



(19)
Bundesrepublik Deutschland
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 199 33 418 B4** 2005.09.29

(12)

Patentschrift

(21) Aktenzeichen: **199 33 418.8**
(22) Anmeldetag: **16.07.1999**
(43) Offenlegungstag: **01.02.2001**
(45) Veröffentlichungstag
der Patenterteilung: **29.09.2005**

(51) Int Cl.⁷: **B81B 3/00**
B81C 1/00, G01B 15/00

Innerhalb von drei 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. 2 Patentkostengesetz).

(73) Patentinhaber:
Robert Bosch GmbH, 70469 Stuttgart, DE

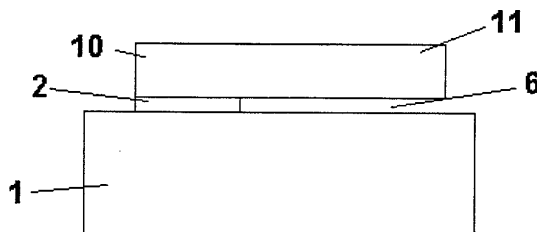
(72) Erfinder:
Fuertsch, Matthias, 72810 Gomaringen, DE;
Offenberg, Michael, Dr., 72138 Kirchentellinsfurt,
DE

(56) Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht
gezogene Druckschriften:
LANGE, P. et al: "Thick polycrystalline silicon
for surface-micromechanical applications: depo-
sition, structuring and mechanical characteri-
zation", Sensors and Actuators A 54
(1996)674-678;
BENITEZ, M.A. et al: "Stress-profile characteri-
zation and test-structure analysis of single and
double ion-implanted LPCVD polycrystalline sili-
con", Sensors and Actuators A 54 (1996) 718-723;

(54) Bezeichnung: **Verfahren zur Herstellung von mikromechanischen Bauelementen**

(57) Hauptanspruch: Verfahren zur Herstellung von mikromechanischen Bauelementen bei dem folgende Herstellungsschritte zur Anwendung kommen:

- Bereitstellen eines Siliziumsubstrats (1);
- Erzeugen einer oder mehrerer Opferschichten (2) darauf;
- Aufbringen einer dünnen Polysiliziumschicht als Nukleationsschicht auf die Opferschicht(en);
- Aufbringen einer im Verhältnis zur Nukleationsschicht dicken Polysiliziumschicht (3) auf die Nukleationsschicht durch ein Epitaxieverfahren;
- Dotieren der epitaktischen Polysiliziumschicht (3) durch einen Implantationsprozess.



Beschreibung

[0001] Die Erfindung geht aus von einem Verfahren zur Herstellung von mikromechanischen Bauelementen nach der Gattung des unabhängigen Patentanspruchs.

[0002] Es sind bereits Verfahren zur Herstellung von mikromechanischen Bauelementen bekannt, bei denen eine sogenannte Opferschicht-Technik verwendet wird. Dabei wird auf einem Substrat eine Opferschicht aufgebracht und auf der Opferschicht eine Strukturschicht. Aus der Strukturschicht wird ein Element herausstrukturiert und zumindest unter Teilen dieser Struktur wird die Opferschicht durch einen Ätzprozeß wieder entfernt. Dabei wird sowohl für das Substrat wie auch für die Strukturschicht Silizium verwendet.

Stand der Technik

[0003] In der Schrift von P. Lange et al., "Thick polycrystalline silicon for surface-micromechanical applications: deposition, structuring and mechanical characterization", Sensors and Actuators A 54 (1996) 674–678 ist die Herstellung von Polysiliziumschichten und deren Charakterisierung beispielsweise hinsichtlich mechanischer Spannungen dargestellt. Aus dieser Druckschrift ist ebenfalls die Herstellung dicker Polysiliziumschichten durch Abscheiden einer dünnen Polysiliziumschicht als Keimschicht und darauf einer dicken Polysiliziumschicht bekannt. Dabei ist die in-situ Dotierung durch Zumischung eines Dotiergases bei der Schichtabscheidung mittels CVD bekannt.

