



(10) **DE 10 2019 117 602 B3** 2020.07.30

(12)

Patentschrift

(21) Aktenzeichen: **10 2019 117 602.6**

(22) Anmeldetag: **28.06.2019**

(43) Offenlegungstag: –

(45) Veröffentlichungstag
der Patenterteilung: **30.07.2020**

(51) Int Cl.: **B81B 1/00 (2006.01)**

B81C 1/00 (2006.01)

G01Q 40/02 (2010.01)

Innerhalb von neun Monaten nach Veröffentlichung der Patenterteilung kann nach § 59 Patentgesetz gegen das Patent Einspruch erhoben werden. Der Einspruch ist schriftlich zu erklären und zu begründen. Innerhalb der Einspruchsfrist ist eine Einspruchsgebühr in Höhe von 200 Euro zu entrichten (§ 6 Patentkostengesetz in Verbindung mit der Anlage zu § 2 Abs. 1 Patentkostengesetz).

(73) Patentinhaber:

**Bundesrepublik Deutschland, vertreten durch das
Bundesministerium für Wirtschaft und Energie,
dieses vertreten durch den Präsidenten der
Physikalisch-Technischen Bundesanstalt, 38116
Braunschweig, DE**

(72) Erfinder:

**Bütefish, Sebastian, Dr., 38229 Salzgitter, DE;
Weimann, Thomas, Dr., 38159 Vechelde, DE;
Ahbe, Thomas, 38176 Wendeburg, DE; Weinert,
Michelle, 38106 Braunschweig, DE; Hinze, Peter,
31180 Giesen, DE**

(74) Vertreter:

**Gramm, Lins & Partner Patent- und
Rechtsanwälte PartGmbB, 38122 Braunschweig,
DE**

(56) Ermittelte Stand der Technik:

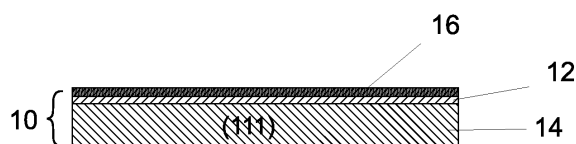
US	2003 / 0 012 925	A1
US	2004 / 0 113 185	A1

(54) Bezeichnung: **Siliziumwaferverbund, Geometrie-Normal und Verfahren zur Herstellung eines Mikrobauteils**

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft ein Siliziumwaferverbund (10) aus

(a) einem (110)-Siliziumwafer (12) und

(b) einem (111)-Siliziumwafer (14), der an den (110)-Siliziumwafer angebondet ist.



Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft ein Geometrie-Normal sowie ein Verfahren zum Herstellen eines Mikrobau-teils.

[0002] Geometrie-Normale werden als Verkörperungen von geometrischen Eigenschaften eines Körpers verwendet. Beispielweise verkörpern Geometrie-Normale Kantenverrundungen oder Stegbreiten in einem optischen Gitter. Beispielsweise werden Geometrie-Normale beim Kalibrieren von Rasterkraftmikroskopen eingesetzt. Um eine möglichst hohe Genauigkeit zu erreichen, sollte das Geometrie-Normal Kanten mit möglichst geringen Kantenradien und bekannten Abmessungen haben. Es ist zudem vorteilhaft, wenn die Flächen, die als Referenzflächen des Geometrie-Normals dienen, eine möglichst geringe Rauheit haben. Diese Ziele sind bei kleinen Geometrie-Normalen nur schwer erreichbar.

[0003] Es ist möglich, Geometrie-Normale auf Basis von sogenannten SOI (silicon on insulator)-Wafers herzustellen. Derartige SOI-Wafer werden dadurch hergestellt, dass auf einem Siliziumwafer eine Oxidschicht erzeugt wird. Dann wird auf diese Oxidschicht ein weiterer Wafer aufgebracht. Wird nun eine Ausnehmung in den so entstandenen Siliziumwaferverbund hineingeätzt, so bilden sich glatte Seitenwände der Ausnehmungen.

