

SIEMENS

55. Jahrgang
Januar/
Februar 1981
Heft 1

1|81

Siemens Zeitschrift



Silizium – Werkstoff der Elektronik

25 Jahre
Siliziumentwicklung bei Siemens

Eberhard Spenke
Walter Heywang

Bei der Vielfalt der Stoffe, die wir heute erzeugen und verwenden, wird es kaum mehr bewußt, daß einzelne Stoffe das Leben entscheidend prägen können. Frühgeschichtlich sind ganze Epochen danach benannt, welcher Rohstoff vorzugsweise die Innovation beherrschte: Stein-, Bronze- und Eisenzeit. Heute wäre eine solche Charakterisierung viel zu einfach; bezogen auf die Elektrotechnik wird der Innovationsschub der letzten Jahrzehnte aber eindeutig von einem Stoff bestimmt, dessen hervorragende Eigenschaften sowohl für die Leistungsbaulemente als auch besonders für integrierte Schaltungen jeder Art ausschlaggebend sind: dem Silizium.

Entscheidenden Anteil an der Siliziumtechnologie hatte die Siemens AG. Verfahren, die zur großtechnischen Herstellung von höchstem Silizium notwendig sind, wurden hier vor etwa 25 Jahren entwickelt (Bild 1). Heute werden rund 80% der weltweit 2000 t nach Siemens-Lizenzen hergestellt.

Neue Bauelemente – neue Werkstoffe

Triebkraft für die Erforschung und Entwicklung auf dem Gebiet der Halbleiter ist immer der Wunsch nach leistungsfähigeren elektronischen Bauelementen. So begann man mit dem Aufkommen der Mikrowellentechnik (z. B. für Radar) die Vakuumröhren wieder durch den alten Spitzendetektor zu ersetzen. Von 1926 an traten in der Starkstromtechnik die

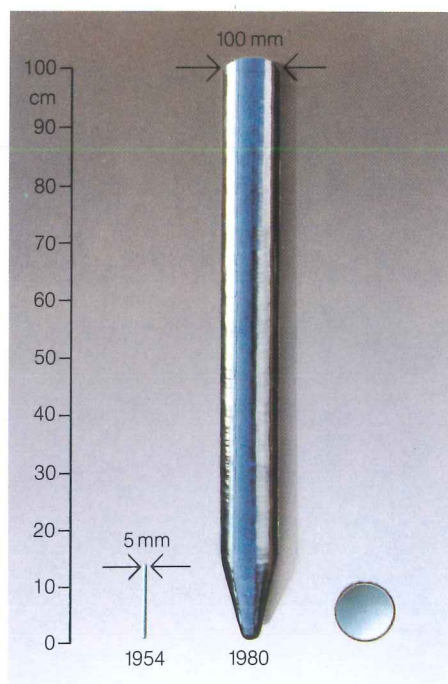
Dr. phil. Dr.-Ing. E. h. Eberhard Spenke,
ehem. Leiter eines Laboratoriums
für Halbleiter der Siemens AG, Pretzfeld

Prof. Dr. rer. nat. Walter Heywang,
Siemens AG, Leiter der
Zentralen Forschung und Entwicklung,
München und Erlangen

Kupferoxydul- und die Selengleichrichter an die Seite der gasgefüllten Thyratrons.

Den eigentlichen Durchbruch zur modernen Halbleitertechnik (zunächst auf Germaniumbasis) brachte aber erst ein neuartiges Bauelement, nämlich der 1948 erfundene Transistor. Er drang rasch in die Elektronik ein und ermöglichte letztlich die moderne Computer- und Digitaltechnik.

Bild 1 Die im Siemens-Verfahren gewonnenen Stäbe aus »Halbleitersilizium« haben ihren Durchmesser in 25 Jahren verzwanzigfacht. Große Durchmesser werden aus zwei Gründen angestrebt: In der Leistungselektronik hängt die Belastbarkeit der Bauelemente u. a. vom Scheibendurchmesser ab; bei der Fertigung integrierter Schaltungen senkt der Scheibendurchmesser die Herstellungskosten erheblich



In der Leistungselektronik hatten der 1956 vorgestellte Siliziumgleichrichter und der 1958 erschienene Thyristor eine vergleichbare Bedeutung.

Die enorme Überlegenheit der neuen Bauelemente auf Halbleiterbasis beruht im Vergleich mit den Röhren im wesentlichen auf drei Punkten:

- vergleichsweise geringer Energiebedarf,
- kleines Volumen und
- hohe Schaltgeschwindigkeit.

