



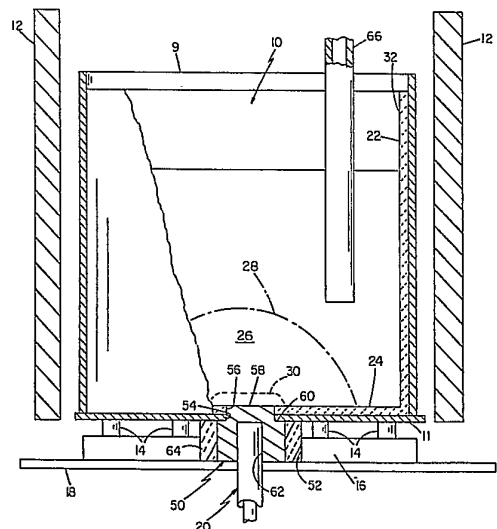
**Erfindungspatent für die Schweiz und Liechtenstein**  
Schweizerisch-liechtensteinischer Patentschutzvertrag vom 22. Dezember 1978

⑫ PATENTSCHRIFT A5

⑲① Gesuchsnummer:	5763/81	⑲③ Inhaber:	Crystal Systems, Inc., Salem/MA (US)
⑲② Anmeldungsdatum:	07.09.1981	⑲④ Erfinder:	Schmid, Frederick, Marblehead/MA (US) Khattak, Chandra P., Danvers/MA (US)
⑲③ Priorität(en):	26.09.1980 US 191260	⑲⑤ Vertreter:	E. Blum & Co., Zürich
⑲④ Patent erteilt:	15.01.1986		
⑲⑤ Patentschrift veröffentlicht:	15.01.1986		

⑲⑤ Verfahren zur Herstellung von Silicium-Einkristallen.

⑲⑦ Beim Verfahren werden Siliciumbarren (26) in Form von Einkristallen erzeugt, und zwar ausgehend von metallurgisch reinem Silicium, welches mehr als 100 ppm an Verunreinigungen aufweist und meistens nur 98- bis 99 %-ig ist. Man erhitzt dieses Silicium in einem Tiegel (10) über seinen Schmelzpunkt und entzieht dann der Schmelze vom Boden (24) des Tiegels her Wärme, wodurch der Einkristall aus einem Saatkristall (30) von unten nach oben in Richtung der Aussenflächen wächst und sich die Grenzfläche fest/flüssig (28) ständig vergrößert. Dadurch können sich die Verunreinigungen in der Grenzfläche (28) weniger stark anreichern als bisher. Durch zusätzliche Massnahmen, wie Zugabe von Siliciumdioxid zur Reaktion mit Siliciumcarbid bzw. zur Verschlackung mit Verunreinigungen, durch Einleiten reaktiver Gase wie Wasserstoff oder Halogen usw. können die Verunreinigungen vor Beginn des Kristallwachstums bzw. im Verlaufe des Verfahrens grösstenteils entfernt werden. Noch verbleibende Verunreinigungen werden zu den Aussenflächen des sich bildenden Siliciumbarrens transportiert, ohne dass die Einkristallinität verlorengeht.



## PATENTANSPRÜCHE

1. Verfahren zur Herstellung von Siliciumbarren, die praktisch als Einkristall vorliegen, bei dem man Silicium in einem Tiegel über seinen Schmelzpunkt erhitzt und die Schmelze dadurch verfestigt, dass man ihr vom Tiegelboden her Wärme mittels eines Wärmetauschers entzieht, der wärmeleitend mit einem Teil des Tiegelbodens verbunden ist, dadurch gekennzeichnet, dass man Silicium einsetzt, welches mehr als 100 ppm an Verunreinigungen enthält, und dass man eine Migration von Verunreinigungen im Silicium von der sich ausbreitenden Grenzfläche festflüssig in Richtung zu Aussenflächen des wachsenden Barrens herbeiführt.