[0004] Aus der Schrift von M. A. Benitez et al., "Stress-profile characterization and test structure analysis of single and double ion-implanted LPCVD polycrystalline silicon", Sensors and Actuators A 54 (1996) 718–723 ist die Dotierung von Polysiliziumschichten für mikromechanische Anwendungen mittels Ionenimplantation bekannt.

Aufgabenstellung**Vorteile der Erfindung**

[0005] Das erfindungsgemäße Verfahren mit den Merkmalen des unabhängigen Patentanspruchs hat demgegenüber den Vorteil, daß so eine besonders genaue Kontrolle der inneren mechanischen Spannungen in der Struktur ermöglicht wird.

[0006] Weitere Weiterbildungen und Verbesserungen des erfindungsgemäßen Verfahrens ergeben sich durch die Merkmale der abhängigen Patentansprüche. Durch eine Temperaturbehandlung werden implantierte Dotierstoffe in das Siliziumkristallgitter eingebaut. Durch Beeinflussung der Dosis des Do-

tierstoffs und der Energie der Implantation können die Verteilung des Dotierstoffs in der Struktur und damit die inneren mechanischen Spannungen gezielt beeinflusst werden. Weiterhin können die mechanischen Spannungen in der Struktur verringert werden, indem durch Aufbringen einer Beschichtung das Eindringen von Sauerstoff in das Silizium der Struktur bei der Temperaturbehandlung vermieden wird. Besonders geeignet ist das Verfahren für die Anwendung bei dicken Strukturschichten, wie sie beispielsweise durch die Verwendung eines Epitaxieprozesses bei der Herstellung der Strukturschicht erzielt werden.

Ausführungsbeispiel**Zeichnungen**

[0007] Ausführungsbeispiele der Erfindung werden in den Zeichnungen dargestellt und in der nachfolgenden Beschreibung näher erläutert. Es zeigen die [Fig. 1](#) bis [Fig. 3](#) ein erfindungsgemäßes Herstellungsverfahren und [Fig. 4](#) eine Aufsicht auf die [Fig. 3](#).

Beschreibung

[0008] In den [Fig. 1](#) bis [Fig. 3](#) wird ein Herstellungsverfahren für mikromechanische Strukturen gezeigt, in dem ein Querschnitt durch den Aufbau der einzelnen Schichten gezeigt wird.

[0009] In der [Fig. 1](#) wird ein Querschnitt durch einen Siliziumwafer **1** gezeigt, auf dem eine Opferschicht **2** hergestellt ist. Für derartige Opferschichten eignet sich beispielsweise Siliziumoxid, welches durch einen Oxidationsprozess des Siliziumwafers **1** oder durch übliche Abscheidungstechniken der Halbleitertechnik hergestellt ist. Auf dieser Opferschicht **2** wird dann durch einen üblichen Prozeß der Halbleitertechnik eine dünne Polysiliziumschicht als Nukleationsschicht abgeschieden. Diese dünne Polysiliziumschicht wird in der [Fig. 1](#) nicht dargestellt. In einem nachfolgenden Schritt erfolgt dann auf dieser dünnen Polysiliziumschicht die Abscheidung einer dicken Polysiliziumschicht **3**. Für die Abscheidung dieser dicken Polysiliziumschicht **3** werden Prozesse benutzt, die in der Halbleitertechnik üblicherweise zur Abscheidung von sog. Epitaxieschichten verwendet werden. Bei diesen Prozessen erfolgt normalerweise auf einem einkristallinen Siliziumsubstrat die Abscheidung einer im Wesentlichen einkristallinen Siliziumschicht. Da hier jedoch dieser Prozeß auf einer dünnen Polysiliziumschicht angewendet wird, wächst keine einkristalline Siliziumschicht sondern eine polykristalline Siliziumschicht auf. Wesentlich an diesem Prozeß ist, daß sich mit kurzen Prozeßzeiten dicke Polysiliziumschichten erzeugen lassen.