[0004] Am Boden der Ausnehmungen bilden sich sogenannte Unterätzungen. Der Grund dafür ist, dass der Materialabtrag in Ätzrichtung über die Ätzfront inhomogen erfolgt. Manche Bereiche der Ätzfront erreichen damit die Oxidschicht früher als andere. Es hat sich herausgestellt, dass das Ätzen noch eine vergleichsweise lange Zeit weiter durchgeführt werden muss, selbst wenn die Ätzfront bereits lokal die Oxidschicht erreicht hat. Da die Ätzfront nur noch lokal weiter fortschreitet, kommt es zu einem Ätzfortschritt in Ätzrichtung, aber auch in seitliche Richtung in die Oxidschicht. Die Kante zwischen den Seitenflächen der Ausnehmung und dem Boden hat daher eine nach außen gewölbte Sicke geometrisch unbestimmter Form. Das ist beispielsweise für die Kalibrierung von Cantilevern für Rasterkraftmikroskope unerwünscht.

[0005] Das Strukturieren von Halbleiterchips auf Siliziumbasis ist eine etablierte Technik, die beispielsweise in der US 2003/012925 A1 und der US 2004/113185 A1 beschrieben ist.

[0006] Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, Nachteile im Stand der Technik zu vermindern.

[0007] Die Erfindung löst das Problem durch ein Geometrie-Normal mit den Merkmalen von Anspruch

1 und ein Geometrie-Normal mit den Merkmalen von Anspruch 6.

[0008] Gemäß einem zweiten Aspekt löst die Erfindung das Problem durch ein Verfahren zum Herstellen eines Mikrobau-teils mit den Merkmalen von Anspruch 7.

[0009] Vorteilhaft an der Erfindung ist, dass eine Ausnehmung herstellbar ist, deren Kante zwischen einer Seitenwand und dem Boden eine geringe Kantenverrundung hat. Der Grund ist, dass der (111)-Siliziumwafer eine Ätzstoppschicht darstellt. Anders als bei der Verwendung eines SOI-Wafers kommt es aber zu keiner Unterätzung, weil die (111)-Ebene sowohl in Ätzrichtung als auch in seitliche Richtung ein Weiterätzen verhindert. Bei einem SOI-Wafer wird auch die Oxidschicht vom Ätzmedium angegriffen, das kann bei Verwendung eines (111)-Siliziumwafers nicht passieren.

[0010] Im Rahmen der vorliegenden Beschreibung wird unter dem Merkmal, dass der (110)-Siliziumwafer an den anderen Siliziumwafer angebondet ist, insbesondere verstanden, dass keine Zwischenschicht zwischen den beiden Wafers existiert.

[0011] Insbesondere werden die beiden Siliziumwafer durch Waferbonden miteinander verbunden, beispielsweise sogenannte direkte Waferbonden. Dazu werden zunächst die miteinander zu verbindenden Oberflächen der jeweiligen Siliziumwafer aktiviert, beispielsweise durch Plasmaätzen oder durch eine Mischung aus Schwefelsäure und Wasserstoffperoxid. Danach werden die Siliziumwafer lokal miteinander in Kontakt gebracht, sodass diese sich verbinden. Die Verbindungsstelle breitet sich über die gesamte Verbindungsfläche zwischen den beiden Wafers aus. In einem nachfolgenden Schritt werden die beiden miteinander vorverbundenen Wafer bei 1000 ± 100 °C fest miteinander verbunden.

[0012] Es ist auch möglich, die beiden Siliziumwafer durch eutektisches Bonden, Glas-Frit-Bonden oder adhäsives Bonden miteinander zu verbinden, wenn zum Ätzen der Ausnehmung ein Medium verwendet wird, das das Material der entsprechenden Zwischenschicht nicht zu ätzen vermag.

[0013] Unter einem Geometrie-Normal wird eine Maßverkörperung für eine geometrische Größe verstanden. Jedes Normal besitzt einen Kalibrierschein, in dem die Eigenschaften der Maßverkörperung beschrieben sind.

[0014] Werden ein (100)-Siliziumwafer und ein (111)-Siliziumwafer, der an den (100)-Siliziumwafer angebondet ist, verwendet bildet sich eine Ausnehmung, deren Seitenfläche nicht senkrecht zum Boden verläuft, was in der Regel weniger erwünscht ist.

[0015] Vorzugsweise hat der (110)-Siliziumwafer eine Dicke von höchstens 300 Nanometer. Geometrie-Normale und andere Strukturen mit einer so geringen Schichtdicke des obersten Siliziumwafers sind besonders empfindlich gegen Unterätzungen. Die Erfindung hat daher in Bezug auf solche Strukturen besonders große Vorteile.