2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass das verwendete Silicium eine Reinheit von weniger als 99% aufweist.

3. Verfahren nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, dass das verwendete Silicium von metallurgischer Reinheit ist, wie es durch Reduktion von Siliciumdioxid durch Kohle in der Hitze erzeugt wird.

4. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass man Siliciumstücke mit metallurgischer Reinheit verwendet, welche keine Vorbehandlung zur Entfernung von Siliciumdioxid durchgemacht haben, das sich bei der Herstellung auf den Stücken bildet.

5. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass man vor der Verfestigung der Schmelze dem Silicium Siliciumdioxid zugibt.

6. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Schmelze unter einen Druck unterhalb 4 kPa gesetzt wird, um die Entfernung flüchtiger Verunreinigungen zu fördern.

7. Verfahren nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, dass der Druck bei etwa 13,3 Pa liegt.

8. Verfahren nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, dass man die Schmelze auf eine Temperatur zwischen 50 °C und 100 °C oberhalb des Schmelzpunktes des Siliciums erhitzt, um die Entfernung flüchtiger Verunreinigungen zu fördern.

9. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass man in der Siliciumschmelze Verunreinigungen mit Reaktionsmitteln umsetzt, welche die Bildung flüchtiger Reaktionsprodukte ermöglichen, die man dann aus dem geschmolzenen Silicium abführt.

10. Verfahren nach Anspruch 9, dadurch gekennzeichnet, dass man als Reaktionsmittel feuchten Wasserstoff durch das geschmolzene Silicium hindurchleitet.

11. Verfahren nach Anspruch 9, dadurch gekennzeichnet, dass man die Umsetzung durch Hindurchleiten von Chlor durch die Siliciumschmelze ausführt.

Die vorliegende Erfindung bezieht sich auf die Herstellung von Silicium-Einkristallen, die zur Verwendung in Photoelementen bzw. Solarzellen geeignet sind, ausgehend von Silicium mit geringer Reinheit.

Die besten Solarzellen sind bisher ausgehend von hochreinem, einkristallinem Silicium hergestellt worden, dessen Erzeugung bei den bekannten Verfahren viele Verfahrensschritte benötigt. Silicium mit metallurgischer Reinheit wird normalerweise in grossen Mengen in Lichtbogenöfen erzeugt, in denen eine thermische Reduktion von Siliciumdioxid mittels Kohlenstoff stattfindet. Dieses Silicium besitzt eine Reinheit von 98 bis 99%, wodurch die Bildung von Einkristallen verhindert und die Leitfähigkeit zur Verwendung für Solarzellen zu gross ist, was hauptsächlich auf die Anwesenheit von Bor und Phosphor zurückzuführen ist. Dieses carbothermi-

sche Verfahren bedingt die Anwesenheit von beträchtlichen Mengen an Kohlenstoff, hauptsächlich in Form von Siliciumcarbid, und da das Silicium an der Luft umgegossen wird, unterliegt seine Oberfläche einer Oxidation zu Siliciumdioxid. Dieses metallurgische Silicium wird dann nach einem anderen Verfahren chemisch in ein Zwischenprodukt umgewandelt, beispielsweise Trichlorsilan, welches dann wieder nach einem anderen Verfahren, beispielsweise dem Siemens-Verfahren, in halbleiterreines Silicium mit Verunreinigungen im ppb-Gebiet umgewandelt werden muss. Erst aus diesem Silicium erzeugt man Einkristalle, die zur Verwendung für Solarzellen geeignet sind. Ein Verfahren, welches zur Erzeugung von Einkristallen aus derartigem hochreinem Silicium gut geeignet ist, d.h. aus Silicium mit Verunreinigungen von weniger als 10 ppb, ist das Wärmeaustauschverfahren, bei dem man das Material in einem Tiegel bis oberhalb seines Schmelzpunktes im Vakuum erhitzt, um das Material im Tiegel zu schmelzen, und danach der Schmelze durch den Boden des Tiegels Wärme entzieht, indem man einen Wärmeaustauscher in wärmeleitende Verbindung mit diesem Tiegelboden bringt. Diese Wärmeaustauschermethode ist in den US-PS 3 653 432 und 3 898 051 und den Anmeldungen Nrn. 4465 (18.01.79) und 967 114 (07.12.78) beschrieben, deren Offenbarung auch für die vorliegende Anmeldung gelten soll.

