

Das Züchten von Siliziumeinkristallen mit dem Czochralski-Verfahren

Susanne Paskoff

Abstract. Ob für Solarzellen oder Mikrochips, die heutige Elektronikindustrie kann nicht mehr darauf verzichten: Silizium. Wie aber gewinnt man einen Rohstoff, der so gut wie fehlerfrei sein muss und auch noch in ausreichenden Mengen vorhanden ist? Die Antwort: Kristallzüchtung. In folgender Abhandlung soll es im Speziellen um das Czochralski-Zuchtverfahren gehen, mit dem gut 95% der Siliziumeinkristalle produziert werden. Das Herstellen eines Kristalls ist durchaus auch noch heute eine Herausforderung an die Technik, da die Werkstoffindustrie immer hochleistungsfähigerer Werkstoffe bedarf.

Einleitung

Die Grundlage vieler moderner Hardware bilden Kristalle. 99% aller Halbleiter-Bauteile bestehen dabei heute aus monokristallinem Silizium. Die Anforderungen an die Technik wachsen stetig und so auch jene an die kristallinen Bauteile. Für die Werkstoffindustrie werden in der Regel hochreine Werkstoffe benötigt, die man so in der Natur nicht finden kann. Es muss also ein Verfahren existieren, mit dessen Hilfe Kristalle künstlich erzeugt werden können, die hochfunktionell und möglichst auch günstig und ohne zu großen Aufwand herzustellen sind. Diese gezüchteten Kristalle haben den Vorteil, dass sie im Gegensatz zu den natürlichen Kristallen „perfekt“ sind, das heißt, fast keine Fehler haben. Ein weiterer Punkt ist die Produktivität, denn mit den heutigen bekannten Kristallzüchtungsverfahren lassen sich große Mengen vergleichsweise günstig herstellen. In der Natur müsste man den Rohstoff erst einmal fördern und reinigen, bevor er zum Einsatz kommen kann. Allerdings ist dies bei Silizium nicht der Fall, da es in der Natur nicht in

Reinform vorkommt. Dies wäre um ein Vielfaches teurer. Die kontrollierten Bedingungen im Labor ermöglichen außerdem das Herstellen von Verbindungen, die in der Natur nicht einmal existieren.

Heutzutage existieren mehrere Kristallzüchtungsverfahren. Zu nennen sind zum Beispiel die chemische Gasphasenabscheidung, das Bridgeman-Verfahren, das Verneuil- und Floating-Zone-Verfahren und vor allem das Czochralski-Verfahren, auf welchem hier der Schwerpunkt liegen soll, da 95% aller Siliziumeinkristalle mit dieser Methode hergestellt werden. Die restlichen 5% werden mit dem Floating-Zone-Verfahren produziert..

Kristallwachstum (oder auch „*crystal growth*“) muss folgende Kriterien erfüllen:

1)Die herzustellenden Einkristalle müssen eine vorgegebene Größe haben, einen hohen Grad an struktureller Perfektion besitzen und aus einer festen chemischen Zusammensetzung bestehen.

2)Das Einkristallwachstum bedarf der Keimbildung, darauffolgendem Wachstum und dem Beenden des Prozesses. Letztendlich muss der Kristall noch von der Apparatur entfernt werden.

3)Die Überführung in den festen/kristallinen Aggregatzustand kann ausgehend von der Gas-, Flüssig- oder der polykristallinen Festphase erfolgen. Der flüssige Aggregatzustand ist dabei entweder eine Schmelze, eine Hoch-, oder eine Niedrigtemperaturlösung. Das Kristallwachstum aus diesem Aggregatzustand spielt die technologisch größere Rolle.

4)Während jedes Schrittes des Kristallwachstumsprozesses werden die experimentellen Parameter p – Druck, T – Temperatur und x_i – Konzentrationen der Komponenten streng überwacht (Scheel, 2008).

Was ist ein Einkristall?

Ein Einkristall ist ein Monokristall, dessen Kristallgitter über sein gesamtes äußeres Erscheinungsbild ungebrochen und durchgängig ist und keinerlei Korngrenzen aufweist.