[0010] Für die folgende Beschreibung wird davon

ausgegangen, daß die Opferschicht **2** eine Dicke von ca. 1,5 Mikrometer hat und die darauf angeordnete Polysiliziumschicht **3** eine Dicke von 11 Mikrometern hat.

[0011] Die durch diese Epitaxieprozesse abgechiedene Polysiliziumschicht **3** weist für viele Anwendungen der Mikromechanik eine zu geringe Dotierstoffkonzentration auf. Insbesondere, wenn mikromechanische Bauelemente geschaffen werden, bei denen einzelne Teile der Struktur leitend sein sollen, ist es erforderlich, zusätzlich noch Dotierstoffe in die Polysiliziumschicht **3** einzubringen. Dies kann beispielsweise dann notwendig sein, wenn die mikromechanischen Strukturen als kapazitive Elemente (beispielsweise kapazitive Beschleunigungssensoren) wirken sollen.

[0012] Besonders kostengünstige Verfahren zum Einbringen von Dotierstoffen bestehen darin, daß die Oberfläche der Siliziumschicht **3** mit einem phosphorhaltigen Gas beaufschlagt wird (z.B. POCl_3), wodurch eine Oberflächenschicht der Siliziumschicht **3** stark dotiert wird. In einem nachfolgenden Prozeß wird dann die Oberfläche mit einer Schutzschicht aus Siliziumoxid versehen, durch die eine Rückdiffusion des Dotierstoffes in eine Gasphase vermieden wird. Es erfolgt dann eine Hochtemperaturbehandlung, beispielsweise bei 1160°C , durch die die zunächst nur oberflächlich vorhandenen Dotierstoffe in die oberste Siliziumschicht **3** eingetrieben werden. Da dieser Prozeß ausschließlich von der Oberfläche der Siliziumschicht **3** ausgeht, nimmt dabei die Dotierstoffkonzentration in der Tiefe der Siliziumschicht **3** stark ab. Weiterhin ist es bei derartigen Prozessen sehr schwierig, bei einer Vielzahl von parallel prozessierten Siliziumsubstraten für alle auf den Siliziumsubstraten **1** angeordneten Siliziumschichten **3** eine gleich starke Dotierung zu erreichen. Außerdem ist ein gewisser Gang der Dotierstoffkonzentration und damit der inneren mechanischen Verspannung über der Oberfläche eines Wafers nicht zu vermeiden.

[0013] Problematisch ist diese ungleichmäßige Verteilung der Dotierstoffkonzentration in der Siliziumschicht **3** bzw. zwischen verschiedenen Bauelementen nicht nur hinsichtlich der dadurch unterschiedlichen Leitfähigkeit der Siliziumschicht **3**. Die Dotierstoffkonzentration hat auch einen Einfluß auf die in der Siliziumschicht **3** enthaltenen inneren mechanischen Spannungen und damit auf die Krümmung der Struktur nach dem Freiätzen. Unterhalb einer bestimmten Dotierstoffkonzentration bzw. einer bestimmten Phosphorkonzentration wird ein Großteil der Dotierstoffe auf elektrisch aktiven Gitterplätzen eingebaut, wodurch eine leichte Zugspannung in dem Material erzeugt wird. Bei zunehmender Stärke der Dotierung geht ein wachsender Anteil des Phosphors in die Korngrenzen, wo sie elektrisch nicht aktivierbar sind. Dort erzeugen sie eine Druckspan-

nung. Aufgrund einer ungleichmäßig starken Dotierung der Siliziumschicht **3** und insbesondere bei einem Wechsel von Zug- zu Druckspannungen kann es daher zu starken mechanischen Spannungen innerhalb der Siliziumschicht **3** und zur Verkrümmung von freigelegten Strukturen kommen.