[0016] Der Boden der Ausnehmung eines erfindungsgemäßen Geometrie-Normals hat vorzugsweise eine Rauheit von höchstens 5 Nanometer. Die Rauheit wird durch die Mittenrauheit R_a gemessen.

[0017] Alternativ oder zusätzlich erstreckt sich der Boden der Ausnehmung parallel zu einer Oberfläche des (110)-Siliziumwafers. Es ergibt sich so eine konstante Tiefe der Ausnehmung, was für ein Geometrie-Normal günstig ist.

[0018] Vorzugsweise hat zumindest eine Oberkante zwischen einer Seitenwand der Ausnehmung und einer Oberfläche des (110)-Siliziumwafers einen Kantenradius von höchstens 20 Nanometer, höchstens 10 Nanometer. Erreichbar sind Kantenradien von wenigen Nanometern. Vorzugweise beträgt da der Kantenradius zumindest 0,5 Nanometer. Derartige kleine Kantenradien sind mit dem oben beschriebenen Siliziumwaferverbund durch Ätzen erreichbar.

[0019] Günstig ist es, wenn zumindest eine Unterkante zwischen der Seitenwand der Ausnehmungen und dem Boden der Ausnehmungen einen Kantenradius von höchstens 20 Nanometer, insbesondere höchstens 10 Nanometer, hat. Es ist mit Methoden nach dem Stand der Technik nicht möglich, einen derartig kleinen Kantenradius zu erreichen, da es zu dem oben beschriebenen Effekt des Unterätzens kommt. Durch die erfindungsgemäße Verwendung des Siliziumwaferverbunds zum Herstellen des Geometrie-Normals sind so kleine Kantenradien auch an der Unterkante der Ausnehmungen erreichbar. In der Regel ist der Kantenradius größer als 1 Nanometer.

[0020] Vorzugsweise hat ein Unterkantenbereich der Seitenwand eine Unterätzungstiefe von höchstens 20 Nanometer, insbesondere höchstens 10 Nanometer. Die Unterätzungstiefe ist der Abstand zwischen der Ausgleichsebene durch diese Seitenwand einerseits und dem äußersten Punkt des Unterkantenbereichs andererseits. Der Unterkantenbereich ist der Bereich in einer Umgebung der Unterkante der Ausnehmung, der eine Unterätzung zeigt.

[0021] Das Geometrie-Normal umfasst vorzugsweise eine Mehrzahl an Stegen, die nebeneinander angeordnet sind und von denen zumindest einer eine Stegbreite von höchstens 200 Nanometer hat. Vorzugsweise haben alle Stege die gleiche Stegbreite und/oder Steghöhe. Derartig schmale Stege sind mit Verfahren nach dem Stand der Technik nicht herstell-

bar, da die oben beschriebenen Unterätzungen dazu führen, dass die Struktur kollabiert. Die Verwendung des Siliziumwaferverbunds ermöglicht, wie oben beschrieben, ein zumindest im Wesentlichen unterätzungsfreies Herstellen von Strukturen mit einer sehr kleinen Stegbreite.

[0022] Günstig ist es, wenn ein Steghöhe zumindest eines Stegs höchstens 500 Nanometer, insbesondere höchstens 200 Nanometer, beträgt. Eine derartige Steghöhe führt, insbesondere in Kombination mit einer geringen Stegbreite wie oben beschrieben, zu einer mechanisch anfälligen Struktur, die mit Verfahren aus dem Stand der Technik herstellbar sind.

[0023] Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform bilden die Stege des Geometrie-Normal ein äquidistantes Gitter. Günstig ist es, wenn ein Verhältnis aus Stegbreite zum lichten Abstand zweier benachbarter Stege zwischen 0,8 und 1,2 beträgt. Derartige Geometrie-Normale werden beispielsweise für die Kalibrierung von optischen Messgeräten benötigt. Wichtig ist, dass diese eine möglichst geringe Kantenverrundung haben, was mit dem erfindungsgemäßen Verfahren erreichbar ist.