Das Vorhandensein von Korngrenzen hat wesentlichen Einfluss auf die mechanischen und chemischen Eigenschaften eines Materials. Einkristalle sind – auch wenn sie synthetisch hergestellt wurden – sehr kostbar und deswegen in der Industrie sehr begehrt.

Was ist ein Keimkristall?

Am Anfang des Kristallherstellungsprozesses steht der Keimkristall. Aber auch dieser muss hergestellt werden. Dafür gibt es mehrere Möglichkeiten:

Man könnte einerseits einen polykristallinen „Stab“ erzeugen, indem man ihn senkrecht aus der Schmelze zieht. Dazu nutzt man eine Platindrahtschleufe, mit der Teile der Schmelze durch Oberflächenspannung aufgefangen werden. Rotiert man diese Drahtschleufe, während man sie senkrecht herauszieht, bildet sich ein kleiner polykristalliner Stab. Diesen kann man in der Nähe der Oberfläche der Schmelze erneut erhitzen, so dass die Kristallite schmelzen und ein „Neck in“ d.h. eine Art Spitze bilden, wie man in Abbildung 1 sehen kann.

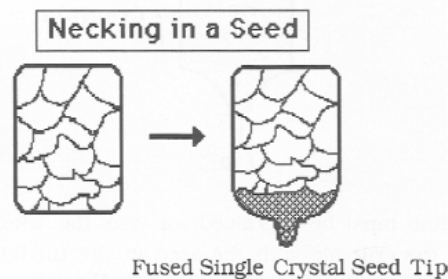


Abbildung 1: Skizze des Neck-in (Journal of Crystal Growth ?)

Ein anderer Weg, einen Keimkristall zu erhalten ist, ein Kapillarröhrchen in die Schmelze zu tauchen. Durch die Oberflächenspannung füllt sich das Röhrchen und bei Abkühlung erfolgt das Erstarren. Das Ergebnis ist ein sehr kleiner Seed-Kristall. Schwierigkeiten ergeben sich hier beim Finden des geeigneten Materials für das Röhrchen, da es bis ca. 1500°C temperaturbeständig sein muss. Eine weitere Schwierigkeit besteht in der Entfernung des Keimkristalls aus dem Kapillarröhrchen.

Eine weitere Herstellungsmöglichkeit besteht im Gießen der Schmelze in einen Tiegel mit einer Spitze, ähnlich wie bei Beispiel 1. Allerdings muss hier der Tiegel geöpft werden, um den Seed-Kristall zu erhalten.

Zum Schluss müssen die erhaltenen Keimkristalle noch für ihre zukünftige Verwendung präpariert werden.

Zusammenfassend kann man sagen: ein Keimkristall ist ein kleiner Einkristall.

Czochralski-Verfahren

Die Entwicklung des Verfahrens

Das Czochralski-Verfahren ist ein Verfahren zur Herstellung von Einkristallen, im Besonderen von Silizium-Einkristallen. Die geschichtlichen Wurzeln des Verfahrens reichen bis an den Anfang des 20. Jahrhunderts zurück. Jan Czochralski, ein polnischer Metallurge und der Pionier dieser Methode, soll der Historie nach

eines Tages seinen Federhalter in ein Fässchen mit Zinn getaucht haben, anstatt in das Tintenfass. Und so wurde die Idee geboren. Die ersten wirtschaftlich relevanten Kristalle wurden allerdings erst um 1950 erzeugt.

Seitdem hat sich viel verändert: konnte man am Anfang lediglich etwa 5 Gramm schwere Kristalle herstellen, werden heute bis zu 450 kg schwere und im Durchschnitt bis 45 cm große Einkristalle aus der Schmelze gezogen. Die genaue Entwicklung der Größe des Durchmessers kann man in Tabelle 1 einsehen. Auch die Qualität hat einen deutlichen Sprung nach vorn gemacht (Zulehner, 2005).