[0014] Erfindungsgemäß wird nun ein Verfahren verwendet, bei dem die Siliziumschicht **3** durch einen Implantationsprozeß mit einem Dotierstoff versehen wird. Eine derartige Siliziumschicht **3** wird schematisch in der [Fig. 2](#) gezeigt, die einen Weiterverarbeitungsschritt nach der [Fig. 1](#) darstellt. Ausgehend von der [Fig. 1](#) erfolgt die Implantation von Dotierstoffen mit einem Implanter, wie er auch für die Halbleitertechnik Verwendung findet. Schematisch wird in der [Fig. 2](#) eine in der Siliziumschicht **3** gelegene Schicht **4** gezeigt, bei der es sich um einen Bereich der Siliziumschicht **3** handelt, in dem die größte Dotierstoffmenge eingebracht wird. Es handelt sich dabei nur um eine schematische Darstellung, die zeigen soll, daß die stärkste Dotierstoffkonzentration nicht an der Oberfläche der Siliziumschicht **3** ist, sondern sich in Abhängigkeit von der Energie der Implantation auch im Inneren der Siliziumschicht **3** befindet. Real ist es jedoch so, daß durch den Implantationsprozeß zumindest bei einer Dicke in der Größenordnung von 11 Mikrometern der Siliziumschicht **3** in der gesamten Schichtdicke Dotierstoffatome eingebracht werden. Dabei unterscheidet sich die stärkste Konzentration typischerweise um einen Faktor 10 von der schwächsten Konzentration. Durch die Implantation ist die Verteilung des Dotierstoffes über der Oberfläche des Wafers sehr viel gleichmäßiger und reproduzierbarer. Außerdem wird ein geringerer Anteil des Dotierstoffes in Korngrenzen eingebaut und die mechanischen Spannungsdifferenzen in dem Querschicht der Siliziumschicht **3** reduziert.

[0015] In einem nachfolgenden Temperaturschritt, beispielsweise bei 1100°C für 30 Min., erfolgt dann eine Aktivierung der eingebrachten Dotierstoffe, d.h. durch Erhöhung der Temperatur wird die Diffusionsmöglichkeit der Dotieratome im Silizium so erhöht, daß sie elektrisch aktivierbare Gitterplätze besetzen können. Dabei erfolgt natürlich abermals eine weitere Ausgleichung unterschiedlich starker Dotierstoffkonzentrationen.

[0016] Bei der Temperaturbehandlung können auch Gasatome, insbesondere Sauerstoff, z.B. als Hintergrundkontamination auch in einer inerten Atmosphäre in das Siliziumsubstrat hereindiffundieren. Auch diese eindiffundierten Gasatome bzw. Sauerstoffatome können die mechanischen Spannungen im Silizium beeinflussen. Um diesen Effekt möglichst gering zu halten, wird daher in der [Fig. 2](#) noch eine oberflächliche Schicht **5** aus Siliziumnitrid (Si_3N_4) gezeigt, welche die Siliziumschicht **3** vor dem Eindringen von Gasatomen bei der Temperaturbehandlung

schützt. Dies stellt eine weitere Maßnahme dar, um die mechanischen Spannungen und deren Gradienten in der Siliziumschicht **3** gering zu halten.