Wenn man besonders ausgesuchtes Siliciumdioxid und Kohlenstoff in einem Lichtbogenofen verwendet, so gelingt, die die Dow Corning Corporation gezeigt hat, die Herstellung von metallurgischem Silicium mit einer Reinheit von etwa 99,8% und niedrigen Konzentrationen an Bor und Phosphor. Diese Verunreinigungen haben hohe Segregationskoeffizienten und sind daher bei einer gerichteten Verfestigung der Schmelze nur sehr schwierig durch Entmischen abzutrennen. Das bezeichnete Silicium wurde in Luft vergossen, wodurch eine Oberflächensicht aus Siliciumdioxid entstand, welche man durch Abätzen entfernte, bevor man dieses Silicium einer gerichteten Verfestigung nach dem Czochralski-Verfahren unterwarf. Dabei trat immer noch ein Verlust an Einkristallinität auf; jedoch ermöglichte das Wachstum eines zweiten Kristalls, für dessen Herstellung man die besten Anteile des ersten Wachstums als Ausgangsmaterial benutzte, die Produktion eines einkristallinen Materials, das sich für die Fabrikation von Solarzellen eignete.

Aufgabe der Erfindung ist es, ein Verfahren anzugeben, das die oben besprochenen chemischen und verfahrenstechnischen Nachteile vermeidet und es ermöglicht, halbleiterreine Siliciumeinkristalle einstufig zu erzeugen.

Es wurde nun gefunden, dass sich Silicium mit Verunreinigungen von mehr als 100 ppm, beispielsweise metallurgisch-reines Silicium, das eine Reinheit von weniger als 99% aufweist, in einen einkristallinen Barren nach einem einstufigen Verfahren umwandeln lässt, indem man das Wärmeaustauscherverfahren anwendet und nach Erfindung vorgeht, wie nachstehend ausgeführt wird.

Es wurde gefunden, dass man das Ausgangsprodukt des Verfahrens vorgängig raffinieren kann. Bei bevorzugten Ausführungsformen wird das Siliciumdioxid, welches das metallurgisch reine Silicium bedeckt, vor dem Aufschmelzen nicht abgeätzt, weil man dadurch die Entfernung von Siliciumcarbid durch Verschlacken des Siliciumdioxids fördern kann, und bei einer sehr bevorzugten Ausführungsform wird reines gepulvertes Siliciumdioxid (in Form der amorphen Phase, d.h. als Glas) vor dem Kristallwachstum der Schmelze zugeetzt. Bei anderen Ausführungsformen wird die Schmelze gerührt und feuchter Wasserstoff vor dem Kristallwachstum durch die Schmelze hindurchgeleitet, damit verunreinigendes Bor als Borwasserstoff entfernt wird, oder es wird Chlor durch die Schmelze hindurchgeleitet, wodurch sich flüchtige Reaktionsprodukte bilden und ebenfalls zur Entfernung von

Verunreinigungen führen, und ausserdem kann die Schmelze auf hohe Temperaturen vor dem Kristallwachstum erwärmt werden, das bei einer niederen Temperatur stattfindet, damit Verunreinigungen ausgetrieben werden.

