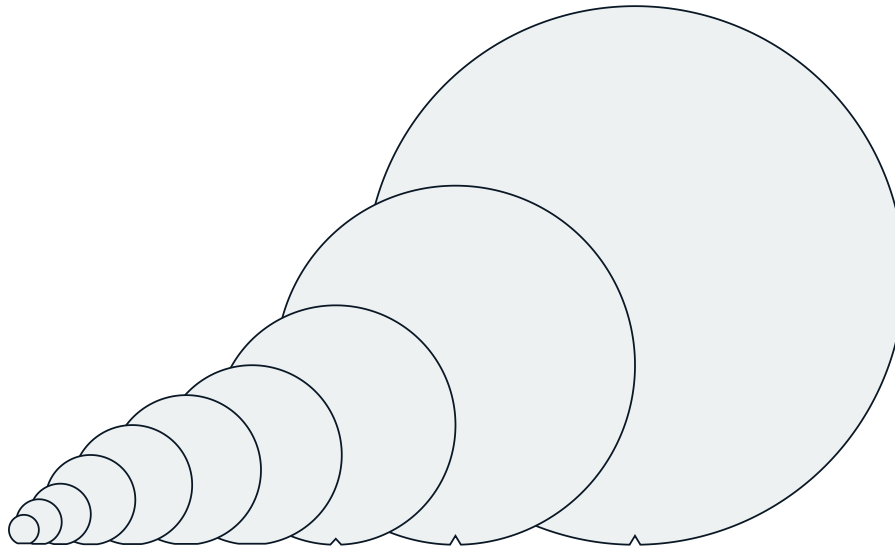
Mit größeren Wafern steigt der Durchsatz in der Herstellung von Chips erheblich, wodurch die Kosten in der Fertigung entsprechend gesenkt werden können. So können bei identischer Strukturgröße mehr als doppelt so viele Chips auf einem 300-mm-Wafer hergestellt werden, wie es auf einem 200-mm-Wafer der Fall ist.

Typische Daten von Wafern:

Typ [mm]	Durchmesser [mm]	Dicke [µm]	1. Flat [mm]	Durchbiegung [µm]
150	150 ± 0,5	~700	55 - 60	25
200	200 ± 0,5	~800	<i>Notch</i>	35
300	300 ± 0,5	~900	<i>Notch</i>	45

Wafergrößen in der Übersicht: 25, 38, 51, 75, 100, 125, 150, 200, 300,

450 [mm] (maßstabsgetreu)



Der Schritt auf 450 mm, der nicht kam

Die Reihe hätte sich mit 450 mm fortsetzen sollen. Um 2008 schlossen sich mehrere große Hersteller und Ausrüster zu einem gemeinsamen Programm zusammen, erste Anlagen und Testwafer entstanden, und der Umstieg wurde für den Anfang der 2010er Jahre angekündigt. Er fand nie statt: Das Programm wurde Mitte der 2010er Jahre stillgelegt, und 300 mm ist bis heute das größte Format geblieben.

Die Gründe dafür stehen bereits in den technischen Schwierigkeiten, die man damals zu lösen suchte:

- Die Durchbiegung wächst mit dem Durchmesser. Damit sich gestapelte Scheiben beim Transport nicht berühren, müssten Abstände, Auflagen und Greifer neu ausgelegt werden.
- Schichtspannungen verformen eine große Scheibe leichter. Dicker machen lässt sie sich nicht beliebig, weil Materialkosten und Eigenfrequenz dagegen sprechen.
- Die größere Fläche muss auch bearbeitet werden. Gegenüber 300 mm müssten die Kosten je Quadratzentimeter um den Faktor 2,25 sinken, damit sich am Ende überhaupt etwas rechnet.
- Ein 450-mm-Kristall wächst mehr als doppelt so lange. In dieser Zeit steigt auch die Wahrscheinlichkeit, dass sich Fehler in das Gitter einbauen.
- Nahezu jede Anlage der Fertigungslinie hätte neu entwickelt werden müssen – bei einem Investitionsbedarf, den einzelne Hersteller nicht mehr allein

tragen können.

Der entscheidende Punkt war jedoch ein wirtschaftlicher. Der Nutzen eines größeren Wafers besteht darin, die Fixkosten je Anlage auf mehr Chips zu verteilen. Dieser Vorteil fällt umso geringer aus, je teurer die einzelne Anlage wird – und die Lithografieanlagen wurden in derselben Zeit dramatisch teurer. Der Aufwand für die Umstellung wäre also gestiegen, während der Ertrag daraus sank. Die Industrie hat ihre Investitionen stattdessen in kleinere Strukturen und in die dritte Dimension gelenkt: mehr Bauelemente je Fläche statt mehr Fläche je Scheibe.

Wieso sind Wafer rund?

Oft stellt sich die Frage wieso Wafer rund sind, schließlich sind Mikrochips doch rechteckig. Dadurch ergibt sich auf dem Wafer immer ein Verschnitt, also eine Fläche, auf der keine vollständigen Chips Platz finden, und die am Ende der Halbleiterfertigung verworfen werden muss.

Nach Erläuterung der beiden Herstellungsverfahren – dem [Kristallziehverfahren](#) und dem [Zonenziehen](#) – kann diese Frage leicht beantwortet werden.

Ein Siliciumwafer für die Mikrochipherstellung muss als Einkristall vorliegen. Dies ist nur mit den genannten Verfahren möglich, und diese liefern prinzipbedingt eine kreisrunde Form.

Auch wenn es technisch möglich wäre, die runden Siliciumkristalle nachträglich in eine eckige Form zu bringen (z. B. mittels sägen), so bietet die runde Form der Siliciumwafer trotz rechteckiger Mikrochips dennoch einige Vorteile.

- Das Begradigen der runden Siliciumstäbe bedeutet zusätzlichen Stress für das Material und würde zwangsläufig zu Kristallfehlern führen, die sich auf die Qualität der Chips auswirken würde.
- Runde Wafer sind wesentlich stabiler. Eckige Wafer könnten kaum ohne Beschädigung transportiert und bearbeitet werden.
- Eine gleichmäßige Bearbeitung während der Chipfertigung mit radialsymmetrischen Prozessen (CMP, Spin-on, Ätzen) ist wesentlich einfacher.
- Ein schmaler Randbereich müsste auch bei rechteckigen Wafers immer verworfen werden, da die Scheiben während der Bearbeitung gehalten werden müssen. Abgeschiedene Schichten würden abplatzen und so zusätzliche Partikel verursachen, wenn diese bis an den äußersten Rand reichen.

Mit zunehmender Wafergröße nimmt der Verschnitt auch immer weiter ab.

Rechteckige Wafer findet man hingegen bei der Fertigung von Solarzellen.

Zumeist finden hier polykristalline Wafer Anwendung, die in rechteckigen Formen gegossen werden können. Die Fertigung ist verhältnismäßig einfach, so dass auch eckige Wafer bearbeitet werden können. Meist werden die Ecken zusätzlich abgeschrägt. Bei den heute üblichen einkristallinen Solarzellen ist es genau umgekehrt: Sie entstehen aus rund gezogenen Kristallen, die vor dem Sägen quadratisch beschnitten werden – mit abgerundeten Ecken, weil das Wegschneiden der Restkante mehr Material kosten würde als der Flächengewinn einbringt.