



19 BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES  
PATENTAMT

12 Patentschrift  
10 DE 43 32 653 C 1

51 Int. Cl.<sup>5</sup>:  
H 01 L 49/00  
H 01 L 21/308  
G 01 L 1/00  
// G01L 9/00, G01P  
15/00

21 Aktenzeichen: P 43 32 653.6-33  
22 Anmeldetag: 24. 9. 93  
43 Offenlegungstag: —  
45 Veröffentlichungstag  
der Patenterteilung: 1. 9. 94

DE 43 32 653 C 1

Innerhalb von 3 Monaten nach Veröffentlichung der Erteilung kann Einspruch erhoben werden

73 Patentinhaber:  
Hahn-Schickard-Gesellschaft für angewandte  
Forschung e.V., 78052 Villingen-Schwenningen, DE

74 Vertreter:  
Buchner, O., Dr.rer.nat., 81245 München; Neunert, P.,  
Dipl.-Ing. Dr.-Ing.; Westphal, K., Dipl.-Ing.;  
Mußgnug, B., Dipl.-Phys. Dr.rer.nat., Pat.-Anwälte,  
78048 Villingen-Schwenningen

72 Erfinder:  
Alavi, Mani, Dipl.-Ing. Dr., 78050  
Villingen-Schwenningen, DE; Fabula, Thomas,  
Dipl.-Phys., 78073 Bad Dürkheim, DE; Schumacher,  
Axel, Dipl.-Phys., 78083 Dauchingen, DE; Wagner,  
Hans-Joachim, Dipl.-Phys., 79098 Freiburg, DE

56 Für die Beurteilung der Patentfähigkeit  
in Betracht gezogene Druckschriften:  
DD 2 72 737 A1  
EP 02 44 086 A2  
PUERS, B. et al.: A New Uniaxial Accelerometer in  
Silicon Based on the Piezjunction Effect. In: IEEE  
Transaction on Electron Devices, Vol. 35. No. 6,  
June 1988, S. 764-770;  
BUSER, R.A. et al.: Silicon Pressure Sensor Based on  
Resonating Element. In: Sensor and Actuator A,  
25-27, 1991, S. 717-722;  
J.Phys.E: Sc.Instrum, Vol. 17, 1984, S. 650-652;

54 Monolithisch integriertes Halbleiterelement, dessen Verwendung sowie Verfahren zur Herstellung eines  
solchen Halbleiterelementes

57 Das monolithisch integrierte Halbleiterelement weist eine  
über einer Membran angeordnete und auf Trägerstegen  
sitzende Balkenstruktur auf. Die Membran, Trägerstege und  
Balkenstruktur sind einstückig aus einem gemeinsamen  
Halbleitersubstrat gebildet und weisen Berandungsflächen  
auf, welche durch unterschiedliche Ätzraten in verschiede-  
nen Kristallorientierungen des Halbleitersubstrates bestimmt  
sind. Hergestellt wird ein solches Halbleiterelement durch  
Aufbringen einer Maskierschicht auf gegenüberliegende  
Oberflächen eines Halbleitersubstrates mit einer vorgegebenen  
Kristallorientierung, anschließender gleichmäßiger flächiger  
Zerstörung bzw. teilweiser Zerstörung der Kristall-  
struktur mit nachfolgendem anisotropem Ätzen bis die  
Balkenstruktur freigeätzt ist und unter dem Balken eine  
Membran mit einer vorgegebenen Dicke verbleibt. Als  
besonders geeignet hat sich ein einkristallines Siliziumsub-  
strat mit einer <110>-Oberflächenkristallorientierung er-  
wiesen. Das erfindungsgemäße monolithisch integrierte  
Halbleiterelement ist insbesondere zur Verwendung als  
Sensor bzw. elektromechanischer Wandler geeignet.

DE 43 32 653 C 1

Die Erfindung betrifft ein monolithisch integriertes Halbleiterelement gemäß den Merkmalen des Oberbegriffs des Anspruchs 1, dessen Verwendung sowie ein Verfahren zur Herstellung eines solchen Halbleiterelementes.

Ein solches monolithisch integriertes Halbleiterelement mit einem über einer Membran angeordneten und auf Trägerstegen sitzenden Balken ist bereits in einem Artikel in *Sensors and Actuators A*, 25—27, 1991, auf den Seiten 717 bis 722 beschrieben worden. Das dort vorgestellte Halbleiterelement ist zum Einsatz als Drucksensor vorgesehen und durch anisotropes Ätzen von zwei zunächst voneinander getrennten Halbleitersubstraten hergestellt. Auf dem ersten Halbleitersubstrat wird durch anisotropes Ätzen eine rechteckförmige Membran mit Seitenlängen von 5 und 2,5 mm Länge und einer Dicke zwischen 50 und 80  $\mu\text{m}$  hergestellt, wobei auf der Membran zwei voneinander beabstandete Trägerstege durch eine geeignete Maskierungstechnik stehenbleiben. Im zweiten Halbleitersubstrat wird ein von einem Rahmen gehalterter Balken ebenfalls durch anisotropes Ätzen hergestellt. Die beiden Halbleitersubstrate werden dann so miteinander verbunden, daß der Balken des zweiten Halbleitersubstrates auf den Trägerstegen des ersten Halbleitersubstrates zum Liegen kommt und dann in einem Ofen bei 1100°C mit diesem verbunden wird. In einem weiteren Schritt wird der auf den Trägerstegen liegende Balken dann von seinem Rahmen des zweiten Halbleitersubstrates mechanisch abgetrennt.

Auf diese Weise wird eine sog. BOD-(Bridge-On-Diaphragm)-Struktur hergestellt, die sich durch eine hohe Empfindlichkeit gegenüber Verformungen der Membran auszeichnet. Die Druckempfindlichkeit des Halbleiterelementes wird durch die Dicke der Membran und die Höhe der Trägerstege und der Balkendicke bestimmt, welche nach Art einer Hebelwirkung die Verformung der Membran an den Balken weitergeben. Der auf den Trägerstegen liegende Balken dient dabei als Resonatorelement.

Problematisch bei diesem bekannten Halbleiterelement ist dessen verhältnismäßig komplizierte Herstellung, da zwei Halbleiterplättchen zunächst bearbeitet und schließlich ausgerichtet miteinander verbunden werden müssen.

Ein monolithisch integriertes Halbleiterelement, das ebenfalls als Drucksensor zu verwenden ist, allerdings aus einem einzigen Halbleitersubstrat gebildet wird, ist in der EP 0 244 086 A2 sowie der Druckschrift *J. Phys. E: Sc. Instrum.* Volumen 17, 1984, auf den Seiten 650 bis 652 beschrieben. Das dort beschriebene monolithisch integrierte Halbleiterelement weist ebenfalls auf einer Membran angeordnete Trägerstege auf, welche ein parallel zu den Trägerstegen liegendes Resonatorelement über Verbindungsleisten halten. Die gesamte Halbleiterstruktur wird dabei durch Dotieren und anschließendes anisotropes Ätzen hergestellt. Im einzelnen wird die Struktur des Resonators durch Borddiffusion über eine Oxydmaske auf einer Seite des Wafers erzeugt und die Membran durch Borddiffusion auf der anderen Seite des Wafers zur gleichen Zeit hergestellt. Nach der Borddiffusion wird Siliziumnitrid über den gesamten Wafer abgeschieden und Fenster mit Hilfe einer geeigneten Maskierung für den ersten Ätzschritt, in dem die Resonatorstruktur weitgehend unterätzt wird, geöffnet. Das Siliziumnitrid wird dann durch Plasmaätzen entfernt und das

Siliziumätzen in einem zweiten Schritt vervollständigt.

Problematisch bei diesem Herstellungsverfahren des integrierten Halbleiterelementes ist, daß der hergestellte Resonator verhältnismäßig dünn ist und aufgrund der Dotierung der Resonator mechanisch vorgespannt ist. Dies kann dazu führen, daß die Zuordnung von Druck und Resonanzfrequenz nicht mehr eindeutig ist. Darüber hinaus steht durch die dünne Resonatorstruktur lediglich ein eingeschränkter Meßbereich bei der Verwendung des Halbleiterelementes als Drucksensor zur Verfügung. Zudem zeichnet sich der in dieser Form hergestellte Drucksensor durch eine weitgehend nicht lineare Kennlinie infolge der dünnen Resonatorstruktur aus.