Diese Vorteile wurden schon bei der Erfindung des Transistors im Prinzip erkannt.

Trotzdem blieb eine Reihe von Nachteilen, vor allem die Tatsache, daß Germaniumbauelemente keine Betriebstemperaturen über 75°C zulassen. Deshalb wurde in den fünfziger Jahren intensiv nach weiteren Werkstoffen gesucht. Bei Siemens wurde der Halbleitercharakter der III-V-Verbindungen erkannt (von Welker) und der Werkstoff »Halbleitersilizium« entwickelt (s. S. 10).

Um die Eignung eines Materials für Halbleiterbauelemente beurteilen zu können, muß man die Vorgänge in Halbleiterbauelementen verstehen. Die besonderen Eigenschaften von Halbleiterbauelementen entstehen bekanntlich dadurch, daß die relativ geringe Leitfähigkeit des reinen Grundmaterials durch Einbau von Fremdatomen (Störstellen) stark erhöht werden kann und zwei unterschiedliche Leitungsmechanismen möglich sind: Die Dotierung mit »Donatoren« (z. B. Einbau von Phosphor) führt dazu, daß die Störstellen Leitungselektronen abgeben (n-Leitung); eingebrachte »Akzeptoren« (z. B. Aluminium) entziehen dem Kristallgitter Elektronen. Man spricht von p-Leitung durch positive Defektelektronen. Die Kombination von unterschiedlich dotierten Schichten ist die Grundlage der verschiedensten elektronischen Bauelemente.

Um durch gezielte Dotierung die gewünschten Halbleitereigenschaften zu erreichen, ist zunächst eine extreme Reinheit und Perfektion des Kristallgitters erforderlich, die in der klassischen Chemie unvorstellbar erschien. Diese Reinheit und Perfektion hat hier dieselbe Bedeutung wie das Hochvakuum für die Kathodenstrahlröhre. Denn ebenso wie Gasreste in einer Röhre zu störenden Sekundärprozessen Anlaß geben, so greift jede Gitterstörung (die durch ein Fremdatom genauso verursacht werden kann

wie durch ein falsch plaziertes Atom des Halbleitermaterials) in den Leitungsmechanismus des Halbleiters ein.

Halbleiterwerkstoffe – Silizium führt

Für die Herstellung von Halbleiterbauelementen ist, wie oben ausgeführt, höchstreines Ausgangsmaterial erforderlich. Zur Veranschaulichung dieses komplexen Begriffs zwei Beispiele:

- Anfang der fünfziger Jahre spielte das Problem »Bor in Silizium« eine entscheidende Rolle, da Bor wegen seiner chemischen Verwandtschaft zu Silizium nur schwer zu entfernen ist, aber je eingebautes Atom ein Defekt-elektron erzeugt. Damit diese unkontrollierte Grunddotierung die Funktion nicht beeinflusst, mußte für eine generelle Verwendbarkeit Bor so weit entfernt werden, daß auf 10^{10} Siliziumatome nur ein Boratom entfiel. Dazu ein drastischer Vergleich: Würde man die gesamte Weltbevölkerung in Reih und Glied aufstellen, so dürfte entsprechend der für Silizium geforderten »Reinheit« höchstens eine Person fehlen.

- In durchaus halbleitertauglichem Silizium können aber Kohlenstoff- und Sauerstoffatome in ziemlich hoher Konzentration enthalten sein. Sie sind z. T. für die Bruchfestigkeit sogar erwünscht.

Reinheit und Kristallperfektion sind also sehr relative Begriffe. Es handelt sich vor allem um die gesicherte Kontrolle von Fremdstoffgehalt und Kristallstörung. Daher betont man heutzutage den Gesichtspunkt der höchsten Reinheit weniger, sondern verlangen von den betreffenden Ausgangsstoffen »Halbleiterqualität« bzw. spricht z. B. einfach von »Halbleiter-silizium« im Gegensatz zu »kommerziellem« oder »technischem« Silizium, wie es z. B. zur Stahllegierung verwendet wird.

Es gibt eine Vielzahl von halbleitenden Substanzen. In der Bauelementepraxis werden aber fast nur Galliumarsenid, Galliumphosphid, Germanium und vor allem Silizium eingesetzt. Die überragende Rolle des Siliziums – es beherrscht über 90% des Halbleitermarkts – hat drei Gründe:

- Bauelemente aus Silizium lassen sich weit höhere Arbeitstemperaturen (etwa 150°C) zu als z. B. Germaniumbauelemente (etwa 75°C).
- Die Herstellung genügend reiner und exakt dotierter Siliziumkristalle

mit ausreichender Gitterperfektion wird heute einwandfrei beherrscht.