[0017] In weiteren Prozeßschritten wird dann die Siliziumnitridschuttschicht **5** wieder entfernt und es erfolgt eine Strukturierung der Siliziumschicht **3**. In einem nachfolgenden Schritt erfolgt dann eine Ätzung der Opferschicht **2**, wobei dabei ein Ätzmedium verwendet wird, welches die Opferschicht **2** ätzt, nicht jedoch das Substrat **1** oder die Siliziumschicht **3**. Der so erreichte Zustand wird in der [Fig. 3](#) gezeigt. Wie zu erkennen ist, ist aus der oberen Siliziumschicht **3** eine Struktur herausgebildet worden. Unter einem Teil der Struktur ist noch ein Teilbereich der Opferschicht **2** als Verankerung verblieben, während andere Bereiche **6** unterhalb der Struktur frei geätzt sind. In der [Fig. 4](#) wird eine Aufsicht auf die Struktur nach der [Fig. 3](#) gezeigt, wobei durch die Linie III-III angedeutet wird, daß die [Fig. 3](#) einen Querschnitt entlang dieser Linie durch die [Fig. 4](#) zeigt. Wie in der [Fig. 4](#) zu erkennen ist, ist auf dem Siliziumsubstrat **1** eine Struktur geschaffen, die einen Verankerungsbereich **10** und einen beweglichen Bereich **11** aufweist. Der Verankerungsbereich **10** ist dabei von seinen lateralen Abmessungen so bemessen, daß er bei einem kurzen zeitgesteuerten Ätzprozeß der Opferschicht **2** nicht unterätzt wird. Der bewegliche Teil **11** der Struktur ist in zumindest einer lateralen Abmessung so ausgestaltet, daß auch bei einer sehr kurzen Beaufschlagung mit einem Ätzmedium für die Opferschicht **2** eine Unterätzung **6** dieses Bereichs erfolgt. Es ist somit durch Strukturierung der Siliziumschicht **3** und einen nachfolgenden Ätzschritt der Opferschicht **2** eine Struktur geschaffen, die teilweise mit dem Substrat **1** verbunden ist und teilweise (Bereich **11**) nicht mit dem Substrat verbunden ist. Durch geeignete Auslegung des Bereichs **11** kann so eine Struktur geschaffen werden, die durch eine Kraftauswirkung relativ zu dem Substrat **1** bewegt wird.

[0018] In der [Fig. 3](#) wird gezeigt, daß die geschaffene bewegliche Struktur in etwa mit dem Abstand der Opferschicht, d.h. in der Größenordnung von 1 bis 2 Mikrometern, über dem Substrat **1** angeordnet ist. Da derartige mikromechanische Strukturen in einer Richtung parallel zum Substrat **1** Ausdehnungen in der Größenordnung von mehreren hundert Mikrometern aufweisen, können bereits geringe mechanische Spannungen zu einer Berührung der beweglichen Teile mit dem Substrat **1** führen. Es ist daher sehr wesentlich für die Herstellung von mikromechanischen Strukturen, die mechanischen Spannungen in der Siliziumschicht **3** exakt zu kontrollieren. Dies wird durch das erfindungsgemäße Verfahren ermöglicht, da es so möglich ist, die mechanischen Spannungen innerhalb der Siliziumschicht **3** exakt zu kontrollieren. Je nach Wahl der Dotierstoffkonzentration und der durch die Implantation bedingten Verteilung der Dotierstoffe in der Tiefe der Siliziumschicht **3** können so

gezielte Druckspannungen, Zugspannungen oder ein nahezu spannungsfreier Zustand erreicht werden. Gewünscht ist hier, daß die Siliziumschicht **3** nur sehr geringe Spannungen aufweist und daß die verbliebenen Restspannungen zu einer Verbiegung der Siliziumschicht **3** weg vom Substrat **1** führt.

[0019] Weiterhin handelt es sich bei der Implantation um einen sehr gut kontrollierbaren Prozeß, der insbesondere auch über der Fläche eines großflächigen Siliziumsubstrats **1** und aber auch bei der Anwendung bei mehreren verschiedenen Siliziumsubstraten reproduzierbar eingehalten werden kann. Es wird so bei einer Massenherstellung derartiger mikromechanischer Strukturen die Streuung der einzelnen Strukturen untereinander gering gehalten.

Patentansprüche

1. Verfahren zur Herstellung von mikromechanischen Bauelementen bei dem folgende Herstellungsschritte zur Anwendung kommen:

- Bereitstellen eines Siliziumsubstrats (**1**);
- Erzeugen einer oder mehrerer Opferschichten (**2**) darauf;
- Aufbringen einer dünnen Polysiliziumschicht als Nukleationsschicht auf die Opferschicht(en);
- Aufbringen einer im Verhältnis zur Nukleationsschicht dicken Polysiliziumschicht (**3**) auf die Nukleationsschicht durch ein Epitaxieverfahren;
- Dotieren der epitaktischen Polysiliziumschicht (**3**) durch einen Implantationsprozess.