Aus *IEEE Transactions on Electron Devices*, Vol. 35, Nr. 6, Juni 1988, S. 764—770, ist ein Beschleunigungssensor in Form eines monolithisch integrierten Siliziumelementes mit einer quadratischen Membran bekannt. Dort ist allerdings von keiner BOD-Struktur die Rede, sondern eine Membran vorgesehen, die selbst von vier jeweils seitlich an der Membran angeordneten Haltestegen an einem Siliziumrahmen gehalten ist.

Aus DD 2 72 737 A1 ist darüber hinaus ein Drucksensor beschrieben, der eine schmale rechteckige Membran aus monokristallinem Silizium aufweist. Die Membran des Drucksensors ist in einen Siliziumrahmen mit erhöhter Steifigkeit eingespannt. Eine über der Membran angeordnete Balkenstruktur zur Erhöhung der Empfindlichkeit des Drucksensors ist nicht beschrieben.

Der vorliegenden Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, ein monolithisch integriertes Halbleiterelement zu schaffen, das die vorgenannten Nachteile nicht aufweist und mit reproduzierbaren Eigenschaften, insbesondere durch eine einfache Herstellungstechnik realisierbar ist.

Diese Aufgabe wird für das monolithisch integrierte Halbleiterelement durch die Merkmale des Anspruchs 1 und für das Herstellungsverfahren durch die Merkmale des Anspruchs 16 gelöst.

Die Verwendung des erfindungsgemäßen monolithisch integrierten Halbleiterelementes ist Gegenstand der Ansprüche 14 und 15.

Weiterbildungen der Erfindung sind Gegenstand der Unteransprüche.

Die Erfindung beruht also im wesentlichen darauf, die Membran, die Trägerstege und die Balkenstruktur für einen Sensor einstückig aus einem gemeinsamen Halbleitersubstrat zu bilden und dabei solche Berandungsf lächen vorzusehen, die durch eine unterschiedliche Ätzrate in verschiedenen Kristallorientierungen des Halbleitersubstrates bestimmt sind.

Ein solches monolithisch integriertes Halbleiterelement wird im wesentlichen durch folgende Verfahrensschritte hergestellt:

- Aufbringung einer Maskierschicht, z. B. einer Oxydschicht, auf gegenüberliegenden Oberflächen eines Halbleitersubstrates, das vorzugsweise ein Siliziumsubstrat ist, mit einer vorgegebenen Oberflächen-Kristallorientierung,
- gleichmäßige flächige Zerstörung oder teilweise Zerstörung der Kristallstruktur des Halbleitersubstrates ausgehend von einer Oberfläche, um nach einem nachfolgenden Ätzvorgang eine sich im Halbleitersubstrat ausbildende Membran mit einer darüber angeordneten und auf Trägerstegen sitzenden Balkenstruktur zu erhalten, und
- anisotropes Ätzen, bis die Balkenstruktur freige-

ätzt ist und unter der Balkenstruktur eine Membran mit einer vorgegebenen Dicke verbleibt.

Es hat sich als besonders vorteilhaft erwiesen, als Halbleitersubstrat hierfür einkristallines Silizium mit einer  $\langle 110 \rangle$ -Kristallorientierung zu verwenden. Die gleichmäßige flächige Zerstörung bzw. teilweise Zerstörung bis zu einer vorgegebenen Tiefe des Halbleitersubstrates erfolgt darüber hinaus in einer bevorzugten Weiterbildung der Erfindung mit einem Laser, d. h. mit Laserstrahlung. Hierbei ist jedoch anzumerken, daß grundsätzlich auch andere Verfahren einsetzbar sind. Zur Zerstörung der Kristallstruktur kann innerhalb des Halbleitersubstrates in den vorgegebenen Bereichen grundsätzlich auch ein Ultraschallbohren, eine Bearbeitung mittels eines geeigneten mechanischen Fräasers oder eine Zerstörung mit hochenergetischen Teilchen vorgesehen werden.

Bei der Verwendung von einkristallinem  $\langle 110 \rangle$ -Silizium als Halbleitersubstrat wird die Oberfläche des Siliziumsubstrates derart zerstört bzw. teilweise zerstört, daß sich nach dem erfolgten Ätzvorgang ein Balken bzw. eine Balkenstruktur innerhalb des Siliziumsubstrates ausbildet, welche längs einer  $[1\bar{1}0]$ -Kristallrichtung angeordnet ist. Die Zerstörung bzw. teilweise Zerstörung der Kristallstruktur des Siliziumsubstrates erfolgt derart, daß die Trägerstege vorzugsweise orthogonal zur Balkenstruktur angeordnet sind.

Das anisotrope Ätzen erfolgt vorzugsweise in einer 30%igen Kaliumhydroxyd-Lösung bei einer Temperatur von annähernd  $60^\circ\text{C}$ .

Um darüber hinaus feststellen zu können, wann die Balkenstruktur beim anisotropen Ätzen freigeätzt ist und somit freitragend über der Membran liegt, wird auf dem Halbleiterwafer ein Testbereich mit einer weiteren Balkenstruktur vorgesehen, die der über der Membran liegenden Balkenstruktur entspricht, allerdings keine Trägerstege aufweist. Sobald beim anisotropen Ätzen diese weitere Balkenstruktur — im einfachsten Fall ein einzelner Balken — herabfällt, ist dies ein Signal für die Beendigung des Ätzvorganges.

Bei hohen Anforderungen an die Strukturauflösung wird vor der Zerstörung bzw. teilweisen Zerstörung der Kristallordnung des Halbleitersubstrates, die zuvor auf dem Halbleitersubstrat aufgebrachte Oxydschicht in vorgegebenen Bereichen zur Definition der Membran, der Trägerstege und des Balkens mit Hilfe eines Lithographieschrittes geöffnet. Darüber hinaus ist es auch möglich, die beim Lithographieschritt unmaskierten Bereiche vor der Zerstörung bzw. teilweisen Zerstörung der Kristallordnung des Halbleitersubstrates anisotrop anzuätzen.

Bei der Verwendung von  $\langle 110 \rangle$ -Silizium als Halbleitersubstrat zum Herstellen eines solchen Halbleiterelementes kann zur Massenproduktion ein  $\langle 110 \rangle$ -Siliziumwafer, der beidseitig poliert ist und eine niedrige Dotierung (ca.  $10\ \Omega\ \text{cm}$ ) aufweist, vorgesehen werden. Die Dicke des Siliziumwafers kann zwischen  $300\ \mu\text{m}$  und  $600\ \mu\text{m}$ , vorzugsweise etwa bei  $380\ \mu\text{m}$  liegen. Danach erfolgt eine thermische Oxydation, so daß eine etwa  $1\ \mu\text{m}$  dicke Maskierschicht auf den beiden Oberflächen des Siliziumwafers aufgebracht wird. Anschließend erfolgt die oben bereits diskutierte Zerstörung bzw. teilweise Zerstörung einer Oberfläche des Siliziumwafers in vorgegebenen Bereichen, wobei ein Lithographieschritt vorgesehen werden kann. Anschließend wird der Siliziumwafer anisotrop geätzt und das Abtragen der Oxydschicht in gepufferter Flußsäure, also in einem

Naßätzprozeß, durchgeführt. Letztlich wird der Siliziumwafer in einzelne Halbleiterelemente geteilt und eine geeignete Kontaktierung aufgebracht.

Es hat sich bei der Verwendung von  $\langle 110 \rangle$ -Silizium als Ausgangssubstrat als besonders günstig erwiesen, die Zerstörung bzw. teilweise Zerstörung der Kristallordnung des Siliziumsubstrates so vorzusehen, daß ein H-förmiger Bereich der Oberfläche des Siliziumsubstrates nicht zerstört wird. Der mittlere Schenkel der H-Struktur ist dabei so auszurichten, daß dieser längs zur  $[1\bar{1}0]$ -Kristallrichtung liegt. Hierdurch wird gewährleistet, daß der Balken beim anisotropen Ätzvorgang so freigeätzt wird, daß seine sich gegenüberliegenden Schenkel jeweils  $\{111\}$ -Berandungsflächen aufweisen. Bei geeigneter Tiefe der Zone gestörter Kristallordnung bildet sich je nach Ätzdauer beim anisotropen Ätzen die Balkenstruktur mit einem Balken aus, der einen trapezförmigen oder dreieckförmigen Querschnitt aufweist, wobei sich  $\{111\}$ -Berandungsflächen einstellen.