- Silizium verfügt über ein chemisch und elektrisch außerordentlich stabiles Oxid, das man bei hohen Temperaturen als dichte isolierende Schicht aufwachsen lassen kann, das sich aber auch durch Ätzen mit Flußsäure wieder leicht entfernen läßt. Diese Tatsache spielt für die Herstellung von integrierten Schaltkreisen eine entscheidende Rolle und begründet damit die Dominanz des Siliziums auf dem Halbleitermarkt.

Silizium (aus lat. silex »Kiesel«), mit dem chemischen Symbol Si bezeichnet, ist mit 25,8% Anteil nach Sauerstoff das zweithäufigste Element der Erdrinde. In der Natur kommt es nur in oxidischen Verbindungen, den Silikaten, vor, ein Zeichen seiner großen chemischen Aggressivität. Deswegen sind aber auch alle ohne besondere Vorsichtsmaßnahmen dargestellten Siliziumproben stark verunreinigt, so stark, daß teilweise bis in die fünfziger Jahre seine wichtigste Eigenschaft – sein Halbleitercharakter – nicht erkannt wurde. Man glaubte, Silizium den Metallen zuordnen zu müssen.

Die Gewinnung von »Halbleitersilizium«

Die in den Jahren 1953 bis 1956 bei Siemens entwickelten Methoden. Silizium in Halbleiterqualität herzustellen, bestehen im wesentlichen aus drei Verfahrensschritten (Bilder 2, 3, 4):

- dem Abscheidungsprozeß, bei dem schon sehr reines Silizium durch thermische Zersetzung von Siliziumchloroform bzw. Siliziumtetrachlorid und Reduktion mit Wasserstoff gewonnen wird,
- dem tiegelfreien Zonenziehen, bei dem die stabförmige (polykristalline) Probe sowohl gereinigt als auch in den einkristallinen Zustand übergeführt wird,
- dem Dünnsziehen von Siliziumstäben, die wiederum für den Abschei-

lungsprozeß und das Zonenziehen gebraucht werden.

An diesen drei Schritten hat sich seit 1956 im Prinzip nichts geändert. Es hat aber sehr viele apparative und verfahrensmäßige Verbesserungen gegeben. Drei Beispiele seien hier genannt:

- Tiegelziehen erlaubt eine kostengünstigere Herstellung von Siliziumkristallen großer Durchmesser in einer für viele Zwecke ausreichenden Qualität.
- Eine Verbesserung der Kristallperfektion bzw. die Vermeidung von Ver-setzungen erreicht man durch das sogenannte Flaschenhalsziehen (s. auch Seite 11).
- Das Dünnsziehen kann heute in Großfertigungen wegen der Verbesserungen in der Säge- und Ätztechnik durch Dünnsägen ergänzt werden.

Waren es zu Beginn noch recht kleine Proben, die man herstellen konnte, so beherrscht man heute die großtechnische Herstellung von »Halbleitersilizium«-Zylindern mit 10 cm Durchmesser und etwa 1 m Länge (Bild 1). Auf der Grundlage des Siemens-Know-hows werden heute etwa 80% der weltweit 2000 t Silizium hergestellt.

Parallel mit der Entwicklung der Herstellungsverfahren mußten auch neue Untersuchungsverfahren gefunden werden.

Für das Beurteilen des Reinheitsgrades wurden zunächst klassische chemische Analyseverfahren – allerdings ungemein verfeinert – verwendet. Hinzu kamen dann die bekannten Verfahren der Mikroanalyse (Spektralanalyse, radioaktive Aktivierungsanalyse in Verbindung mit Anreicherungsverfahren). Hierbei zeigte sich jedoch häufig, daß die restlichen Verunreinigungen unter der Nachweisgrenze aller dieser Verfahren, d. h. im allgemeinen unter 0,00001%, liegen. Es kommt aber auf die genaue Erfassung und Kontrolle solcher und noch geringerer Verunreinigungsprozente an. Für eine weitergehende Beurteilung müssen daher andere Verfahren herangezogen werden, die sich aus der direkten Messung der ohnehin entscheidenden physikalischen Halbleitereigenschaften ergeben.