[0024] Ein erfindungsgemäßes Verfahren umfasst vorzugsweise die Schritte eines Oxidierens der Oberfläche des (110)-Siliziumwafers, sodass eine Oxidschicht entsteht, und des Abätzen dieser Oxidschicht. Diese Schritte werden vorzugsweise vor dem Aufbringen der Maskierschicht und damit dem Durchführen des Verfahrens gemäß dem unabhängigen Verfahrensanspruch durchgeführt. Auf diese Weise kann die Dicke des (110)-Siliziumwafers prozesssicher auf geringe Dicken eingestellt werden.

[0025] Vorzugsweise werden die Schritte so und/oder so oft durchgeführt, dass der (110)-Siliziumwafer eine Dicke von höchstens 500 Nanometer, insbesondere höchstens 200 Nanometer hat.

[0026] Im Folgenden wird die Erfindung anhand der beigefügten Zeichnungen näher erläutert. Dabei zeigt

Fig. 1 in den **Fig. 1a** bis **Fig. 1 d** schematisch ein erfindungsgemäßes Verfahren an einem Siliziumwaferverbund zum Herstellen eines erfindungsgemäßen Geometrie-Normals und in **Fig. 1e** einen schematischen Vergleich eines Geometrie-Normals nach Herstellung nach einem Verfahren gemäß dem Stand der Technik (links) und gemäß dem erfindungsgemäßen Verfahren (rechts),

Fig. 2a zeigt eine weitere Ausführungsform eines erfindungsgemäßen Geometrie-Normals in Form eines Gitter-Normals und die

Fig. 2b, Fig. 2c, Fig. 2d zeigen schematisch Schritte einer bevorzugten Ausführungsform eines erfindungsgemäßen Verfahrens.

[0027] Die **Fig. 1a** bis **Fig. 1d** zeigen einen Siliziumwaferverbund **10** aus einem (110)-Siliziumwafer **12**, der an einen (111)-Siliziumwafer **14** per Waferbonden angebunden ist. Zwischen den beiden Siliziumwafern **12**, **14** existiert keine Zwischenschicht. In **Fig. 1a** eingezeichnet ist zudem eine Maskierschicht **16**, die auf dem Siliziumwaferverbund **10** vorhanden sein kann, nicht aber sein muss.

[0028] **Fig. 1a** zeigt den ersten Schritt zum Herstellen eines erfindungsgemäßen Geometrie-Normals. Zunächst wird die Maskierschicht **16** auf den Siliziumwaferverbund **12** aufgebracht.

[0029] **Fig. 1b** zeigt den zweiten Schritt, bei dem der (110)-Siliziumwafer **12** anisotrop geätzt wird. Das erfolgt beispielsweise mittels Kalilauge.

[0030] **Fig. 1c** zeigt den Zustand nach dem Ende des Ätzens. Die Ätzfront stoppt an der Oberfläche des (110)-Siliziumwafers **12**.

[0031] **Fig. 1d** zeigt den Zustand nach dem Entfernen der Maskierschicht **16**, sodass ein erfindungsgemäßes Geometrie-Normal **18** entstanden ist.

[0032] **Fig. 1e** zeigt links ein Geometrie-Normal **18**, das nach einem Verfahren gemäß den Stand der Technik hergestellt wird. Es ist zu erkennen, dass es zu einer Unterätzung **20** kommt, die eine Unterätzungstiefe **U** hat. Die Unterätzungstiefe **U** wird bestimmt als Abstand zwischen einer Ebene **E**, entlang der sich eine Seitenwand **22.1** einer Ausnehmung **24** erstreckt, sowie dem von der Ausnehmung **24** zuäusserst liegenden Punkt der Seitenwand **22**. Die Ausnehmung **24** ist durch anisotropes Ätzen wie in den **Fig. 1a** bis **Fig. 1d** erläutert, entstanden.

[0033] Im rechten Teilbild von **Fig. 1e** ist ein Geometrie-Normal **18** gezeigt, das mit dem geschilderten Verfahren hergestellt wurde. Es ist zu erkennen, dass es zu keiner Unterätzung kommt.

[0034] **Fig. 1e** zeigt im rechten Teilbild, dass eine Oberkante **30** zwischen der Seitenwand **22** und der Ausnehmung **24** und einer Oberfläche **32** des (110)-Siliziumwafers **12** einen sehr kleinen Kantenradius K_{30} haben kann. Kantenradien bis zu $K = 4$ Nanometer sind erreichbar.