Obwohl die Balkenstruktur im einfachsten Fall aus einem einzigen Balken bestehen kann, hat es sich auch als zweckmäßig erwiesen, für eine Momentenkompensation mehrere Balken parallel zueinander anzuordnen. Als günstig hat sich hierbei eine Balkenstruktur mit drei oder vier parallel zueinander angeordneten Balken herausgestellt.

Darüber hinaus ist es zweckmäßig, zur Reduzierung der Luftdämpfung das Halbleiterelement mit einer Verkapselungseinrichtung zu versehen. Das Innere der Verkapselungseinrichtung wird hierfür zweckmäßigerweise evakuiert.

Darüber hinaus ist es auch möglich, das Resonatorelement, d. h. die Balkenstruktur, mit einer zusätzlichen seismischen Masse zu versehen (beispielsweise durch Aufdampfen). Eine solche zusätzliche Masse dient als Basisstruktur für Beschleunigungssensoren.

Zusätzlich ist auf den Trägerstegen eine Leitungsführung aufgebracht, so daß eine leitende Verbindung zur Balkenstruktur möglich ist.

Die wesentlichen Vorteile des erfindungsgemäßen Halbleiterelementes bzw. dessen Herstellungsverfahrens sind folgende:

- das Herstellungsverfahren benötigt keine zusätzlichen Dotierungsschritte oder Epitaxieschritte, um Ätzstoppschichten herzustellen,
- das Halbleitersubstrat braucht nur von einer Oberfläche her bearbeitet zu werden,
- es sind im Vergleich zum Stand der Technik dickere Balkenstrukturen realisierbar, wodurch eine höhere mechanische Belastbarkeit des Halbleiterelementes erreicht wird,
- eine dreieckige bzw. trapezförmige Querschnittsform der Balkenstruktur sorgt für eine hohe Meßempfindlichkeit,
- bei der Bearbeitung mit Laserstrahlung zur flächigen Zerstörung bzw. teilweisen Zerstörung der Kristallstruktur bestehen große Variationsmöglichkeiten bei der Auswahl der Geometrie der zu zerstörenden Bereiche. Im Vergleich zu mechanischen Bearbeitungsverfahren, wie z. B. Schleifen, Sägen o. ä., zeichnen sich die bearbeiteten Halbleitersubstrate durch eine höhere Bruchsicherheit aus,
- beim Einsatz des Halbleiterelementes als Drucksensor ergibt sich ein weiter Meßbereich mit einer nahezu linearen Kennlinie.

Das erfindungsgemäße monolithisch integrierte Halbleiterelement ist als Basisstruktur für zahlreiche mikromechanische Sensoren und Aktoren verwendbar. Als Wandlerprinzipien können z. B. eingesetzt werden: elektrothermisch, elektrostatisch, elektromagnetisch, resistiv, piezoresistiv, magnetostruktiv, elektroakustisch, piezoelektrisch zur Realisierung von Sensoren und Aktoren mit analogem und frequenzanalogem Funktionsprinzip.

Das erfindungsgemäße Halbleiterelement eignet sich insbesondere als Drucksensor, Kraftsensor, Beschleunigungssensor sowie als taktile Sensor mit analogem oder frequenzanalogem Ausgangssignal. Darüber hinaus kann das erfindungsgemäße Halbleiterelement für die Realisierung von Aktorbauerelementen, wie Schalter, Ventile, Klappenanzeigen, Antriebe usw. eingesetzt werden.

Die Erfindung wird im folgenden anhand von Ausführungsbeispielen im Zusammenhang mit der Erläuterung der einzelnen Herstellungsschritte beschrieben. Es zeigt

Fig. 1 eine prinzipielle Darstellung eines erfindungsgemäßen monolithisch integrierten Halbleiterelementes,

Fig. 2 ein Beispiel für eine mögliche Prozeßabfolge zur Herstellung eines erfindungsgemäßen monolithisch integrierten Halbleiterelementes, dargestellt anhand der einzelnen Prozeßschritte,

Fig. 3 eine Schnittansicht eines durch die in Fig. 2 dargestellte Prozeßabfolge hergestellten Halbleiterelementes,

Fig. 4 eine Darstellung ähnlich zu Fig. 1 mit einer Balkenstruktur, die mehrere zueinander parallel liegende Balken aufweist,

Fig. 5 ein Ausführungsbeispiel mit Balkenstruktur, Schichtaufbau und Leitungsführung und

Fig. 6 die Darstellung eines erfindungsgemäßen Halbleiterelementes mit Verkapselungseinrichtung.

In Fig. 1 ist eine Prinzipdarstellung des erfindungsgemäßen monolithisch integrierten Halbleiterelementes dargestellt. Das Halbleiterelement weist eine über einer Membran 5 angeordnete und auf zwei Trägerstegen 15, 16 sitzende Balkenstruktur 10 auf. Die Balkenstruktur 10 besteht in der Darstellung von Fig. 1 aus einem einzigen Balken. Die Membran 5, die Trägerstege 15, 16 und der Balken 10 sind aus einem gemeinsamen Halbleitersubstrat 1, das beispielsweise einkristallines Silizium sein kann, gebildet und damit einstückig aneinandergeformt. Die Membran 5, die Trägerstege 15, 16 und die Balkenstruktur 10 weisen Berandungsflächen 20, 21 auf, die durch unterschiedliche Ätzraten in verschiedenen Kristallorientierungen des Halbleitersubstrates 1 bestimmt sind. Diese besonders ausgebildeten Berandungsflächen 20, 21 sind in der Darstellung von Fig. 1 der Einfachheit halber nicht maßstabsgetreu dargestellt. Es ist jedoch deutlich zu erkennen, daß die Querschnitte der Trägerstege 15, 16 einen mittleren Abschnitt mit parallel zueinander liegenden Berandungsflächen 20 aufweisen, an denen sich nach oben und unten verbreiternde Wandungen anschließen. Im Zusammenhang mit den nachfolgenden Fig. 2 und 3 und der dazugehörigen Erläuterung wird die Ausbildung dieser Berandungsflächen 20, 21 deutlich.

Obwohl prinzipiell jedes Halbleitermaterial, wie z. B. GaAs, zur Herstellung eines erfindungsgemäßen monolithisch integrierten Halbleiterelementes geeignet ist, wird die Erfindung im folgenden anhand eines einkristallinen Siliziumsubstrates erläutert, das im Sinne der Millerschen Indizes eine (110)-Kristallorientierung an

seiner Oberfläche aufweist. Die Balkenstruktur 10 ist dabei längs der  $[1\bar{1}0]$ -Richtung angeordnet. In diesem speziellen Ausführungsbeispiel stehen die beiden Trägerstege 15, 16 orthogonal zur Ausrichtung der Balkenstruktur 10, also in  $[001]$ -Richtung. Die Balkenstruktur 10 sitzt dabei mit ihren beiden Enden 11, 12 jeweils auf einem der beiden Trägerstege 15, 16 auf.

In Fig. 2 ist eine mögliche Prozeßabfolge zur Herstellung des erfindungsgemäßen monolithisch integrierten Halbleiterelementes am Beispiel eines einkristallinen Siliziumsubstrates und anschließender Laserbearbeitung sowie anisotropem Ätzen beschrieben. Die einzelnen Prozeßschritte a)–e) sind in der Darstellung von Fig. 2 anhand einer Schnittdarstellung sowie der Draufsicht auf das zu bearbeitende Siliziumsubstrat 1 gezeigt. Zusätzlich sind in Fig. 2 noch die dazugehörigen Kristallrichtungen anhand der Millerschen Indizes aufgeführt.

Als Ausgangssubstrat dient ein (110)-Siliziumwafer, der beidseitig poliert ist, eine niedrige Dotierung (Leitfähigkeit ca. 10 Ohm cm) sowie eine Dicke von etwa 380  $\mu\text{m}$  aufweist. Das Halbleitersubstrat ist in Fig. 2 wieder mit dem Bezugszeichen 1 gekennzeichnet. In einem ersten Verfahrensschritt – vgl. a) – wird auf die beiden Oberflächen 2, 3 des Halbleitersubstrates 1 eine Maskierschicht 41 bzw. 42, z. B. eine Oxydschicht mittels thermischer Oxydation, aufgebracht. Die Dicke der beiden Oxydschichten 41, 42 beträgt jeweils etwa 1  $\mu\text{m}$ .