Year	1950	1956	1962	1967	1972	1973	1980	1984	1988	1992	1997	2005
Diameter	½	1	1.5	2	2.5	3	100	125	150	200	300	400
Measure	inch	inch	inch	inch	inch	inch	mm	mm	mm	mm	mm	mm
Weight, kg	0.05	0.4	1.2	2.5	6	12	24	38	65	110	200	350

Tabelle 1: Entwicklung des Durchmessers der gezüchteten Einkristalle (W. Zulehner, 2005)

Heute ist das Czochralski-Verfahren die Methode der Wahl zur Massenproduktion von Siliziumeinkristallen mit hervorragender Qualität. Des Weiteren werden damit auch noch Calcium-Gallium-Germanat, Rubine usw. hergestellt.

Verfahren und Apparatur

Im Wesentlichen wird ein Kristall aus einem Tiegel, der eine Si-Schmelze enthält, „gezogen“ (daher auch der Name „Tiegelziehverfahren“), nachdem der Keimkristall in das flüssige Silizium getaucht wurde. Dabei wird die aus geschmolzenem reinem Silizium bestehende Schmelze, deren Temperatur nur ein wenig über dem Schmelzpunkt liegt, Stück für Stück entzogen. Während dieses Prozesses drehen sich sowohl Schmelze als auch der Kristall entweder in die gleiche oder in die entgegengesetzte Richtung, um eine bessere Durchmischung der Schmelze zu erzielen. Dies hat zylindrische Kristalle zur Folge. Die Zugrate („pulling rate“) – normalerweise einige mm pro Minute – beeinflusst dabei den Durchmesser des Kristalls. Alle anderen Parameter beeinflussen die Qualität und Homogenität des Produkts. Gegen Ende des Tiegelziehverfahrens wird die Zugrate erhöht, so dass sich der Durchmesser des Kristalls verkleinert. Das Endprodukt ist dann ein sogenannter *Ingot* mit einer Länge von bis zu zwei Metern. Während des gesamten Prozesses befindet sich die Apparatur unter einer chemisch inerten Atmosphäre, die aus einem Argon-Gasgemisch besteht.

Der Tiegel der Apparatur besteht aus hochreinem SiO₂. Quarz, hier in Form von Kieselglas, ist ein sehr geeignetes Baumaterial, da es den extremen Bedingungen standhalten kann. Die Schmelze löst zwar etwas Sauerstoff aus der Tiegelfwand, aber der Rest geht folgende Reaktion ein: $\text{SiO}_2 + \text{Si} \rightarrow 2 \text{SiO}$. Das Reaktionsprodukt SiO hat eine hohe Evaporationsrate und so stellt sich zwischen dem gelöstem und dem evaporiertem Sauerstoff ein Gleichgewicht ein. Etwa 99% des gelösten Sauerstoffs verflüchtigt sich aus der Schmelze. Da der Kieselglastiegel beim Schmelzpunkt des Siliziums bereits sehr weich ist, muss er auf einem mechanisch

stabilen Graphit-Suszeptor errichtet werden. Alle Graphit-Bauteile, die bei Kontakt mit SiO starker Korrosion ausgesetzt sind, müssen regelmäßig ausgetauscht werden, damit das dislokationsfreie Wachstum der Kristalle garantiert ist.

Des Weiteren existiert ein Hitzeschild, der das Abkühlungsverhalten definiert. Heutzutage kann dieser mit Wasser gekühlt werden, ohne das Risiko von Dampfexplosionen im Falle eines Defektes einzugehen.

Die Apparatur muss also aus folgenden grundlegenden Elementen bestehen:

- Stromquelle
- Heizelemente
- thermische Isolation
- Tiegel
- Sensor für Temperatur-Feedback
- Temperaturregler
- ein Relais oder eine anderer Regler für die Stromquelle
- Messelemente/Regler für Rotations- und Ziehrate

Das Kristallzüchten ist ein komplizierter und empfindlicher Prozess, der durchaus auch als Kunst bezeichnet werden kann. Genauere Details der Produktion sind natürlich nur den jeweiligen Firmen wie z.B. Siltronic bekannt. Leider findet man deshalb in der Literatur keine näheren Angaben.