Bei allen diesen Ausführungsformen wird eine Raffinierung durch die sich ausdehnende Grenzfläche zwischen Feststoff und Flüssigkeit verbessert, nämlich im Gegensatz zur konstanten Grenzflächengrösse bei einer gerichteten Verfestigung, oder aber einer sich verkleinernden Grenzfläche bei Verfahren, bei denen sich äussere Bereiche vor den inneren Bereichen verfestigen, und beim erfindungsgemässen Verfahren wird die Konzentration an Verunreinigungen an der Grenzfläche beschränkt, wogegen bei den bekannten Verfahren die unvermeidliche Erhöhung der Konzentration an Unreinheiten in der Grenzfläche zu deren Zerstörung und dem Verlust an Einkristallinität führt. Beim vorliegenden Verfahren werden zusätzlich die Verunreinigungen zu Aussenflächen des sich bildenden einkristallinen Barrens transportiert, wo man sie leicht abziehen kann, und der Temperaturgradient, der dadurch entsteht, dass die höchste Temperatur der Schmelze an deren Oberfläche liegt, fördert stabile Unreinheitsgradienten und eine Bewegung der Flüssigkeit. Die Schicht aus Kieselsäureschlacke schwimmt an der Oberfläche der Schmelze und stört die Grenzfläche fest/flüssig nicht. Bei den Ausführungsformen, bei denen man Gas in die Schmelze einleitet bzw. diese umrührt, fördert die erhöhte Turbulenz die Entfernung von Verunreinigungen aus der Grenzfläche und ihren Transport an die Oberfläche der Schmelze.

Führt man das Wärmeaustauschverfahren im Vakuum mit Silicium aus, welches relativ hohe Konzentrationen an Verunreinigungen enthält, beispielsweise mit metallurgischem Silicium, so erzielt man eine zusätzliche Raffinierung durch Verdampfung von Verunreinigungen, die einen hohen Dampfdruck aufweisen. Es handelt sich dabei um Verunreinigungen, beispielsweise Alkalimetalle, Mangan usw., die die Neigung besitzen, in die Dampfphase überzugehen, anstatt in der Siliciumschmelze zu verbleiben. Im Vakuum, beispielsweise unterhalb 4 kPa (30 Torr) und vorzugsweise bei etwa 13,3 Pa (0,1 Torr), wird der Dampf der Verunreinigungen kontinuierlich von der Reaktionsstelle entfernt und kann sich nicht an der Oberfläche der Schmelze ansammeln, wodurch die Entfernung dieser Verunreinigungen aus der Schmelze verbessert wird.

Es sollen nun einzelne Ausführungsformen der Erfindung zur besseren Erläuterung im Zusammenhang mit der Zeichnung besprochen werden, die aus einer einzigen Figur besteht und die schematisch eine teilgeschnittene Ansicht einer Vorrichtung zur Ausführung des erfindungsgemässen Verfahrens zeigt.

In der Figur ist ein Tiegel 10 aus Siliciumdioxid gezeigt, der in einer zylindrischen Heizkammer steht, welche durch eine Widerstandsheizung 12 eines Giessofens gemäss US-PS 3 898 051 gebildet ist. Der Tiegel 10 steht auf einer Molybdänscheibe 11, die wiederum durch Graphitstäbe 14 abgestützt ist, welche auf einer Graphitplatte 16 auf dem Boden 18 der Heizkammer liegen, und der Tiegel 10 wird weiterhin von einem zylindrischen Molybdänkäfig 9 umgeben. Ein mit Helium gekühlter Molybdän-Wärmetauscher 20, der nach der Lehre der US-PS 3 653 432 aufgebaut ist, erstreckt sich durch Öffnungen im Mittelbereich der Graphitplatte 16 und des Bodens 18 der Heizkammer.