In einem nächsten Schritt b) wird die obere Oxydschicht 41 in vorgegebenen Bereichen 44 wieder entfernt. Dies wird durch an sich bekannte Lithographieprozesse erreicht. Die Oxydschicht wird an denjenigen Bereichen geöffnet, an denen anschließend die Kristallstruktur des Halbleitersubstrates 1 zerstört bzw. teilweise zerstört werden soll, um nach einem anisotropen Ätzvorgang eine sich im Halbleitersubstrat ausbildende Membran mit darüber angeordneter und eine auf Trägerstegen 15, 16 sitzende Balkenstruktur 10 zu erhalten. Im Ausführungsbeispiel von Fig. 2 und dem dort verwendeten (110)-Siliziumsubstrat wird die Oxydschicht 41 so geöffnet, daß ein H-förmiger Bereich auf der Oberfläche 2 des Siliziumsubstrates weiterhin mit der Maskierschicht bzw. Oxydschicht abgedeckt ist. Der mittlere Schenkel der H-Struktur ist so auszurichten, daß dieser längs zur  $[1\bar{1}0]$ -Kristallrichtung liegt. Das eben beschriebene Öffnen der Oxydschicht 41 wird aus der Draufsicht auf das Halbleitersubstrat 1 in Fig. 2, Schritt b), deutlich.

Im nächsten Schritt c) wird der von der Oxydschicht 41 freigelegte unmaskierte Bereich 44 einer gleichmäßigen flächigen Zerstörung bzw. teilweisen Zerstörung der Kristallordnung unterzogen. Hierfür kann beispielsweise mittels einer Laserbearbeitung die Kristallstruktur bis zu einer definierten Tiefe von etwa 150 bis 200  $\mu\text{m}$  gezielt beeinträchtigt werden. Zur Laserbestrahlung dieses unmaskierten Bereiches 44 kann beispielsweise ein Nd:YAG-Laser eingesetzt werden. Um eine Zerstörung der Kristallordnung unterhalb des unmaskierten Bereiches 44 bis zu einer vorgegebenen Tiefe zu erreichen, ist die Leistungsdichte des Laserstrahls entsprechend einzustellen. Wesentlich ist hierbei, daß die Kristallordnung bei der Laserbearbeitung unterhalb des unmaskierten Bereiches 44 jeweils gleich tief zerstört wird. Anzustreben ist dabei, daß der Bereich mit einer gestörten Kristallordnung eine ebene, zur unteren Oberfläche des Siliziumsubstrates parallele Fläche aufweist. Der zerstörte Bereich ist in Fig. 2, Schritt c), punktiert dargestellt und mit dem Bezugszeichen 45 versehen.

Durch die Behandlung des unmaskierten Bereichs 44 mit Laserstrahlung entsteht in dem punktierten Bereich 45 eine Zone mit zerstörter Kristallordnung. Diese zerstörten Bereiche 45 werden in einem nächsten Schritt d) anisotrop geätzt. Beim anisotropen Ätzen von Silizium, beispielsweise in 30%igen Kaliumhydroxyd-Lösungen bei 60°C, treten bei Verwendung von geeigneten Maskierschichten, wie z. B. thermischem Siliziumdioxid, Ätzgruben auf, die nach einer gewissen Ätzdauer nur noch von sehr langsam ätzenden {111}-Berandungsflächen begrenzt werden.

Dies wird zur Herstellung des erfindungsgemäßen Halbleiterelementes gezielt ausgenutzt. Das Ergebnis des anisotropen Ätzens ist in Fig. 2, Schritt d), zu erkennen. Der anisotrope Ätzvorgang wird so lange durchgeführt, bis der Balken der Balkenstruktur 10 mit Berandungsflächen 21 freigeätzt ist und damit frei über der Membran 5 des Halbleitersubstrates 1 liegt und von den Trägerstegen 15, 16 gehalten wird.

In einem darauffolgenden Schritt e) werden die beiden Oxydschichten 41, 42 vom Halbleitersubstrat 1 wieder entfernt, beispielsweise durch Abtragen der Oxydschichten 41, 42 in gepuffelter Flußsäure.

Anzumerken ist in diesem Zusammenhang noch, daß das teilweise Entfernen der Oxydschicht 41 mit Hilfe einer geeigneten Maskierung nicht unbedingt vorgesehen werden muß. Dieser Schritt kann nämlich bei geringeren Anforderungen an die Strukturauflösung ersatzlos entfallen. Dann wird beispielsweise mit Laserlicht die Oxydschicht 41 in den vorgegebenen Bereichen gleichzeitig mitstrukturiert bzw. zerstört.

Wesentlich für das so hergestellte erfindungsgemäße monolithisch integrierte Halbleiterelement sind die sich ergebenden Berandungsflächen von Balkenstruktur 10, Membran 5 und Trägerstege 15, 16. Durch das gezielte Ausnutzen von langsam ätzenden {111}-Kristallflächen wird erreicht, daß die Balkenstruktur 10, die Membran 5 und die Trägerstege 15, 16 Berandungsflächen aufweisen, die durch die unterschiedliche Ätzrate in verschiedenen Kristallorientierungen des Halbleitersubstrates bestimmt sind.

Diese Berandungsflächen werden in den Darstellungen der Fig. 2, Schritt e), sowie der Darstellung von Fig. 3 besonders deutlich. Eine Draufsicht auf das fertige Halbleiterelement rechts in Fig. 2, Schritt e), zeigt, daß das Halbleiterelement eine auf der Membran 5 liegende H-förmige erhöhte Mikrostruktur enthält. Anhand der Schnittlinie A-A und B-B und der dazugehörigen Schnittdarstellungen in Fig. 2, Schritt e) sowie Fig. 3 ist die Orientierung der Berandungsflächen des erfindungsgemäßen Halbleiterelementes ersichtlich.

In der linken Darstellung von Fig. 2, Schritt e) weist der Balken der Balkenstruktur 10 eine dreieckförmige Querschnittsgestalt auf, wobei die innerhalb des Halbleitersubstrates 1 liegenden Seitenflächen {111}-Kristallflächen sind. Auf der Membran 5 bildet sich gegenüberliegend zum Balken ein in etwa zum Balken 10 symmetrisch liegender Grat 6 aus, der ebenfalls {111}-Berandungsflächen enthält. Die beim anisotropen Ätzen freigelegten Bereiche weisen ebenfalls zunächst eine {111}-Berandungsfläche auf, die durch aufeinanderfolgende {100}, {111}, {110}-Flächen, den Grat 6 und den nachfolgenden {110}, {111} und {100}-Flächen miteinander in Verbindung sind. Die zur Innenseite des Halbleitersubstrates 1 weisende Oberfläche der Membran 5 weist, bis auf den Grat 6, eine [110]-Orientierung auf. Wie aus der Schnittdarstellung von Fig. 2, Schritt e), deutlich zu erkennen ist, ist zwischen dem Balken der

Balkenstruktur 10 und dem Halbleitersubstrat 1, abgesehen vom Grat 6, eine nahezu achteckförmige Öffnung vorgesehen, die durch die erwähnten Berandungsflächen begrenzt ist.

Die den unterschiedlichen Ätzraten der verschiedenen Kristallorientierungen entsprechenden Berandungsflächen des erfindungsgemäßen Halbleiterelementes sind auch in der Darstellung von Fig. 3 deutlich zu erkennen. Gleiche Bezugszeichen bezeichnen wieder gleiche Teile. Hier sind jetzt deutlich die beiden Trägerstege 15, 16 zu erkennen, zwischen denen die Balkenstruktur 10 angeordnet ist. Aufgrund der gewählten Kristallorientierung ist an den Trägerstegen 15, 16 wieder die Unterschneidung ersichtlich, die durch {100}-Kristallflächen definiert ist. Im übrigen ist auch hier ein oktagonaler Querschnitt der beiden Öffnungen 25, 26 deutlich zu erkennen. Die Berandungsflächen dieser beiden Öffnungen 25, 26 sind ausschließlich durch die Kristallebenen {100} sowie {110} gegeben.

Wesentlich beim erfindungsgemäßen Verfahren ist eine exakte Abstimmung zwischen der gewählten Dicke des Halbleitersubstrates, der Breite des Balkens der Balkenstruktur 10 sowie der Dicke der Membran 5, so daß das ausgewählte Halbleitersubstrat ausschließlich von einer Oberfläche her bearbeitet werden muß.