[0035] **Fig. 2a** zeigt eine weitere Ausführungsform eines Geometrie-Normals **18**, das eine Mehrzahl an Stegen **26.i** ($i = 1, 2, \dots, N$) aufweist. Jeder Steg hat eine Stegbreite **B** und eine Steghöhe **H**. Im vorliegenden Fall beträgt die Steghöhe **H** = 200 Nanometer. Die Stegbreite **B** beträgt $B = 220$ Nanometer. Ein lichter Abstand **A** zwischen zwei benachbarten Stegen beträgt im vorliegenden Fall **A** = 220 Nanometer. Ein Verhältnis **V** = B/A beträgt damit $V = 1$.

[0036] Die **Fig. 2b**, **Fig. 2c** und **Fig. 2c** zeigen, wie eine Dicke **d** des (110)-Siliziumwafers **12** vermindert werden kann. Wie **Fig. 2c** zeigt, wird dazu zunächst eine Oxidschicht **28** auf dem (110)-Siliziumwafer **12** gebildet. Dadurch wandelt sich ein Teil des Siliziums des (110)-Siliziumwafers **12** in Siliziumoxid um. In einem nachfolgenden Schritt wird diese Oxidschicht beispielsweise mittels Flusssäure abgeätzt, sodass ein (110)-Siliziumwafer **12** entsteht, der eine kleinere Dicke **d** hat. Die genannten Schritte können mehrfach wiederholt werden, bis eine vorgegebene Soll-Dicke d_{Soll} erreicht ist.

[0037] Eine Unterkante **34** zwischen der Seitenwand **22** und einem Boden **36** der Ausnehmung **24** hat einen Kantenradius K_{34} , der in der Regel zwischen $K_{34} = 1$ nm und $K_{34} = 9$ nm liegt.

Bezugszeichenliste

10	Siliziumwaferverbund
12	(110)-Siliziumwafer
14	(111)-Siliziumwafer
16	Maskierschicht
18	Geometrie-Normal
20	Unterätzung
22	Seitenwand
24	Ausnehmung
26	Steg
28	Oxidschicht
30	Oberkante
32	Oberfläche
34	Unterkante
36	Boden
A	lichter Abstand
B	Stegbreite
d	Dicke
H	Steghöhe
I	Laufindex
K	Kantenradius
U	Unterätzungstiefe
V	Verhältnis

Patentansprüche

1. Geometrie-Normal (18) aus einer Maßverkörperung für eine geometrische Größe und einem Kalibrierschein, in dem die Eigenschaften der Maßverkörperung beschrieben sind, wobei die Maßverkörperung

(a) einen Siliziumwaferverbund (10), der einen (110)-Siliziumwafer (12) oder einen (100)-Siliziumwafer und einen (111)-Siliziumwafer (14), der an den (110)-Siliziumwafer oder einen (100)-Siliziumwafer angebondet ist, und
 (b) eine Ausnehmung (24),
 (i) die seitlich vom (110)-Siliziumwafer (12) berandet ist und
 (ii) deren Boden (36) durch eine Oberfläche (32) des (111)-Siliziumwafers (14) gebildet ist, aufweist.

2. Geometrie-Normal (18) nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Boden (36) der Ausnehmung (24)
 (a) eine Rauheit von höchstens 3 Nanometer hat und/
 oder
 (b) sich parallel zu einer Oberfläche des (110)-Siliziumwafers (12) erstreckt.

3. Geometrie-Normal (18) nach einem der Ansprüche 1 oder 2, **dadurch gekennzeichnet**, dass
 (a) zumindest eine Oberkante (30) zwischen einer Seitenwand (22) der Ausnehmung (24) und einer Oberfläche (32) des (110)-Siliziumwafers einen Kantenradius (K) von höchstens 20 Nanometer, insbesondere höchstens 10 Nanometer, hat und
 (b) zumindest eine Unterkante (34) zwischen der Seitenwand (22) der Ausnehmung (24) und dem Boden einen Kantenradius (K) von höchstens 20 Nanometer, insbesondere höchstens 10 Nanometer, hat.

4. Geometrie-Normal (18) nach einem der Ansprüche 1 bis 3, **dadurch gekennzeichnet**, dass ein Unterkantenbereich der Seitenwand (22) eine Unterätzungstiefe (U) von höchstens 20 Nanometer, insbesondere höchstens 10 Nanometer, insbesondere höchstens 5 Nanometer, hat.