Der Tiegel 10 besitzt beispielsweise eine Höhe und einen Durchmesser von etwa 15 cm, und seine zylindrische Wandung 22 und der Boden 24 sind etwa 3,7 mm dick. Die Molybdänscheibe 11 hat beispielsweise eine Dicke von etwa 1 mm, und der Molybdänkäfig 9 aus einem Blech der gleichen Dicke, welches zu einem Zylinder gewalzt ist, umgibt die Aussenwandung des Zylinders 22. Im Inneren des Tiegels

10 ist ein teilweise verfestigter Siliciumbarren 26 gemäss dem in den vorstehenden Patentschriften beschriebenen Verfahren angedeutet, wobei die Grenzfläche fest/flüssig 28 vom Saatkristall aus fortgeschritten ist, der gestrichelt dargestellt und mit 30 bezeichnet ist.

Vom Boden 18 der Heizkammer erstreckt sich durch koaxiale Öffnungen 52, 54 und 56 in der Platte 16, der Molybdänscheibe 11, bzw. dem Tiegelboden 24 ein abgesetzter zylindrischer Graphitstopfen 50, dessen oberer Durchmesser beispielsweise 4,8 mm und dessen Durchmesser im unteren Bereich etwa 6,35 mm beträgt. Die Stirnfläche 58 des Stopfens 50 fluchtet mit der inneren Bodenfläche 24 des Tiegels 10. Der Saatkristall 30 ist über dem Stopfen 50 und den anliegenden Bereichen des Tiegelbodens 24 derart plaziert, dass er die Öffnung 56 bedeckt. Die Mantelfläche des oberen Bereiches des Stopfens 50 passt lose in die Öffnungen 54 und 56, damit eine Wärmeausdehnung möglich ist; die Stufe 60 zwischen den beiden Bereichen des Stopfens mit verschiedenem Durchmesser liegt an der Unterseite der Molybdänscheibe 11 an. Man bringt eine kleine Menge an Siliciumpulver in den Bereich der Öffnung 56, wo der Saatkristall 30, der Tiegel 10 und der Graphitstopfen 50 in der Nähe sind. Der Wärmeaustauscher 20 passt in eine Ausnehmung 62 im Boden des Stopfens 50, wobei die Stirnfläche des Wärmetauschers etwa 3,2 mm unterhalb der oberen Fläche 58 des Stopfens endet. Eine Isolation aus Graphitfilz und/oder einem Hitzeschild aus einer Molybdänhülse 64 umgibt eng den Bereich des Stopfens 50 mit grösserem Durchmesser und erstreckt sich axial zwischen dem Kammerboden 18 und der Molybdänscheibe 11. Wie gezeigt ist, liegt die Mantelfläche der Isolierhülse 64 am Inneren der Öffnung 52 in der Graphitplatte 16 an.

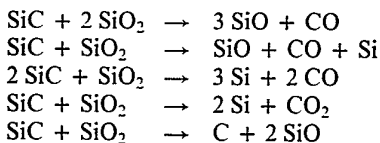
Bei einer Ausführungsform, die weiter unten beschrieben wird, ist ein bewegliches Rohr aus Siliciumdioxid 66 durch nicht gezeigte Mittel so aufgehängt, dass ein Ende in den Tiegel 10 hineinragt und das andere Ende mit einem nicht dargestellten Gasvorrat verbunden ist.