Probleme bei der Herstellung des Kristalls

Das Czochralski-Züchtverfahren bringt einige Schwierigkeiten mit sich, die nachfolgend beschrieben werden sollen:

Dislokationen – Versetzungen

Das hohe Maß an Perfektion bei der Herstellung der Einkristalle bedeutet leider nicht, dass die Kristalle letztendlich fehlerfrei sind. So gibt es zum Beispiel sogenannte Versetzungen - eindimensionale Defekte, bei denen entlang einer Linie im Kristallgitter die Symmetrie gestört ist. Versetzungen sind

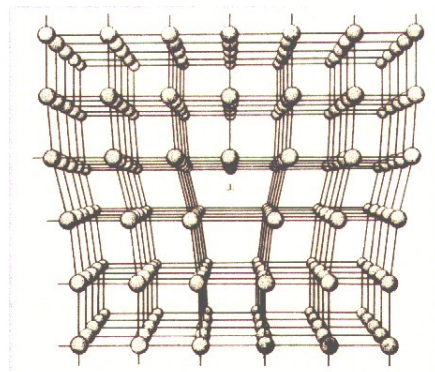


Abbildung 2: Dislokation eines Kristallgitters (H.Föll, 2004)

verantwortlich für die plastischen Verformungen von Werkstoffen und somit ein großes Problem bei der Herstellung von Siliziumeinkristallen für die Halbleiterindustrie.

Wie verhindert man die Entstehung solcher Fehler?

1959 entwickelte W.C. Dash die heute nach ihm benannte *Dash-Seeding-Methode*. Folgende Punkte müssen dabei beachtet werden:

- Spannungen durch Temperaturveränderungen innerhalb des Kristalls als Hauptauslöser für Dislokationen müssen reduziert werden.
- Man muss sicherstellen, dass die eventuell bestehenden Dislokationen sich nicht in Wachstumsrichtung aneinanderreihen und sich dadurch bis zur Oberfläche fortsetzen können.

Dies gelingt, in dem man durch das Erhöhen der pulling rate beim Wachsen des Kristalls den ersten Teil sehr schmal werden lässt (der Kristall wird schneller aus der Schmelze gezogen – dabei entsteht ein sogenanntes „Neck“). Deshalb wird dieser Prozess auch als „*Necking*“ bezeichnet. Durch den geringen Durchmesser des Kristalls sind die Spannungen durch das Erkalten so gering, dass die Dislokationen nicht mehr hinter der sich schnell entwickelnden Oberfläche entstehen können. Wird die Entstehung der Dislokationen in diesem frühen Stadium verhindert, werden in der Regel auch später keine mehr auftreten und der Kristall wächst somit dislokationsfrei.

Man muss allerdings immer in Betracht ziehen, dass es dennoch nahezu unmöglich ist, beim Temperaturschock durch das Eintauchen des Seed-Kristalls in die heiße Schmelze keine Versetzungen zu verursachen. Auch der Keimkristall an sich könnte schon Gitterfehler beinhalten. Seit etwa zehn Jahren können Silizium- als auch Germaniumkristalle nahezu dislokationsfrei hergestellt werden. „Nahezu“ bedeutet dabei „unterhalb der Messgrenze der Analysegeräte“.

Punktdefekte oder Bulk microdefects

Nulldimensionale Gitterfehler werden auch Punktfehler genannt, da sich der Defekt jeweils auf ein einziges Atom bezieht, ein atomarer Baufehler also. Man kann drei Arten unterscheiden:

-Leerstellen (vacancies, siehe Abbildung 3)

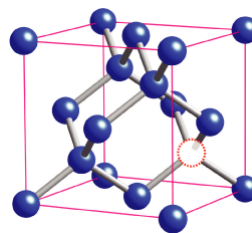


Abbildung 3: Leerstelle im Si-Kristallgitter (Goto, 2006)

-Zwischengitteratome (interstitials)

-Substitutionsatome (in erster Linie für chemische Verbindungen)

Punktdefekte kommen als Gitterdefekte im thermodynamischen Gleichgewicht von Einkristallen vor. Sie können in intrinsische und extrinsische Defekte eingeteilt werden, wobei beim Herstellen von Siliziumeinkristallen nur die intrinsischen Defekte eine Rolle spielen, da hier keine zweite Phase vorhanden ist.