Um festzustellen, wann die Balkenstruktur 10 beim anisotropen Ätzen freigelegt ist, ist es möglich, auf dem Halbleiterwafer einen Testbereich vorzusehen, auf dem ebenfalls eine freizuätzende weitere Balkenstruktur angeordnet ist, die der Balkenstruktur entspricht, welche zwischen den beiden Trägerstegen 15, 16 vorgesehen wird. Diese weitere Balkenstruktur weist dagegen keine Trägerstege auf. Sobald aufgrund der fehlenden Stützen die Balken dieser Balkenstruktur beim anisotropen Ätzen herabfallen, was ohne weiteres optisch detektierbar ist, wird der Vorgang des anisotropen Ätzens beendet.

Eine weitere Abwandlung des erfindungsgemäßen Verfahrens, das in Fig. 2 vorgestellt wurde, besteht darin, den unmaskierten Bereich vor der Laserbehandlung anisotrop zu ätzen.

In Fig. 4 ist eine Darstellung eines erfindungsgemäßen Halbleiterelementes ähnlich zu Fig. 1 gezeigt. Im Gegensatz zur Darstellung von Fig. 1 weist dieses Halbleiterelement, bei dem der Einfachheit halber die Berandungsflächen der Balkenstruktur 10, der Trägerstege 15, 16 und der Membran nicht maßstäblich gezeigt sind, anstatt eines einzigen Balkens, jetzt drei parallel zueinander angeordnete Balken 10a, 10b und 10c auf. Eine Ausführung mit vier Balken hat sich als zweckmäßig erwiesen, um eine günstige Momentenkompensation zu erreichen. Es sind auch hier die aufgrund der unterschiedlichen Ätzraten in den Kristalloberflächen sich ausbildenden Berandungsflächen deutlich zu erkennen.

In Fig. 5 ist ein möglicher Schichtaufbau der Balkenstruktur 10 für Sensoranwendungen dargestellt. Zur Herstellung einer unteren Elektrode (vgl. Fig. 5 unten) wird auf der Balkenstruktur 10, die niedrig n-dotiert ist, eine hochdotierte p<sup>+</sup>-Siliziumschicht 36 eingebracht. Auf dieser hochdotierten p<sup>+</sup>-Siliziumschicht 36 wird eine piezoelektrische Wandlerschicht, z. B. Zinkoxyd-Schicht 37 (ZnO), aufgebracht und strukturiert. Zusätzlich wird auf diese Schicht 37 als obere Elektrode (vgl. Fig. 5 oben) eine Aluminium-Schicht 38 abgeschieden und ebenfalls strukturiert. Die Aluminium-Schicht 38 ist mit einer Passivierungsschicht 39 abgedeckt. Die beiden Elektroden werden mit Hilfe von Leitungsführungen 35 (z. B. Leiterbahnen) über die Trägerstege 15, 16 hinweg zu entsprechenden Anschlußmetallisierungen auf dem

Halbleitersubstrat 1 geführt und damit elektrisch kontaktiert.

Die Darstellung in Fig. 6 entspricht weitgehend der Darstellung von Fig. 1. Zusätzlich ist hier noch eine Verkapselungseinrichtung 70 angedeutet, innerhalb der das erfindungsgemäße Halbleiterelement angeordnet ist. Eine solche evakuierte Verkapselungseinrichtung 70 dient zur Reduzierung der Luftdämpfung des Halbleiterelementes.

Anzumerken ist weiter, daß das Resonatorelement, d. h. die Balkenstruktur 10, mit einer zusätzlichen seismischen Masse versehen werden kann. Eine solche zusätzliche Masse ist insbesondere bei der Verwendung des erfindungsgemäßen Halbleiterelementes als Beschleunigungssensor vorteilhaft.

Untersuchungen haben gezeigt, daß eine Balkenlänge von etwa 2 mm und eine Balkenbreite von etwa 120 µm sehr gute Sensoreigenschaften aufweist. Die Membran 5 sollte etwa 150 µm dick sein.

#### Bezugszeichenliste

1 Halbleitersubstrat	
2 Oberfläche	
3 Oberfläche	
5 Membran	
6 Grat	
10 Balkenstruktur	
11 ein Ende der Balkenstruktur	
12 anderes Ende der Balkenstruktur	
15 Trägersteg	
16 Trägersteg	
20 Berandungsflächen	
21 Berandungsflächen der Balkenstruktur	
25 Öffnung	
26 Öffnung	
35 Leitungsführung	
36 hochdotierte Halbleiterschicht	
37 Zinkoxyd-Schicht	
38 Aluminium-Schicht	
39 Passivierungs-Schicht	
41 Maskierschicht	
42 Maskierschicht	
44 unmaskierter Bereich	
45 Bereich mit zerstörter Kristallorientierung	
70 Verkapselungseinrichtung	
10a erster Balken	
10b zweiter Balken	
10c dritter Balken	

#### Patentansprüche

1. Monolithisch integriertes Halbleiterelement mit einer über einer Membran angeordneten und auf Trägerstegen sitzenden Balkenstruktur (BOD-Struktur), dadurch gekennzeichnet, daß die Membran (5), die Trägerstege (15, 16) und die Balkenstruktur (10) einstückig aus einem gemeinsamen Halbleitersubstrat (1) gebildet sind und Berandungsflächen (20) aufweisen, die durch unterschiedliche Ätzzraten in verschiedenen Kristallorientierungen des Halbleitersubstrates (1) bestimmt sind.
2. Monolithisch integriertes Halbleiterelement nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß das Halbleitersubstrat (1) ein einkristallines Siliziumsubstrat ist.
3. Monolithisch integriertes Halbleiterelement nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, daß das

einkristalline Siliziumsubstrat eine [110]-Oberflächenkristallorientierung aufweist und die Balkenstruktur (10) längs einer [110]-Richtung angeordnet ist.

4. Monolithisch integriertes Halbleiterelement nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, daß die Trägerstege (15, 16) jeweils orthogonal an einem der beiden Enden (11, 12) der Balkenstruktur (10) angeordnet sind.

5. Monolithisch integriertes Halbleiterelement nach einem der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, daß die Balkenstruktur (10) mindestens einen Balken mit dreieckförmigem Querschnitt aufweist, der mit zwei {111}-Berandungsflächen (21) versehen ist.

6. Monolithisch integriertes Halbleiterelement nach einem der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, daß die Balkenstruktur (10) mindestens einen Balken mit trapezförmigem Querschnitt aufweist, der mit zwei gegenüberliegenden {111}-Berandungsflächen (21) versehen ist.

7. Monolithisch integriertes Halbleiterelement nach einem der Ansprüche 1 bis 6, dadurch gekennzeichnet, daß die Balkenstruktur (10) mindestens einen Balken mit in Längsrichtung veränderlichem Querschnitt aufweist.

8. Monolithisch integriertes Halbleiterelement nach einem der Ansprüche 1 bis 7, dadurch gekennzeichnet, daß auf mindestens einem Balken der Balkenstruktur (10) eine seismische Masse aufgebracht ist.

9. Monolithisch integriertes Halbleiterelement nach einem der Ansprüche 1 bis 8, dadurch gekennzeichnet, daß die Balkenstruktur (10) aus einem Balken besteht.

10. Monolithisch integriertes Halbleiterelement nach einem der Ansprüche 1 bis 8, dadurch gekennzeichnet, daß die Balkenstruktur (10) aus mindestens zwei, vorzugsweise vier, zueinander parallel angeordneten Balken (10a, 10b, 10c) besteht.

11. Monolithisch integriertes Halbleiterelement nach einem der Ansprüche 1 bis 10, dadurch gekennzeichnet, daß die Membran (5), die Trägerstege (15, 16) und die Balkenstruktur (10) innerhalb einer Verkapselungseinrichtung (70) angeordnet sind.

12. Monolithisch integriertes Halbleiterelement nach einem der Ansprüche 1 bis 11, dadurch gekennzeichnet, daß auf der Balkenstruktur ein Schichtaufbau (36, 37, 38, 39) angeordnet ist, der über eine Leitungsführung (35) kontaktiert wird, die über die Trägerstege (15, 16) nach außen geführt sind.

13. Monolithisch integriertes Halbleiterelement nach Anspruch 12, dadurch gekennzeichnet, daß für den Schichtaufbau (36, 37, 38, 39) eine auf der Balkenstruktur (10) versehene hochdotierte Halbleiterschicht (36) und eine darüber angeordnete ZnO- und Al-Schicht (37, 38) und eine Passivierungsschicht (39) vorgesehen sind.

14. Verwendung des monolithisch integrierten Halbleiterelementes nach einem der Ansprüche 1 bis 13 als Sensor, insbesondere für Druck, Kraft und Beschleunigung, sowie als taktile Sensor.