Zur Erzeugung von Einkristallen durch Wachstum aus der Schmelze eines Siliciums mit metallurgischer Reinheit wurde die beschriebene Vorrichtung unter Verfahrensbedingungen betrieben, die in den genannten Patenten und Patentanmeldungen beschrieben sind. Zuerst wurde geätztes metallurgisch reines Silicium nach oben und aussen in einem Tiegel 10 der obengenannten Abmessungen nach der Wärmeaustauschermethode verfestigt. Die Schmelze wurde unter einem Vakuum von 13,3 Pa (0,1 Torr) so erhitzt, dass die Ofentemperatur auf weniger als 3 °C oberhalb des Schmelzpunktes des Silicium gehalten wurde, und die Temperatur des Wärmeaustauschers wurde auf 113 °C unterhalb des Schmelzpunktes eingestellt. Dann wurde die Temperatur des Wärmetauschers im Verlaufe des Kristallwachstums im Tiegel mit einer Geschwindigkeit von 420 °C pro Stunde abgesenkt, die Ofentemperatur wurde konstant gehalten, und das Kristallwachstum dauerte etwa 7¼ Stunden. Man erhielt einen Einkristall mit Verunreinigungen, die sich an der Aussenseite des erhaltenen Barrens entmischt abgeschieden hatten. Selbst Verunreinigungen, die als Feststoffteilchen vorliegen, die weder an der Oberfläche der Schmelze schwimmen noch in ihr absinken, sondern in Suspension verblieben, konnten die Einkristallinität nicht beseitigen, da beim Verfahren sich eine sehr stabile Grenzfläche fest/flüssig ausbildet, die Temperatur- und Unreinheitsgradienten ebenfalls sehr stabil sind und mechanische Vibrationen sowie Temperaturänderungen des Heizelementes durch den flüssigen Pufferbereich zwischen der Grenzfläche 28 und der Tiegelwandung 22 gedämpft werden. Ein wichtiges Merkmal des Kristallwachstums beim Wärmeaustauscherverfahren, wodurch Verunreinigungen aus metallurgisch reinem Silicium leichter entfernt werden, besteht darin, dass der Kristall vom Mittelpunkt des Tiegelbodens nach aussen

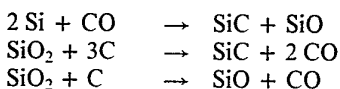
wächst, so dass die letzten Bereiche, die sich verfestigen, an der Oberfläche der Schmelze und an den Tiegelwandungen liegen. Nach Massgabe des Fortschreitens der Verfestigung trennen sich Verunreinigungen durch Entmischung schon vor der Grenzfläche fest/flüssig ab, wodurch diese Verunreinigung nicht in der Grenzfläche erscheinen, sondern ihre Konzentration in der verbleibenden Schmelze zunimmt. Obschon die Erhöhung der Konzentration an Verunreinigungen vor der Grenzfläche bei den Verfestigungsverfahren, bei denen die Grenzfläche in einer Richtung fortschreitet, zur Zerstörung der Grenzfläche und Verlust der Einkristallinität führt, tritt dies beim erfindungsgemässen Verfahren nicht ein, weil sich bei diesem Verfahren die genannte Grenzfläche ständig vergrössert und die Verunreinigungen demgemäss sich ständig über eine grössere Grenzfläche verteilen. Auf diese Weise ist die Konzentrationserhöhung der Verunreinigungen pro Flächeneinheit der Grenzfläche viel geringer als bei einseitig gerichteter Verfestigung. Daraus folgt wiederum, dass man nach dem Wärmeaustauschverfahren höhere Verunreinigungen zulassen kann, ohne dass die Einkristallstruktur verlorengeht. Die Verunreinigungen werden nach Aussenflächen des sich bildenden einkristallinen Barrens transportiert, wo man sie leicht abscheiden und abnehmen kann; man ist also erfindungsgemäss bestrebt, eine Aufkonzentrierung der Verunreinigungen in der Grenzfläche fest/flüssig zu vermeiden. Eine solche Konzentrierung kann weiter dadurch herabgedrückt werden, dass man die Schmelze rührt.

Der hohe Kohlenstoffgehalt des verwendeten Siliciums, nämlich bis zu 0,5%, führte zur Bildung von Siliciumcarbidteilchen sowohl an der Oberfläche des Barrens, wo man sie leicht entfernen kann, als auch im Inneren des Kristalls, wo sie die Reinheit des Kristalls vermindern, seine Einkristallinität jedoch nicht verhindern.