Kurz nach der Kristallisation liegt die Temperatur des Kristalls nahe dem Schmelzpunkt und besitzt somit die optimale Gleichgewichtskonzentration der Punktdefekte (*vacancies* und *interstitials*). Durch die Abkühlung auf Raumtemperatur geht dieses Gleichgewicht gegen Null. In dislokationsfreien Einkristallen existieren keine internen Korngrenzen, die die Punktdefekte normalerweise „auffangen“. Stattdessen bilden die Punktdefekte hier Cluster, die sogenannten *bulk micro defects* (BMD) oder *swirl defects*. Im Gegensatz zu den Dislokationen kann man Punktdefekte schlecht verhindern. Man kann sie nur sehr gering halten, aber das ist im Moment noch Gegenstand der Forschung.

Konvektion

Konvektion ist das Entstehen von Strömungen durch den Austausch von thermischer Energie. Da die thermische Komponente bei dem Czochralski-Verfahren (wie bei allen anderen Kristallzüchtungsverfahren auch) eine wichtige Rolle spielt, muss man auch dem Faktor Konvektion Beachtung schenken. Selbst wenn der Tiegel nicht rotieren würde, entstehen Konvektionen aufgrund der Dichtegradienten, die an die thermischen Gradienten gebunden sind. Wenn diese Konvektionen unkontrolliert sind, entwickeln sie sich zu einem Problem:

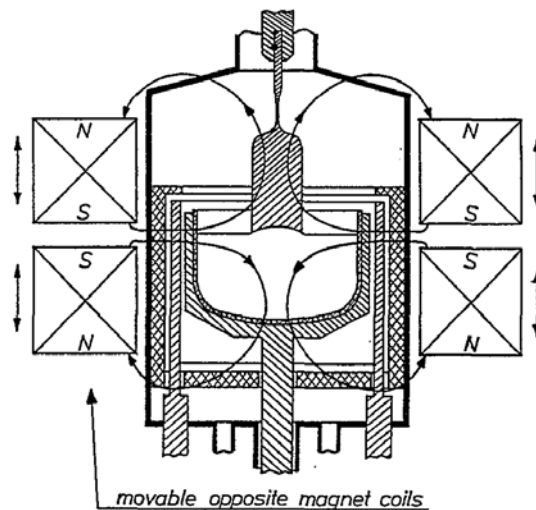


Abbildung 4: Schmelztiegel eines modernen Czochralski-Apparatur (W.Zulehner, 1989)

Die Schmelze löst etwas SiO_2 aus der Tiegelwand, welches später im Kristall abgelagert wird. Dies führt zu einem raschen Anstieg von Sauerstoff im Kristall, was wiederum Inhomogenität zur Folge hat. Diese ist absolut inakzeptabel in der Produktion von Hochleistungswerkstoffen. Die Konvektionen müssen also kontrol-

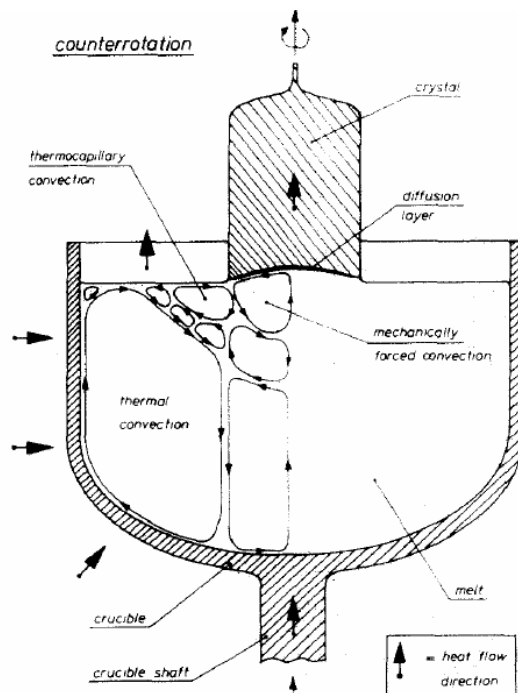


Abbildung 5: Konvektionen unterschiedlicher Ursache (Zullehner, 1989)