15. Verwendung des monolithisch integrierten Halbleiterelementes nach einem der Ansprüche 1 bis 13 als elektromechanischer Wandler zum Umwandeln von elektrischer Energie in Bewegung der

Balkenstruktur (10) und Membran (5) des Halbleiterelementes.

16. Verfahren zur Herstellung des monolithisch integrierten Halbleiterelementes nach einem der Ansprüche 1 bis 13, gekennzeichnet durch die folgenden Verfahrensschritte:

- Aufbringung einer Maskierschicht (41, 42) auf gegenüberliegende Oberflächen (2, 3) eines Halbleitersubstrates (1), das eine vorgegebene Oberflächenkristallorientierung aufweist,
- gleichmäßige, flächige Zerstörung oder teilweise Zerstörung der Kristallstruktur des Halbleitersubstrates (1) ausgehend von einer der Oberflächen (2, 3), um nach einem erfolgten Ätztvorgang eine sich im Halbleitersubstrat (1) ausbildende Membran (5) mit einer darüber angeordneten und auf Trägerstegen (15, 16) sitzenden Balkenstruktur (10) zu erhalten, und
- anisotropes Ätzen, bis die Balkenstruktur (10) freigeätzt ist und unter der Balkenstruktur (10) eine Membran (5) mit einer vorgegebenen Dicke verbleibt.

17. Verfahren nach Anspruch 16, dadurch gekennzeichnet, daß die gleichmäßige flächige Zerstörung oder teilweise Zerstörung der Kristallstruktur des Halbleitersubstrates (1) mittels Laserstrahlung erfolgt.

18. Verfahren nach Anspruch 16 oder 17, dadurch gekennzeichnet, daß das anisotrope Ätzen in einer Kaliumhydroxydlösung erfolgt.

19. Verfahren nach einem der Ansprüche 16 bis 18, dadurch gekennzeichnet, daß im Halbleitersubstrat (1) ein Testbereich mit einer freizuätzenden weiteren Balkenstruktur vorgesehen ist, welche der Balkenstruktur (10) entspricht, allerdings keine Trägerstege (15, 16) aufweist, und ein Herabfallen der weiteren Balkenstruktur als Signal für die Beendigung des Ätztvorganges herangezogen wird.

20. Verfahren nach einem der Ansprüche 16 bis 19, dadurch gekennzeichnet, daß nach dem Aufbringen der Maskierschicht (41, 42) auf das Halbleitersubstrat (1) und vor dem Zerstörungsschritt eine Strukturierung der Maskierschicht (41) auf der ersten Oberfläche (2) erfolgt und die Kristallordnung des Halbleitersubstrates (1) in den unmaskierten Bereichen (44) zerstört bzw. teilweise zerstört wird.

21. Verfahren nach Anspruch 20, dadurch gekennzeichnet, daß die unmaskierten Bereiche (44) vor dem Zerstörungsschritt anisotrop geätzt werden.