In einem nächsten Beispiel wurde ungeätztes Silicium zusammen mit der anhaftenden Dioxidschicht verwendet, um den Gehalt des Endproduktes an Siliciumcarbid zu vermindern. Siliciumdioxid reagiert mit Siliciumcarbid nach folgenden Gleichungen:



Die Reaktionsprodukte können folgendermassen weiterreagieren:



Diese Reaktionen besitzen am Schmelzpunkt des Siliciums und unter einem Druck von etwa 13,3 Pa (0,1 Torr) negative freie Energien, so dass sie die Tendenz haben, im Sinne der

gezeichneten Pfeile abzulaufen. Das Kohlenmonoxid, Kohlendioxid und Siliciummonoxid, welche nach diesen Reaktionen entstehen, bilden Bläschen, die zur Oberfläche aufsteigen, und auf diese Weise erzielt man schliesslich eine Entfernung von Kohlenstoff aus der Schmelze. Die Anwesenheit von Siliciumdioxiden ermöglicht weiterhin die Entfernung anderer Carbide sowie weiterer Verunreinigungen wie beispielsweise Aluminium durch Verschlacken. Die Schlackenschicht steigt zur Oberfläche der Schmelze und kann die Grenzfläche fest/flüssig des sich bildenden Barrens nicht mehr beeinflussen; demgemäss finden sich diese Verunreinigungen nicht mehr im gebildeten Kristall.

Man hat ebenfalls hochreine Kieselsäure vor dem Einsetzen des Kristallwachstums der Schmelze zugegeben, um den Gehalt an Siliciumcarbid weiter zu reduzieren. Man brachte in den Tiegel 10 mit den angegebenen Abmessungen (Durchmesser und Höhe jeweils 15 cm) 150 g Siliciumdioxid (Reinheit 99%, gepulvert, Teilchengrösse etwa 100 µm) sowie 3 kg Silicium mit metallurgischer Reinheit.

Bei den Ausführungsformen, bei denen ungeätztes Silicium allein sowie ungeätztes Silicium unter Zugabe von Siliciumdioxid eingesetzt wurden, konnte man die Schlacke nach dem Kristallwachstum leicht entfernen.

Bei der Ausführungsform mit zugegebenem Siliciumdioxid hatte der gebildete Barren eine Leitfähigkeit, die niedrig genug war, damit er zur Herstellung von Photozellen verwendet werden konnte. Solarzellen aus diesem Silicium hatten einen Umwandlungs-Wirkungsgrad von 12,33%.

Ausser den geschilderten Ausführungsformen, bei denen man ungeätztes, metallurgisch reines Silicium einsetzte sowie Siliciumdioxid der Schmelze zugab, ist die Anwendung anderer Raffinierverfahren möglich, weil die Grenzfläche fest/flüssig stabil ist und sich ständig vergrössert. Diese anderen Verfahren bestehen darin, dass man der Schmelze eine Substanz zugibt, die mit den Verunreinigungen im Silicium unter Bildung eines Feststoffes, einer unmischbaren Flüssigkeit oder eines Gases reagieren.

Beispielsweise kann man Verunreinigungen aus der Schmelze abtreiben, indem man durch das Rohr 66 Gase einleitet, die mit den Verunreinigungen unter Bildung von Reaktionsprodukten reagieren, welche flüchtig sind oder anderweitig aus der Schmelze abgeschieden werden können. Insbesondere erreicht man durch das Einleiten von feuchtem Wasserstoff die Entfernung des Bors durch die Bildung von Borhydriden.

Eingeleitetes Chlor reagiert mit metallischen Verunreinigungen unter Bildung flüchtiger Reaktionsprodukte, beispielsweise Eisenchloride.

Schliesslich wurde bei Ausführungsformen die Temperatur der Schmelze auf 50 bis 100 °C oberhalb des Schmelzpunktes des Siliciums erhöht, um eine Verdampfung von Verunreinigungen zu verstärken. Nach ausreichender Entfernung der Verunreinigungen wurde die Temperatur dann wieder auf 3 °C oberhalb des Schmelzpunktes gesenkt, um ein Wachstum des Kristalls zu ermöglichen.