liert werden, damit im ganzen Kristall die Sauerstoffkonzentration gleich, idealerweise möglichst Null, ist. Dies kann man mittels eines starken Magnetfelds erzielen, was zum Beispiel bereits beim Produzieren von Kristallen mit großem Durchmesser realisiert wird. Das Feld wird mit Spulen erzeugt, die in der Apparatur integriert sind, wie man in Abbildung 4 sehen kann. Diese Bauweise stellt die neuste Methode dar: Die Spulen sind in vertikaler Achse verschiebbar und ermöglichen so auch während des Kristallzüchtens ein optimales homogenes Wachstum. Dieses

Magnetfeld interferiert dabei mit den freien Elektronen der Silizium-Schmelze vor allem am Rand des Tiegels, wodurch ein Anreichern der Sauerstoffatome unterhalb des Kristalls verhindert wird. Ein weiterer Weg wäre die Nichtanwesenheit von Gravitation, was allerdings den angestrebten finanziellen Rahmen bei weitem überschreiten würde.

Die Segregation und der Zusammenhang mit Dotierungs-Elementen

Segregation bezeichnet im Zusammenhang mit dem Czochralski-Verfahren die räumliche „Ungleichverteilung“ der Fremdatome (*impurity atoms*) innerhalb der Schmelze. Daraus resultiert erneut das Problem der Inhomogenität. Der Segregationskoeffizient k_0 bezeichnet dabei den Zusammenhang zwischen der Konzentration an Fremdatomen im Kristall und in der Schmelze. Da Fremdatome in der Regel in der Schmelze verbleiben, ist dieser meist <1 .

$$k_0 = C_s / C_l$$

(k_0 – Segregationskoeffizient, C_s – Konzentration an Fremdatomen im Kristall, C_l – Konzentration an Fremdatomen in der Schmelze) (Scheel, 2008)

Dies hat sowohl Vorteile als auch Nachteile.

Ein Vorteil ist, dass dadurch der Kristall reiner ist als die Schmelze, wenn man das untere Ende mit den eingewachsenen Fremdatomen verwirft. Kristallisation ist in diesem Zusammenhang eine Art „Reinigungs-Prozess“.

Die negative Seite ist, dass auch *Doping-Elemente*, also Atome die hinzugefügt wurden um die Eigenschaften des Kristalls zu verbessern, unregelmäßig entlang des Kristalls verteilt werden. Die gleichmäßige Verteilung dieser Elemente ist nach wie vor eine komplizierte Angelegenheit.

Welche Doping-Elemente werden verwendet?

Gewollt ist eine möglichst homogene Verteilung der Dotierungs-Atome. Voraussetzung ist also, dass deren Segregationskoeffizient ungefähr 1 ist, denn nur wenn die Konzentration dieser Atome in etwa mit der des Kristalls übereinstimmt, ist dies gewährleistet.

Geläufige Dotierungs-Elemente sind Sb, Ga, As, P, B etc... In der Praxis kommen aber fast nur die letzten drei in Frage. Der Grund ist in nebenstehender Abbildung 6 ersichtlich: Der Segregationskoeffizient ist jeweils ungefähr 1, mit anderen Worten: sie lassen sich homogen genug entlang des Kristalls verteilen.