Bauelemente aus Silizium

Bei der »Beherrschung« des Siliziums kommt es nicht nur darauf an, es in Halbleiterqualität zu gewinnen; ebenso wichtig ist die Technologie der

unterschiedlichsten elektronischen Bauelemente aus diesem Werkstoff. Diese Verfahren sind heute so komplex, daß hier nur die wichtigsten Grundprinzipien und Probleme an einigen Beispielen – in historischer Reihenfolge – demonstriert werden können.

Dioden

Einfachstes Beispiel für die Struktur und die Herstellung eines Siliziumbauelements ist der ungesteuerte Gleichrichter, die Diode. Soll sie sowohl hohe Spannungen sperren als auch große Ströme durchlassen, so ge-

nügt nicht mehr eine einfache Zweischichtstruktur, man braucht eine Siliziumscheibe mit drei Schichten (psn-Diode, Bild 5).

Für die Herstellung diffundiert man in das schwach dotierte Ausgangsmaterial von der einen Seite Aluminium, von der anderen Phosphor ein.

Die Problematik besteht darin, diese Schichten in der gewünschten Dicke zu erhalten und die vorgegebenen winzigen Konzentrationen der Dotieratome auf $\pm 10\%$ genau einzuhalten.

Auf die Scheibe wird als Elektrode oben eine Metallschicht aufgedampft,

unten wird eine Molybdänplatte angelegt.

Schließlich muß der Rand der Siliziumscheibe noch eine geeignete Kontur erhalten, da sonst die Spannungsfestigkeit zu gering ist.

Daß es bei der Entwicklung von Halbleiterbauelementen nicht nur auf die Beherrschung des Werkstoffes ankommt, sondern auch eine Fülle anderer Probleme zu bewältigen ist, zeigt folgendes Beispiel:

Beim Betrieb von Leistungsdioden treten starke Temperaturschwankungen auf, die die Verbindung zwischen

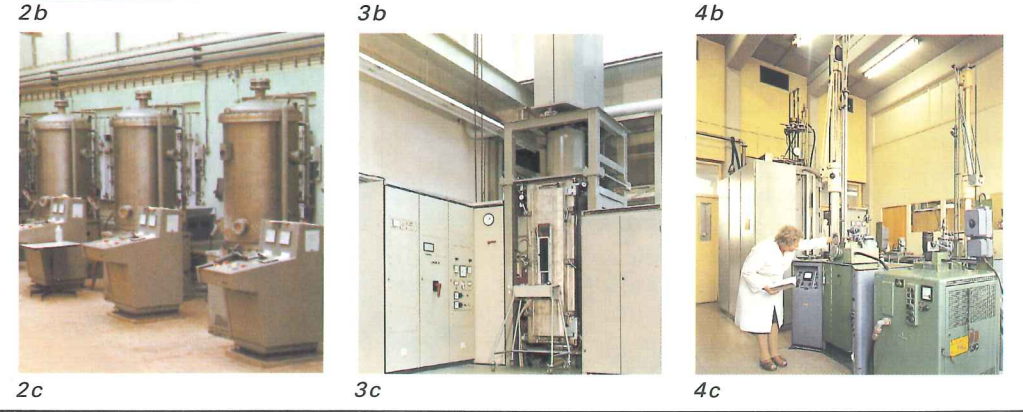
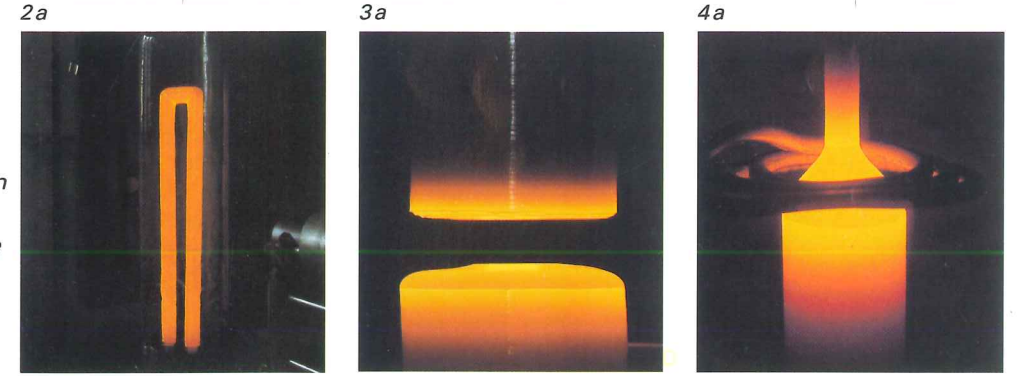
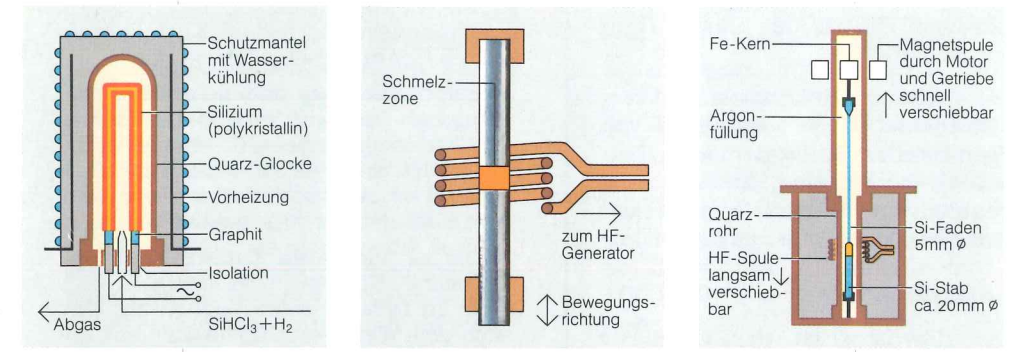
Die Herstellung von »Halbleitersilizium« nach dem Siemens-Verfahren