---

Hierzu 6 Seite(n) Zeichnungen

---

- Leerseite -



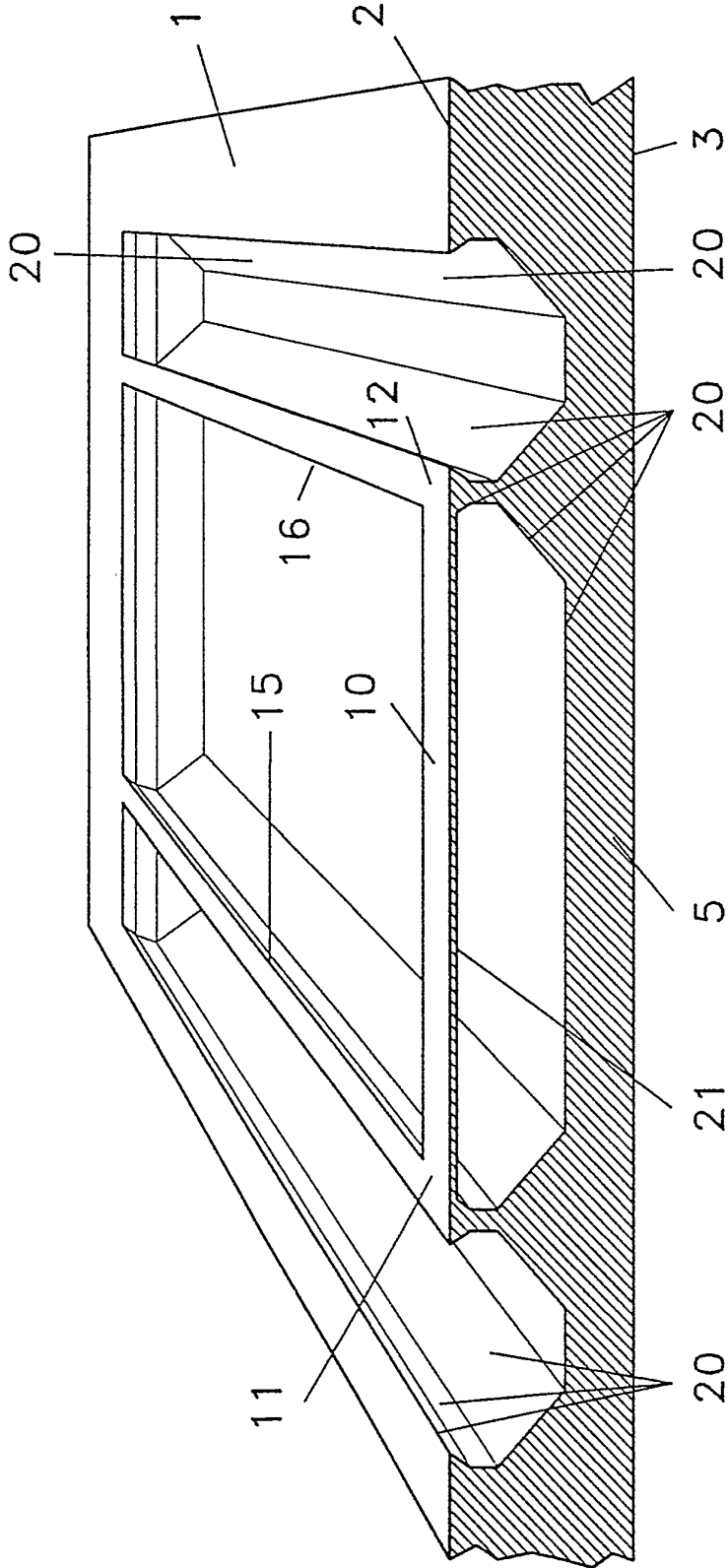


Fig. 1

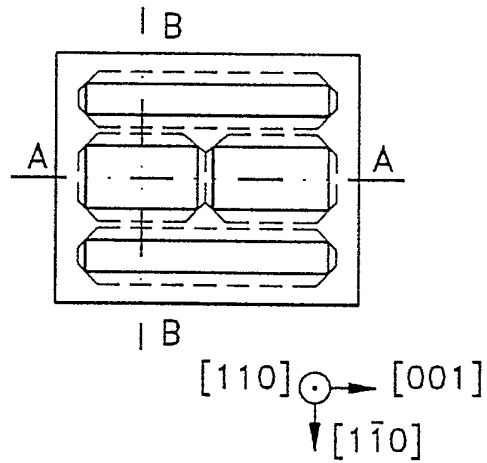
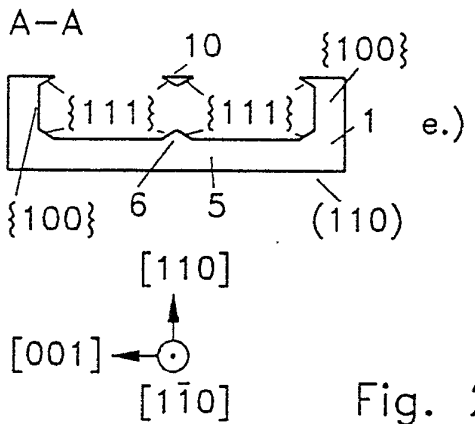
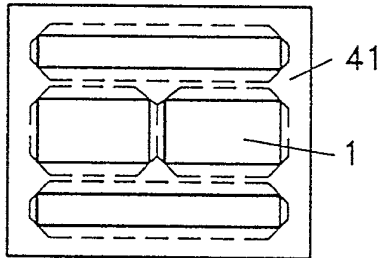
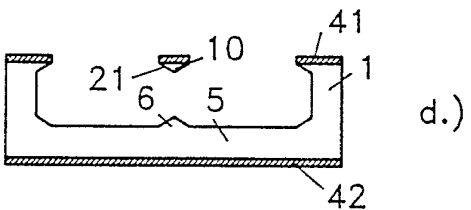
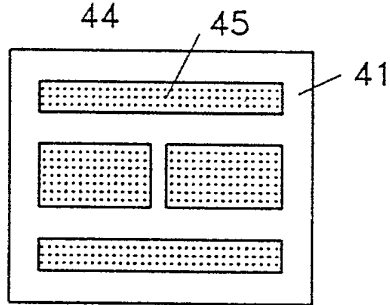
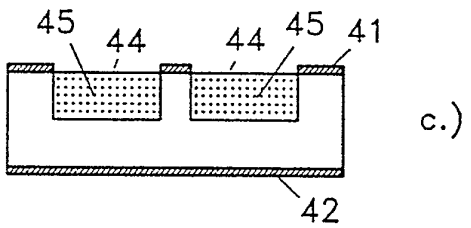
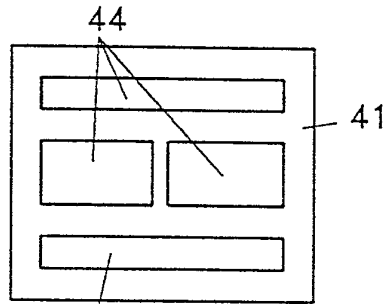
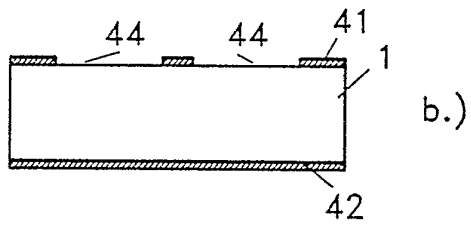
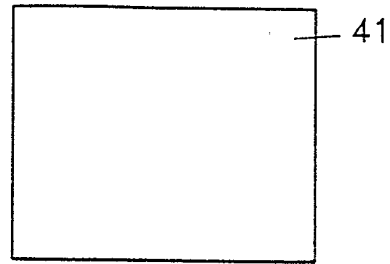
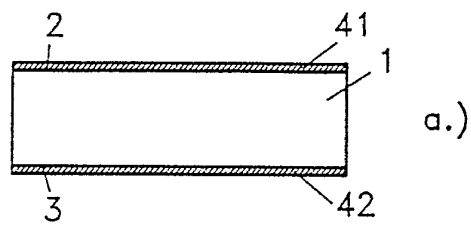


Fig. 2

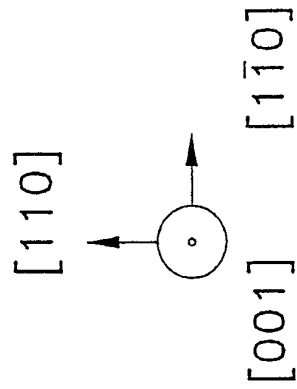
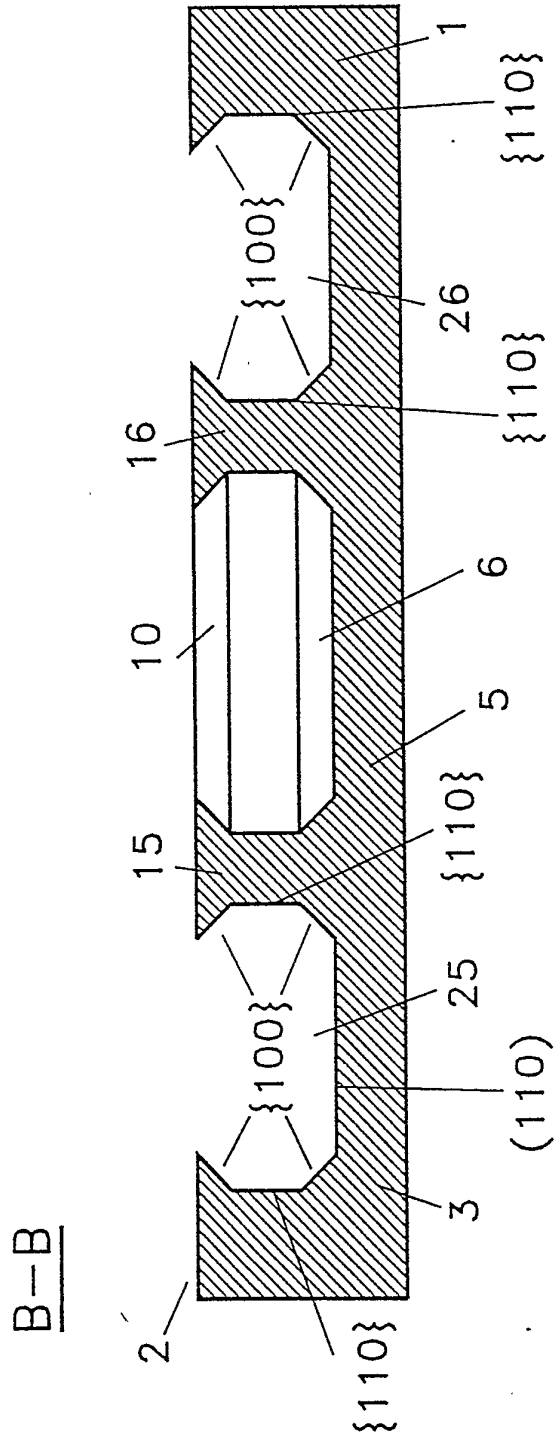