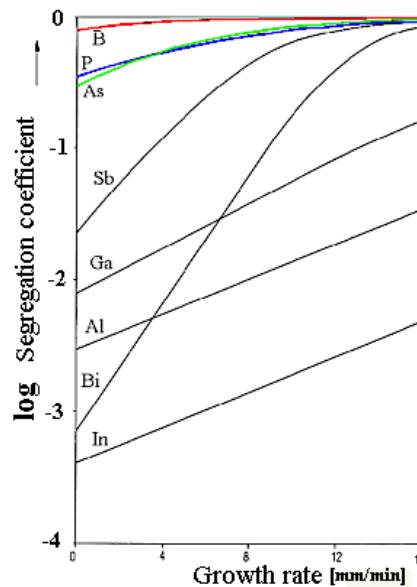


Abbildung 6: Segregationsrate unterschiedlicher Dotierungs-Elemente (Föll, 2004)

Ausblick in die Zukunft

Der Trend geht immer mehr in die Richtung größerer Einkristall-Durchmesser, da hier die Aufteilung in Segmente bei der späteren Waferproduktion einfacher wird. Man spricht sogar von einem „diameter race“ angefeuert durch das Fordern geringerer Kosten der Werkstoffindustrie.

Um Kristalle größerer Durchmesser zu produzieren, müssen folgende Punkte beachtet werden:

- Die Dash-Methode muss verbessert werden, da größere und somit schwerere Kristalle nicht länger am Keimkristall hängen dürfen, da dies eine hohe Belastung für das Material bedeutet.

- Es müssen Quarzglastiegel entwickelt werden, die einen Durchmesser von mehr als 900mm haben.

-Sicherheitsvorkehrungen für den Fall von Dampfexplosionen beim Austritt der mehr als 600 kg schweren Schmelze müssen getroffen werden.

Um die Produktion solch großer Kristalle realisieren zu können, muss auch einiges an der Produktionsanlage geändert werden. Der Abstand zwischen der Oberfläche der Schmelze und dem Hitzeschild, die relative Position der Magnete und die Kristall- und Tiegelrotationsraten sind Teil des empfindlichen Prozesses der Kristallzüchtung. Bei der Herstellung von Kristallen mit 400 mm Durchmesser ist der zur Verfügung stehende Produktionsraum vergleichsweise viel kleiner. Außerdem kann man die geforderte Homogenität der Kristalle nicht mehr gewährleisten. In Anbetracht dieser Probleme macht es keinen Sinn, weiterhin im Wettlauf um immer größer werdende Durchmesser teilzunehmen – es ist einfach nicht rentabel genug. Momentan werden deshalb Kristalle mit „nur“ 300 mm Durchmesser gezüchtet, um den dabei abfallenden Gewinn zu maximieren. Es wird davon ausgegangen, dass das noch etwa 10 Jahre so bleiben wird.

Seit einiger Zeit wird zusätzlich auch an der Kristallzüchtung unter mikrogravitativen Bedingungen geforscht. So ist für die Internationale Raumstation ISS eine eigene modulare Anlage zur Kristallzüchtung vorgesehen, das Materials Science Laboratory (MSL). Man stellte fest, dass die bisherige Bauweise der Öfen nur noch bedingt angewendet werden kann. Es müssen in Anbetracht der völlig anderen Bedingungen neue Prinzipien entwickelt werden, um den Kostenfaktor nicht noch mehr in die Höhe zu treiben. An dieser Stelle seien folgende Punkte genannt: die Beschleunigungen von bis zu 20G bei der Startphase der Trägerrakete, begrenzter Energievorrat, bedeutend weniger Platz, Gewichtsbeschränkung, Temperaturbeständigkeit, Resistenz gegen Strahlenbelastung (Aead, 2004).