Bild 2
a) Prinzip der Siliziumabscheidung durch thermische Zersetzung von Siliziumchloroform und Reduktion mit Wasserstoff
b) Glühende Siliziumstäbe im C-Reaktor
c) Großtechnische C-Reaktoren für den Abscheidungsprozeß

Der Abscheidungsprozeß liefert das polykristalline Ausgangsmaterial großer Reinheit, das für die weiteren Verfahrensschritte erforderlich ist.

Das polykristalline Material wird im tiegellosten Zonenziehverfahren weiter gereinigt und in einkristallinen Zustand übergeführt.

Durch Dünnsziehen erhält man hochwertige Dünnsstäbe, die sowohl für den Abscheidungsprozeß als auch als Impflinge für das Zonenziehen benötigt werden.



Wünschen Sie weitere Informationen über Silizium und Halbleiterbauelemente, so fordern Sie bitte die Unterlagen unter 2 bis 6 auf Seite 32 an.

Für Ihre Bestellung verwenden Sie bitte die anhängende Postkarte, und kreuzen Sie darauf die entsprechenden Nummern an.

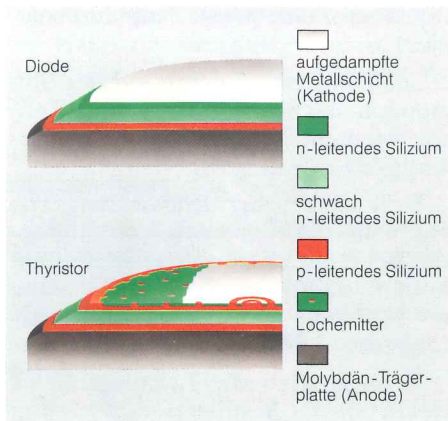


Bild 5 Schichtaufbau von Diode und Thyristor (30fach überhöhte schematische Darstellung)

dem Molybdän der Gleichrichtertafel und dem Kupfer des Fassungsbodens zerstören können. Erst der bei Siemens entwickelte und seitdem in der ganzen Welt verwendete Gleitkontakt brachte den Durchbruch zum praktischen Einsatz der Silizium-Leistungsgleichrichter.

Die extreme Belastbarkeit dieser Gleichrichter bis zu Leistungen von einigen hundert Kilowatt hat wesentlich dazu beigetragen, Silizium zum bedeutendsten Werkstoff auch der Leistungselektronik zu machen.

Thyristoren

Der Thyristor ist das wichtigste Halbleiterbauelement in der Starkstromtechnik. Im Gegensatz zur Diode sperrt er den Strom zunächst in beiden Richtungen, bis er nach einem Steuerimpuls an einer Steuerelektrode in einer Richtung durchlässig wird und es so lange bleibt, bis kein Strom mehr fließt oder die Stromrichtung wechselt; dann sperrt er wieder beide Richtungen, bis er durch einen erneuten Steuerimpuls »gezündet« wird.

Thyristoren (Bild 5) haben einen Vierschichtaufbau (pnpn). Bei der Fertigung ist neben den von der Diode her bekannten Schritten noch ein fotolithografisches Verfahren zur Erzeugung der oberen Elektrode und der Steuerelektrode notwendig, die sogenannte Planartechnik (Bild 9), die, verfeinert und perfektioniert, vor allem zur Fertigung der integrierten Schaltkreise dient.