5. Geometrie-Normal (18) aus einer Maßverkörperung für eine geometrische Größe und einem Kalibrierschein, in dem die Eigenschaften der Maßverkörperung beschrieben sind, wobei die Maßverkörperung
 (a) einen Siliziumwaferverbund (10), der einen (110)-Siliziumwafer (12) oder einen (100)-Siliziumwafer und einen (111)-Siliziumwafer (14), der an den (110)-Siliziumwafer oder einen (100)-Siliziumwafer angebondet ist, und
 (b) eine Mehrzahl an Stegen (26), die nebeneinander angeordnet sind und von denen zumindest einer eine Stegbreite (B) von höchstens 200 Nanometer hat, aufweist,
 (c) wobei eine Steghöhe (H) zumindest eines Stegs höchstens 500 Nanometer, insbesondere höchstens 200 Nanometer, beträgt.

6. Geometrie-Normal (18) nach Anspruch 5, **dadurch gekennzeichnet**, dass
 (a) die Stege (26) ein äquidistantes Gitter bilden und

(b) ein Verhältnis aus Stegbreite (B) zu lichtem Abstand (A) zweier Stege (26) zwischen 0,8 und 1,2 beträgt.

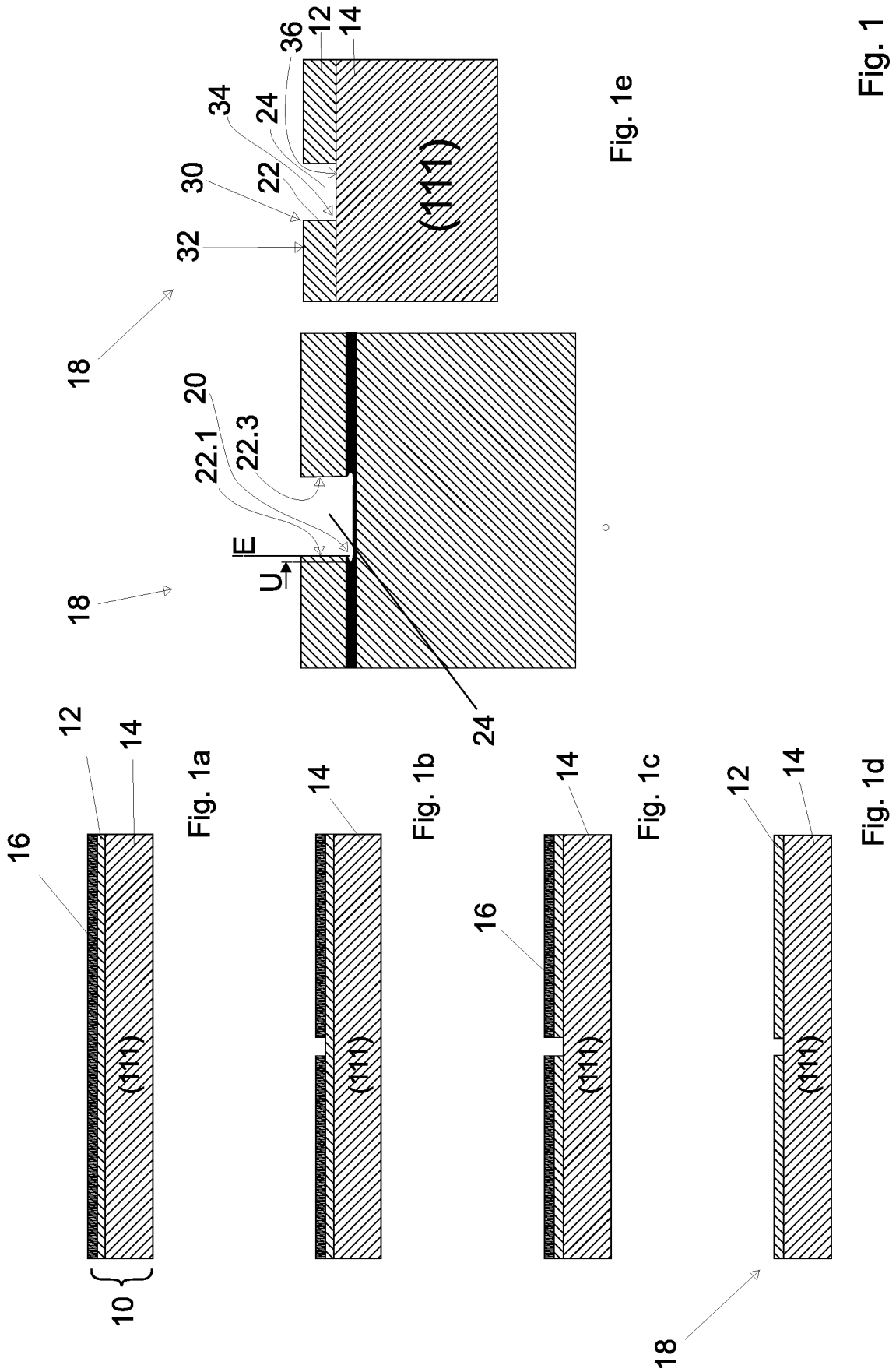
7. Verfahren zum Herstellen eines Geometrie-Normals (18) nach einem der vorstehenden Ansprüche, das eine Maßverkörperung für eine geometrische Größe und einen Kalibrierschein, in dem die Eigenschaften der Maßverkörperung beschrieben sind, wobei das Herstellen der Maßverkörperung die folgenden Schritten aufweist:

(a) Aufbringen einer Maskierschicht (16) auf einen Siliziumwaferverbund (10) aus einem (110)-Siliziumwafer (12) und einem (111)-Siliziumwafer, der an den (110)-Siliziumwafer (12) angebondet ist, und
 (b) anisotropes Ätzen des (110)-Siliziumwafers (12), sodass eine Ausnehmung (24) entsteht, deren Boden (36) durch eine Oberfläche (32) des (111)-Siliziumwafers (14) gebildet ist, und
 (c) Entfernen der Maskierschicht (16).

8. Verfahren nach Anspruch 7, **gekennzeichnet durch** die Schritte:
 (a) Oxidieren der Oberfläche (32) des (110)-Siliziumwafers (12), sodass eine Oxidschicht (28) entsteht, und
 (b) Abätzen der Oxidschicht (28).

Es folgen 2 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen



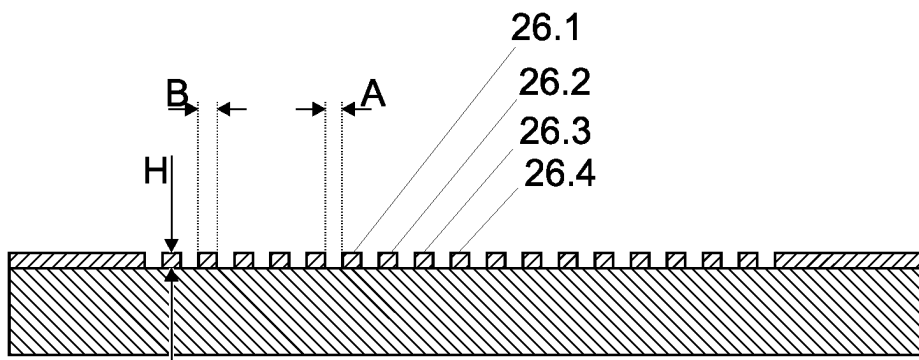


Fig. 2a

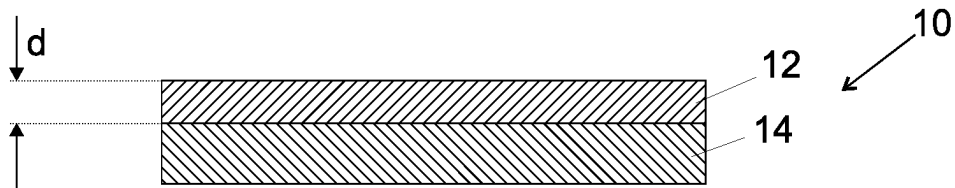


Fig. 2b

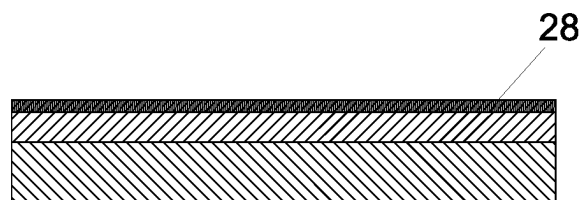


Fig. 2c



Fig. 2d