Zusammenfassung

Mit dem Czochralski-Verfahren können große Mengen an hochqualitativem Silizium hergestellt werden. Silizium wurde zwar teilweise durch andere synthetische Kristalle ersetzt, die in gewissen Bereichen auch effektiver arbeiten können, aber es wird wohl noch eine Weile das „Arbeitstier“ unter den gezüchteten Einkristallen bleiben. Die Entwicklung wird weiter in Richtung Fehlerbeseitigung gehen, denn gerade Punktdefekte können noch immer nicht zuverlässig eliminiert werden. Oft ist es ein Trial-and-Error-Prozess des Lernens, den die Firmen durchführen, denn die Fehler-Entstehung wurde noch nicht 100-prozentig verstanden. Gegenstand der Forschung ist auch die Simulation dieser Punktdefekte. Momentan ist die weitere Vergrößerung des Durchmessers der Einkristalle nicht rentabel, denn bei einem immer größer werdenden Maßstab der Produktion treten Probleme hervor, die zuvor beherrschbar waren, nun aber eine große Herausforderung darstellen. Eine Vermeidung dieser würde Unmengen an Geldsummen verschlingen. Der Sprung von 300mm Durchmesser auf die nächste Stufe 450 mm wird deshalb noch ein paar Jahre auf sich warten lassen. Er ist untrennbar mit der Weiterentwicklung und Verbesserung der Apparatur verbunden: so muss der Halterungsmechanismus, an dem der Einkristall hängt, überdacht werden, da das immer größer

werdende Gewicht unmöglich länger vom Keimkristall allein gehalten werden kann. Auch die Bauweise der Spulen, die für das Durchmischen der Schmelze verantwortlich sind muss noch verbessert werden – vor allem im Hinblick auf immer größer werdende Schmelzmengen. Als alternative Methode zur Spule wird auch an der „Kristallzüchtung unter Mikrogravitation“ (Aead, 2004) – Kristallzüchtung im Weltall geforscht. Das Gebiet der Kristallzüchtung ist also noch lange nicht als vollständig erforscht zu betrachten und steht immer wieder vor neuen Herausforderungen, die es zu bewältigen gilt.

Referenzen

- AEAD, A.: Konstruktionsprinzipien für Mehrzonen-Öfen zur Kristallzüchtung unter Mikrogravitationsbedingungen. Dissertation der TU Bergakademie Freiberg, 2004
- AMMON, W.v.: Silicon Crystal Growth. Siltronic AG, 2004
- BAGAI, R.K.; Borle, W.N.: Growth of dislocation-free bulk Silicon Crystals. J Crystal Growth, 1982
- BORLE, W.N. et al.: Silicon Crystals Almost Free Of Dislocations. J Crystal Growth, 1970
- FÖLL, H.: Script Silicon Crystal Growth der Universität Kiel, 2004, Link:http://www.tf.uni-kiel.de/matwis/amat/elmat_en/kap_6/backbone/r6_1_2.html
- KAKIMOTO, K.; Lijin, L.: Analysis of local segregation of impurities at a silicon melt–crystal interface during crystal growth in transverse magnetic field-applied Czochralski method. J Crystal Growth, 2009
- KÜCK, H.: Herstellung von Siliziumscheiben (Wafers) im Czochralski-Verfahren. Script der Universität Stuttgart, 2002
- LIU, Z.; Stavrinadis, A.: Growth of Bulk Silicon Crystal and its Application to SiC. Laboratoire des Matériaux et du Génie Physique, 2008
- MULLIN, J.B.: Innovation in Crystal Growth: A Personal Perspective. J Crystal Growth, 2007
- SANG H.L. et al.: Vacancy behavior in Czochralski silicon growth. J Crystal Growth, 2009
- SCHEEL, H. (2008): Crystal Growth Technology: From Fundamentals and Simulation to Large-Scale Production, Wiley-VHC, Weinheim

- SHIRAIISHI, Y. et al.: Growth of silicon crystal with a diameter of 400mm and weight of 400 kg. J Crystal Growth, 2001
- TSUJA, H.: Intrinsic Point defects in Crystalline Silicon, Technos Co., Ltd., 2006
Link: http://jpsj.ipap.jp/news/jpsj-nc_17.html
- WEB: <http://www.wias-berlin.de/>
- ZULEHNER, W.: Historic Overview of Silicon Crystal Pulling Development. Wacker-Chemitronic GmbH, ???
- ZULEHNER, W.: Status and Future of Crystal Growth. Wacker-Chemitronic GmbH, 1989