Integrierte Schaltungen

Die ausgezeichneten Eigenschaften der Siliziumoxidhaut sind – daran hatte zu Anfang niemand gedacht – die ent-

Die ersten Jahre der Siliziumentwicklung

Die moderne Halbleitertechnik begann mit dem Transistor, der 1948 von Bardeen, Brattain und Shockley zunächst auf Germaniumbasis realisiert wurde und dessen Hauptanwendungsgebiet die Nachrichten- und Datentechnik ist. Für die Leistungselektronik stellte Siemens 1956 den Siliziumgleichrichter vor und berichtete gleichzeitig über ein Verfahren zur Herstellung von Silizium in Halbleiterqualität. Den vollen Durchbruch der Halbleitertechnik in der Leistungselektronik brachten dann 1958 Moll, Tanenbaum, Goldey und Holonyak mit der Erfindung des gesteuerten Gleichrichters, für den sich die Bezeichnung Thyristor eingebürgert hat.

Kommerzielles Silizium, wie es z. B. für die Legierung von Stahl benutzt wird, ist für die Herstellung von Bauelementen nicht geeignet. Man braucht dafür vielmehr höchstreines Silizium mit möglichst perfektem Kristallgitter, also Silizium in Halbleiterqualität.

Zur Gewinnung solchen »Halbleitersiliziums« begann man bei Siemens 1952 mit dem bei E. I. du Pont de Nemours & Co. seit 1949 entwickelten Verfahren: die chemische Reduktion von Siliziumtetrachlorid durch Zink.

Dieses Verfahren lieferte zwar beachtliche Reinheit, das Material fiel aber in feinen Nadelkristallen an. Um sich aber nicht vorzeitig festzulegen, erprobte man in Zusammenarbeit mit Wiberg und Amberger von der Universität München das Verfahren der Zersetzung von Siliziumchloroform in einer Wasserstoffglimmentladung. Dabei erhielt man kompakte Siliziumstäbchen mit für damalige Begriffe außergewöhnlicher Reinheit.

1954 erkannte Bischof, daß die elektrische Gasentladung als solche bei diesem Verfahren unwesentlich war und lediglich die Heizenergie für die glühenden Graphitelektroden lieferte. Entsprechend dieser Erkenntnis schickte er durch dünne Siliziumstäbe einen elektrischen Strom und heizte diese Dünnstäbe durch Joulesche Wärmeentwicklung auf. An der glühenden Staboberfläche setzte sich weiteres Silizium an. Dieses Verfahren wurde in den folgenden Jahren von Reuschel und Schink immer mehr vervollkommen (Bild 2).

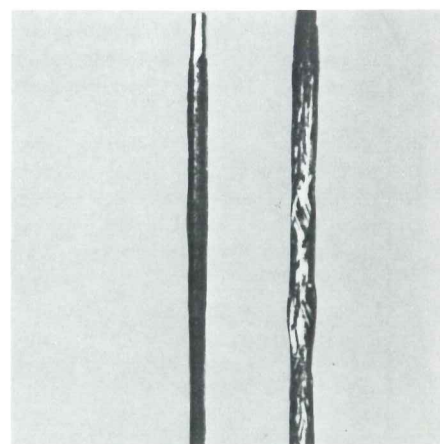
Die entstandenen etwa 1 cm dicken polykristallinen Stäbe hätte man gern durch das von dem Amerikaner Pfann entwickelte Zonenziehen gereinigt. Die Übertragung dieses Verfahrens auf Silizium schien zunächst aussichtslos. Ge-

schmolzenes Silizium (1415°C) reagiert außerordentlich heftig mit allen möglichen Gefäßwänden, und das einzige trotzdem in Betracht kommende Material, nämlich Quarz, wird bei der Temperatur des geschmolzenen Siliziums weich. Für das Zonenziehen von Silizium standen also keine geeigneten »Schiffchen« zur Verfügung. Schließlich half eine bei Siemens insbesondere von Emeis (und unabhängig davon an verschiedenen anderen Stellen der Welt) gemachte Erfindung weiter: das tiegellose Zonenziehen (Bilder 3 und 6). Hierbei wird die geschmolzene Zone durch einen vertikal stehenden Stab gezogen und allein durch die Oberflächenspannung und die elektrodynamischen Kräfte der zum Schmelzen verwendeten Hochfrequenz getragen.