2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Implantationsdosis so gewählt wird, daß in der Polysiliziumschicht (**3**) möglichst geringe innere mechanische Spannungen und Spannungsgradienten erzeugt werden.

3. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß nach dem Implantationsprozeß eine Temperaturbehandlung durchgeführt wird.

4. Verfahren nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, daß die Polysiliziumschicht (**3**) vor der Temperaturbehandlung mit einer Schutzschicht, insbesondere aus Siliziumnitrid versehen wird.

5. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß die Dicke der Polysiliziumschicht (**3**) mehr als 10 Mikrometer beträgt.

Es folgt ein Blatt Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

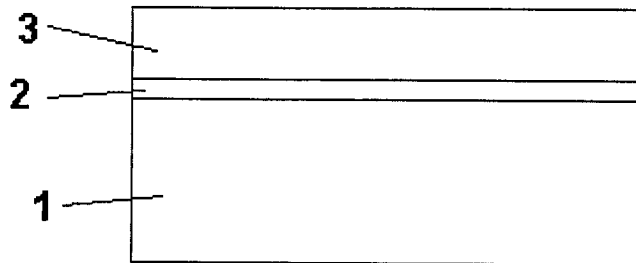


Fig. 1

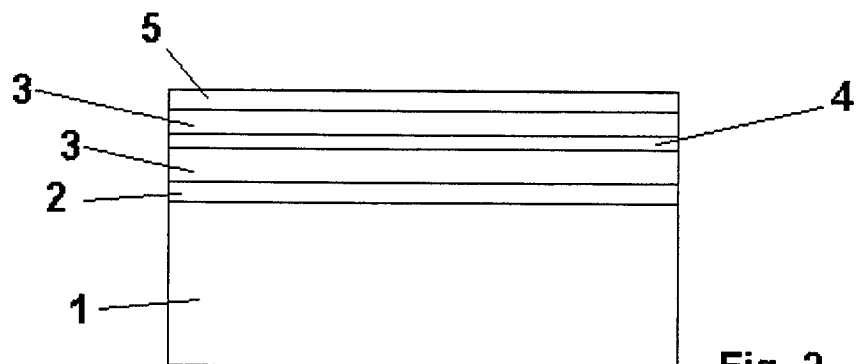


Fig. 2

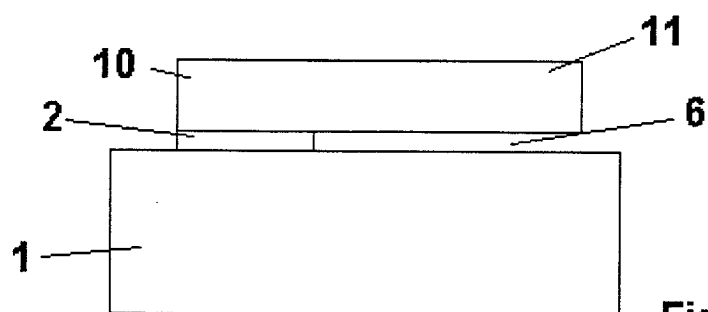


Fig. 3

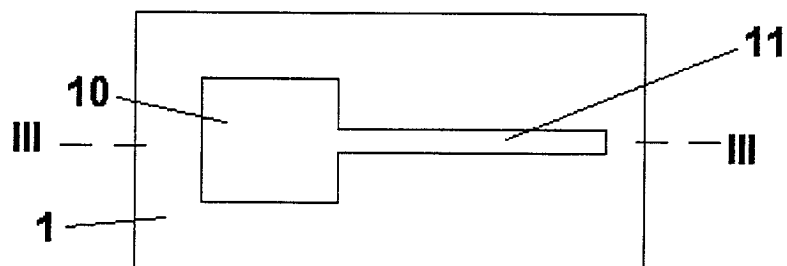


Fig. 4