Fig. 3

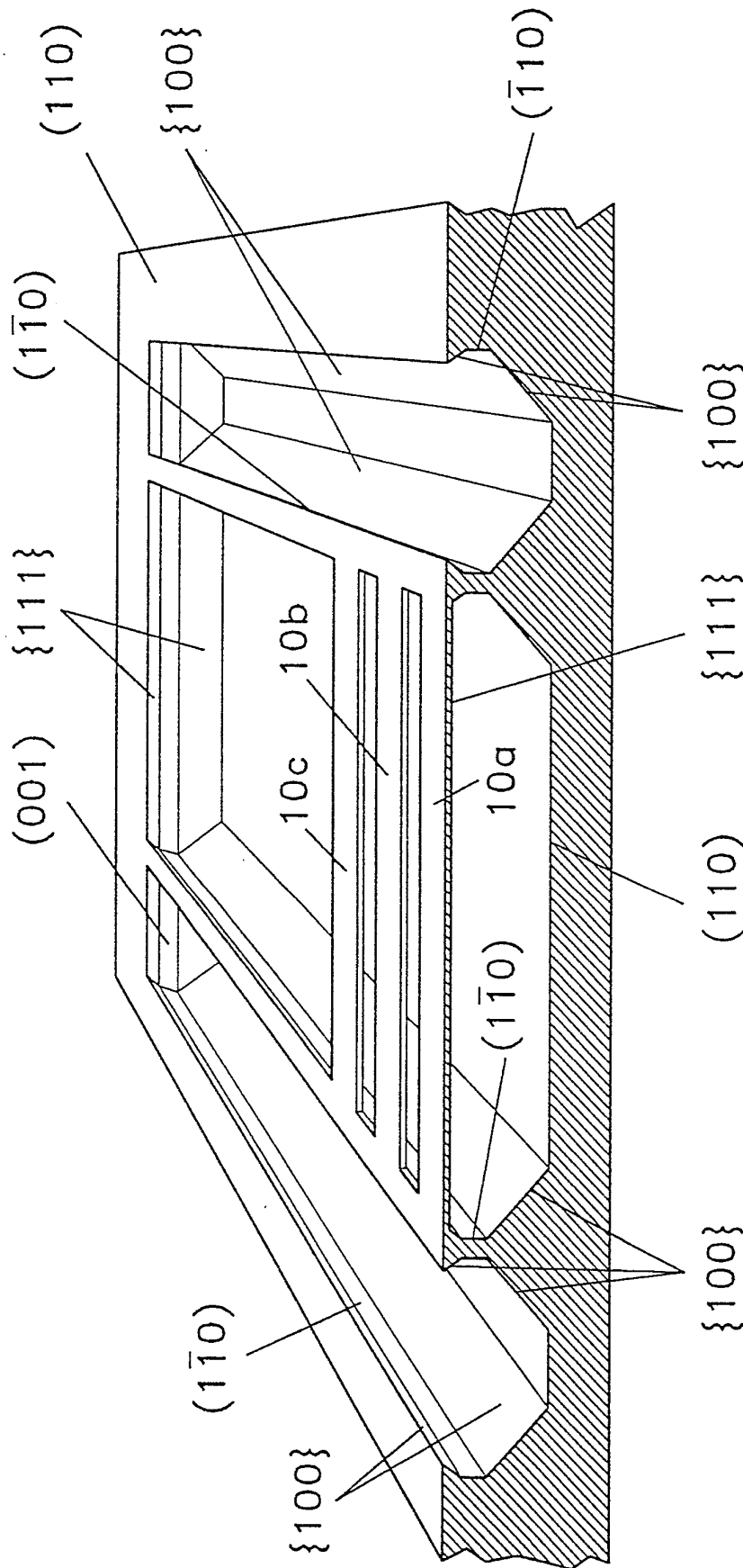


Fig. 4

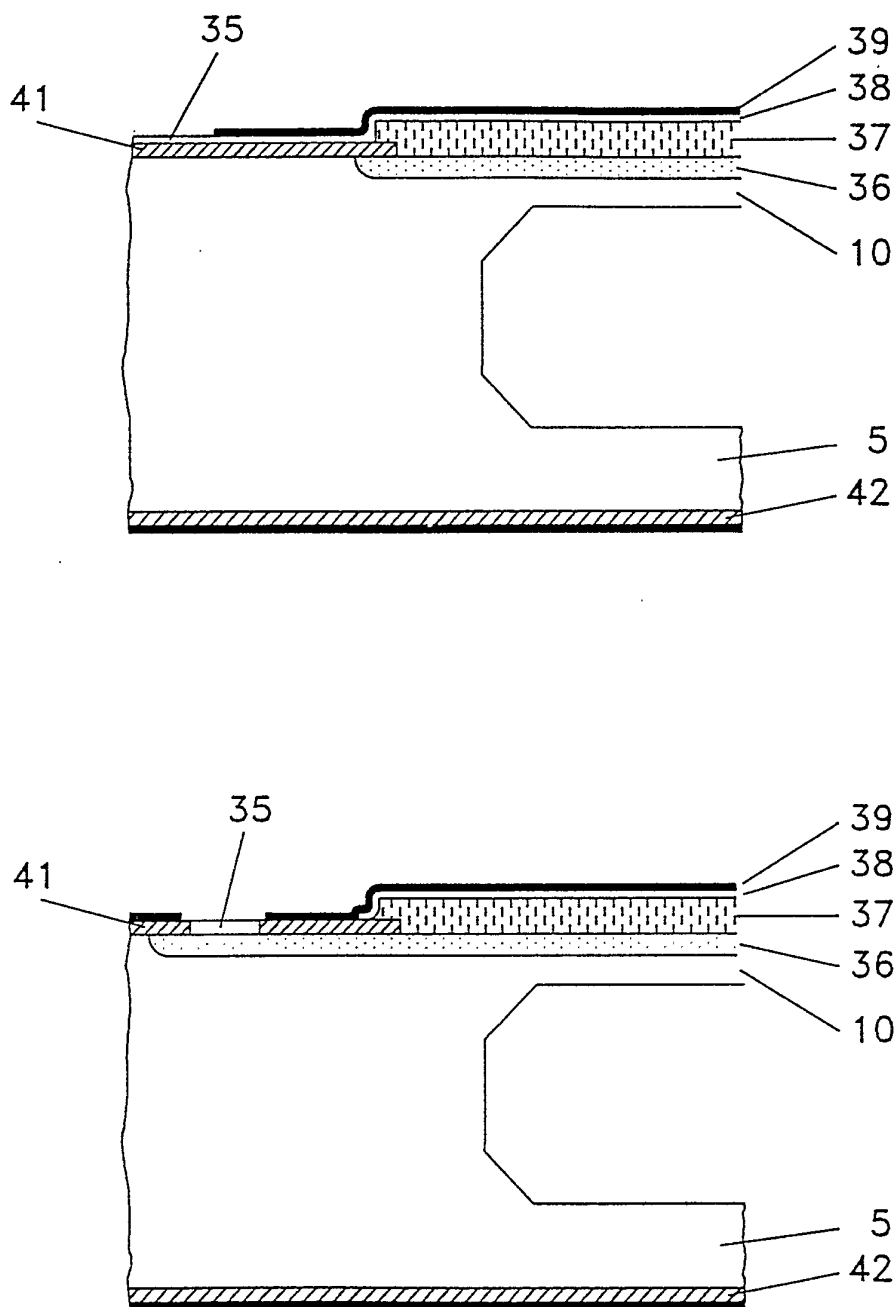


Fig. 5

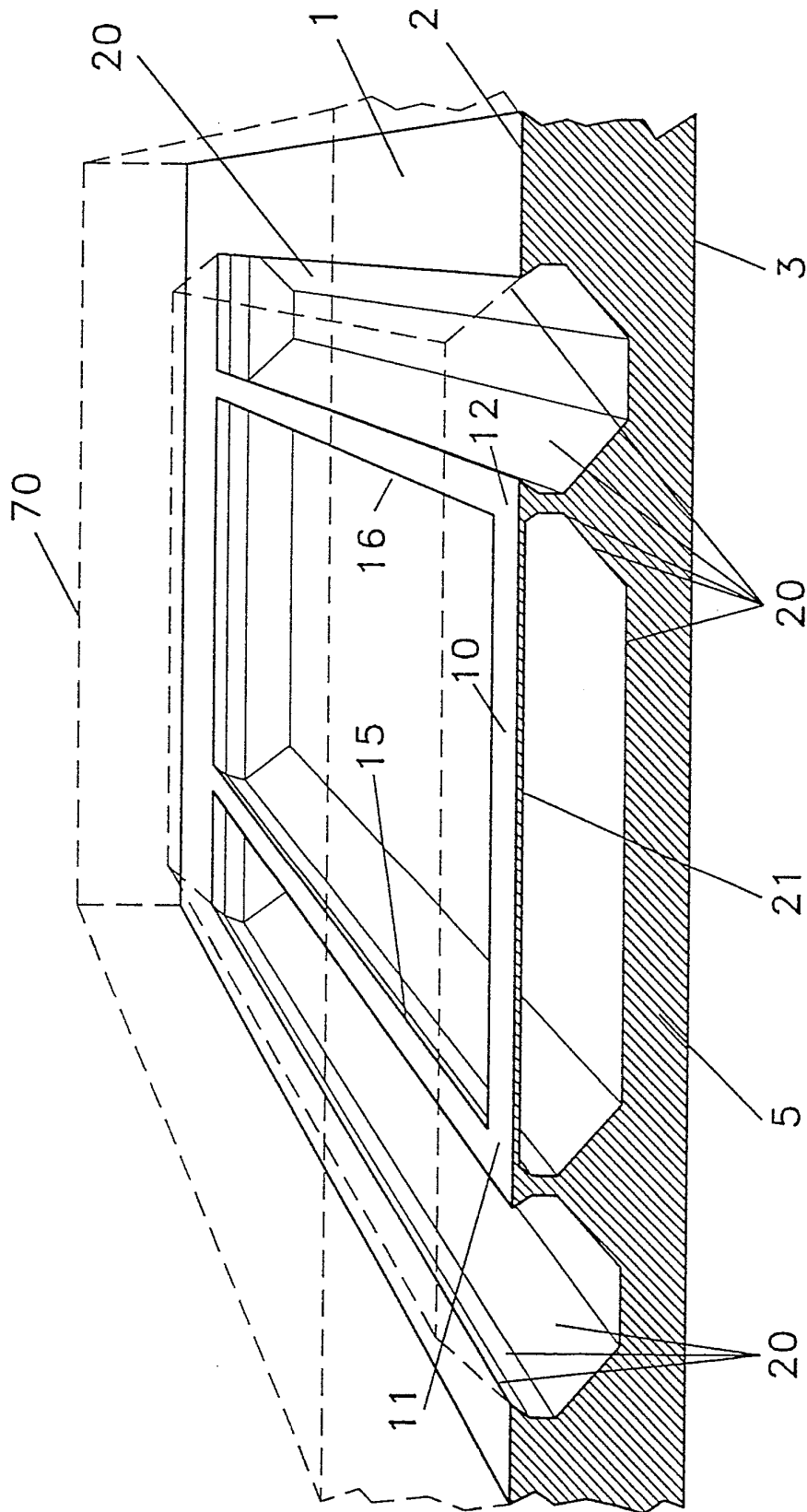


Fig. 6