Als wesentliche Modifikation des Zonenziehens wurde das Dünnziehen (Bild 4) entwickelt. Dabei wird aus der Schmelzkuppe eines etwa 20 mm dicken »Vorratsstabes« ein rund 5 mm dicker »Dünnstab« relativ schnell gezogen. Dieses Material liefert die für den Bischofschen Abscheidungsprozeß benötigten dünnen Stäbe.

Die Überführung des chemisch und physikalisch gesäuberten polykristallinen Materials in den einkristallinen Zustand ist nur gedanklich vom Säubern durch das Zonenziehen zu trennen: Bei jedem Zonenzug werden die polykristallinen Stäbe sowieso immer grobkörniger. Wird nun – nach Keller – an den Anfang des Stabes ein dünner Einkristall plaziert, an den das polykristalline Material angeschmolzen wird, so wächst von diesem »Impfling« aus das Material beim nächsten Zonenzug un-

Bild 6 Die ersten bei Siemens von Emeis hergestellten Silizium-Einkristalle hatten bei etwa 13 cm Länge einen Durchmesser von 5 mm



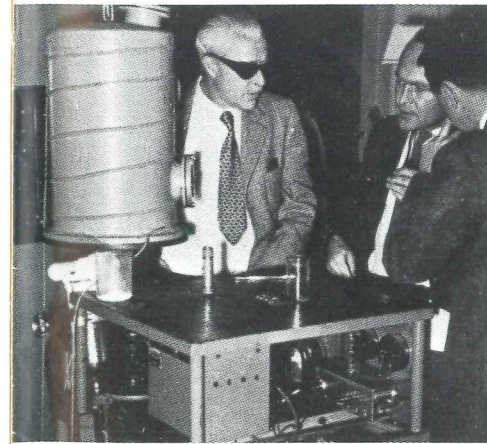
ter entsprechender Versuchsführung einkristallin weiter. Keller und Ziegler haben dieses Verfahren später noch verbessert, indem sie in den ohnehin schon dünnen Impfling einen Flaschenhals einbauten. Wie Bild 8 zeigt, gelingt es dadurch, die schon aus der Metallphysik bekannten Kristallversetzungen während des Wanderns der Glühzone zum Verschwinden zu bringen.

All dies klingt in der Kürze einfach, war es aber vor 25 Jahren keinesfalls; z. B. besteht auch heute noch bei jedem neuen Verarbeitungsschritt die Gefahr, daß statt der gewünschten Verbesserung Verunreinigungen eingeschleppt werden.

Es mußte eine eigene, neuartige Analytik aufgebaut werden, um Antwort auf derartige Fragen zu bekommen. Oftmals reichten diese Verfahren nicht hin, um die zur Debatte stehenden kleinen Konzentrationen zu erfassen; dann blieb nur noch die Messung der physikalischen Eigenschaften selbst. Einen Überblick darüber gibt der Beitrag »Eigenschaften von hochreinem Silizium« von Heywang und Zerbst in der Siemens-Zeitschrift 31 (1957), Heft 2.

Die modernen Leistungsbaulemente werden aus schwach n-dotiertem Ausgangsmaterial gefertigt. Die Größe dieser n-Dotierung beeinflusst die Sperrfähigkeit der Bauelemente entscheidend und muß daher möglichst exakt getroffen werden. Es wurde dazu eine ganze Reihe von Methoden entwickelt, die aber alle nur Dotierungsverteilungen lieferten, die streifenförmig über den Querschnitt inhomogen waren. Diese Inhomogenitäten führten

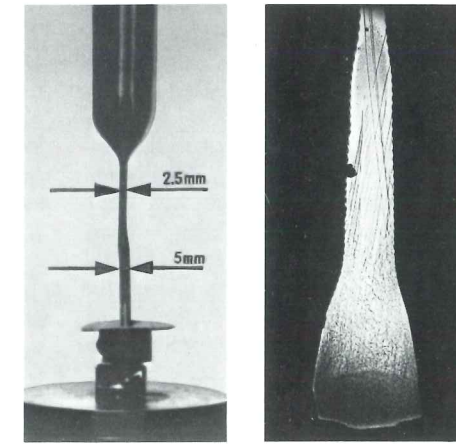
Bild 7 Auf der Rückreise von Stockholm, wo er den Nobelpreis für die Entdeckung des Transistoreffekts erhielt, besucht Brattain das Siemens-Halbleiterlabor in Pretzfeld



zu örtlichen durchbruchartigen Sperrstromerhöhungen. Bei der Dimensionierung der Bauelemente mußte darauf Rücksicht genommen werden, was die Leistung der Bauelemente minderte. Dieses Problem wurde dadurch bewältigt, daß man den dotierenden Phosphor nicht von außen in den Siliziumkristall hineinbringt, sondern erst im Siliziumkristall durch Kernumwandlung erzeugt. Die nötigen Kernumwandlungen werden durch Bestrahlung mit thermischen Neutronen ausgelöst. Diese Methode gab bei Siemens M. Schnöller an – unabhängig von einer ganzen Reihe von Vorgängern – und entwickelte sie in Zusammenarbeit mit P. Voß zur technischen Reife.

Siliziumkristalle sind kein Selbstzweck. Das eigentliche Ziel waren neuartige Bauelemente, und zwar zunächst einmal – wenigstens in den fünfziger Jahren – Leistungsbaulemente. Ihre Entwicklung erfolgte mehr oder weniger parallel zur Materialentwicklung. Am Anfang stand als einfachstes Bauelement der Siliziumgleichrichter. Schon 1956 konnten auf der Halbleiterkonferenz in Garmisch-Partenkirchen die ersten reproduzierbaren Siliziumgleichrichter für 1000 V und 200 A vorgestellt werden. Das sind gegenüber den heutigen Daten (5000 V und 1000 A) natürlich nur bescheidene Werte. Gegenüber den Selengleichrichtern mit 20 bis 30 V und 80 A, die damals die technischen Anwendungen noch vollständig beherrschten, war das aber ein sensationeller Fortschritt, der ein entsprechendes Echo fand und den endgültigen Durchbruch für Silizium als Halbleitermaterial brachte.

Bild 8 Der Einbau eines »Flaschenhalses« in den dünnen »Impfling« (links) bringt Versetzungen beim Durchlauf der Schmelzzone zum Verschwinden (rechts)



scheidende Basis für die gesamte Mikroelektronik geworden; denn die Planartechnik (Bild 9) wurde in den letzten Jahren über den Ausbau der Fotolack- und der Ätztechnik in nahezu unvorstellbarer Weise verfeinert, so daß heute in der Fertigung Strukturen bis herab zur Feinheit von 2 µm beherrscht werden. Die dabei verwendeten Masken können makroskopisch entworfen und gezeichnet und anschließend optisch zu mikroskopischen Dimensionen verkleinert werden. Das heißt, auf solchen Chips können bereits heute integrierte Bausteine aufgebaut werden, die bis zu einer Million einzelne Bauelemente enthalten. Und diese Entwicklung ist noch keinesfalls zu Ende, denn ein Vordringen auf Strukturfeinheiten unter 1 µm ist im Labor bereits möglich. Dazu werden neue Techniken, wie Elektronen- oder Ionenstrahlenschreiben und Röntgenlithografie, mit einbezogen.

Die Großintegration hat, abgesehen von den schon erwähnten Gesichtspunkten des geringen Raumbedarfs und der großen Schnelligkeit der Schaltungen, noch einen weiteren ganz wichtigen Aspekt, nämlich den der Zuverlässigkeit. Es ist undenkbar, daß man mit wirtschaftlichem Aufwand und mit vernünftiger Ausbeute Schaltungen in Massenfertigung herstellen könnte, von denen jede einzelne durch das Zusammenlöten von 1000000 diskreten Transistoren entsteht.

Die Oxidhaut ermöglichte schließlich auch die Entwicklung der MOS-Technik (MOS: Metall-Oxid-Silizium). Heute stellen MOS-Halbleiterbauelemente etwa 50% aller Halbleiterbauelemente. Diese Technik war in den sechziger Jahren möglich geworden, weil man es dann lernte, die Oxidhaut so weit zu beherrschen, daß man sie in den elektronisch aktiven Teil der Bauelemente einbeziehen konnte.

Wichtig bei solchen integrierten Bausteinen ist aber nicht nur die beschriebene feine Lateralkonstruktion von z. Z. bis zu 2 µm; ebenso wichtig ist, daß durch Wiederholen der oben beschriebenen Verfahrensschritte der Mikrostrukturierung auch komplizierte vertikale Schichtfolgen aufgebaut werden können (Bild 10).

Zwei weitere Verfahren für den Aufbau solcher vertikaler Schichtstrukturen müssen noch erwähnt werden, da sie mit den Materialeigenschaften des Halbleitersiliziums und seiner Herstellungstechnologie eng verknüpft sind: