

HANSER

Einführung in die Mikrosystemtechnik

Jan Mehner, Wolfram Dötzel, Gerald Gerlach

Ein Kursbuch für Studierende

ISBN 3-446-22558-7

Leseprobe

Weitere Informationen oder Bestellungen unter
<http://www.hanser.de/3-446-22558-7> sowie im Buchhandel

4.10 Oberflächenmikromechanik

4.10.1 Prinzip

Die Oberflächenmikromechanik ist eine Technik zur Herstellung freibeweglicher Strukturen auf der Oberfläche des Siliziumwafers. **Bild 4.47** zeigt das Grundprinzip.

- Zuerst wird auf der Substratoberfläche eine Opferschicht abgeschieden und strukturiert.
- Auf der Opferschicht wird die Funktionsschicht abgeschieden und entsprechend ihrer Funktion strukturiert.
- Die Opferschicht wird herausgelöst. Die Teile der Funktionsschicht, die auf der Opferschicht abgeschieden waren, werden frei beweglich, während die Bereiche, die mit der Substratoberfläche verbunden sind, die Verankerung der frei beweglichen Funktionselemente bilden.

Zum ersten Mal war ein solches Opferschichtverfahren 1965 für die Herstellung eines Schwingungssensors verwendet worden.¹² Eine Biegefeder aus Gold (2,5 mm lang, 3,4 µm dick) diente dabei als bewegliches Gate über einem Feldeffekttransistor. Als Opferschichtmaterial wurde Fotoresist verwendet. Seit der Wiederentdeckung des Verfahrens¹³ wird vorzugsweise mit folgender Materialkombination gearbeitet:

- Opferschicht: SiO₂, PSG (Phosphorsilikatglas)
- Funktionsschicht: Poly-Si.

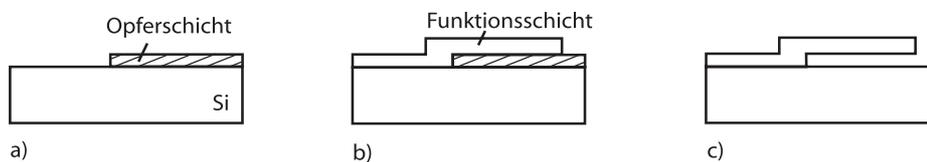


Bild 4.47 Schematische Darstellung der Prozessschritte bei der Oberflächenmikromechanik (Bsp. Biegefeder): a) Abscheidung und Strukturierung der Opferschicht; b) Abscheidung und Strukturierung der Funktionsschicht; c) nach dem Opferschichtätzen

¹² Nathansen, H. C.; Wickstrom, R. A.: A resonant-gate Silicon surface transistor with high-Q band pass properties. Applied Physics Letters 7 (1965), S. 84-86

¹³ Howe, R. T.; Muller, R. S.: Polycrystalline and amorphous silicon micromechanical beams: annealing and mechanical properties. Sensors and Actuators 4 (1983), S. 447-454

Polysilizium hat naturgemäß Materialeigenschaften, die denen von einkristallinem Silizium sehr ähnlich sind, so dass mechanische und thermische Störeinflüsse gering sind. SiO_2 lässt sich mit vielen unterschiedlichen Verfahren in hinreichend guter Qualität herstellen (**Tabelle 4.20**). Mit Ätzlösungen, die auf Flusssäure (HF) oder gepufferter Flusssäure (BHF Buffered HF; wässrige Lösung aus HF und Ammoniumfluorid NH_4F) basieren, kann SiO_2 sehr selektiv gegenüber Silizium herausgelöst werden (**Tabelle 4.21**).

Bei der Oberflächenmikromechanik können auch mehrere Opfer- und Funktionsschichten genutzt werden, so dass sich komplizierte dreidimensionale Formen herstellen lassen. Damit ist eine große Formenvielfalt realisierbar. Die Dicke der Opferschichten bestimmt dabei die Bewegungsräume der beweglichen mechanischen Elemente bzw. ihr Spiel.

Tabelle 4.20 Eigenschaften von SiO_2 -Schichten als Opferschichtmaterial¹⁴

Herstellung	Abscheidetemperatur in °C	Abcheiderate	Kantenbedeckung	Schichtspannung	Ätzrate in 1 % HF-Lösung in nm/s	Bemerkungen
Thermisch	800 ... 1000	niedrig	konform	–	0,1	sehr gute Schichtqualität; gute Dickenkontrolle
LPCVD	600 ... 900	niedrig	konform	–	niedrig	gute Schichtqualität
LPCVD-LTO	400 ... 500	niedrig	schlecht	– ... +	0,7 (25) ¹	großer H-Gehalt
LPCVD-TEOS	650 ... 750	mittel	konform	–	mittel	
APCVD	300 ... 500	groß	gut	+	1 (15) ¹	Schichtverunreinigungen
PECVD	200 ... 400	mittel	konform	–	1,2 (40) ¹	Einbau von H, N in die Schicht
PECVD-TEOS	350 ... 400	mittel	konform	– ... +	0,3 (1) ¹	Einbau von H, N in die Schicht
SOG	< 200	groß	planarisierend	– ... +	1,2	instabile Schichten

– Druckspannung; + Zugspannung; LTO Low Temperature Oxide; TEOS Tetraethoxysilan $\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4$; SOG Spin-on-Glass;

¹PSG (SiO_2 abgeschieden mit 7 Gew.% P)

¹⁴ Bühler, J.; Steiner, F.-P.; Baltes, H.: Silicon dioxide sacrificial layer etching in surface micromachining. Journal of Micromechanics and Microengineering 7 (1997), S. R1-R13

Tabelle 4.21 Ätzraten von gepufferter Flusssäure (BHF; HF (50 %) : NH₄F (40 %) = 1 : 5 ... 1 : 100)

Geätztes Material	Ätzrate in nm/min	Geätztes Material	Ätzrate in nm/min
(1 0 0)-Si	< 0,1	SiO ₂ (PECVD)	45 ... 160
(1 1 1)-Si	< 0,1	SiO ₂ (PSG)	60
Poly-Si	0,2	Si ₃ N ₄ (PECVD)	4
SiO ₂ (thermisch) ¹	22		

¹ Feuchtoxid, 1100 °C**Beispiel 4.9** Herstellung eines Zahnrades mittels Oberflächenmikromechanik

Bild 4.48 zeigt die Herstellungsschritte für ein Zahnrad aus Poly-Si, das durch eine Poly-Si-Drehachse auf dem Si-Substrat gehalten wird.

Mit den beiden Funktionsschichten #1 und #2 werden das Zahnrad und die Drehachse für das Zahnrad gebildet. Um das Zahnrad frei umlaufen lassen zu können, muss es von Substrat und Achse getrennt sein. Das wird durch die beiden Opferschichten erreicht, die das Zahnrad vollständig umschließen. Um die Reibung zwischen Zahnrad und Welle gering zu halten, müssen die Grenzflächen zwischen den Funktions- und Opferschichten sehr glatt sein.

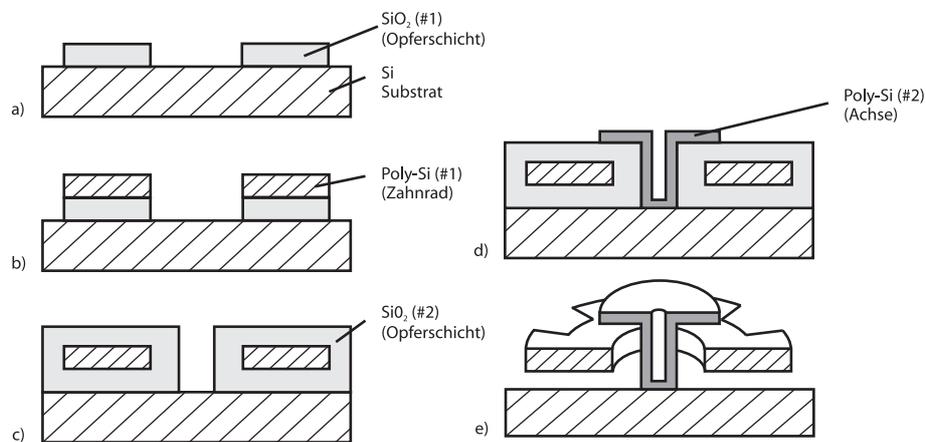


Bild 4.48 Herstellung eines Zahnrades: a), b) Abscheidung und Strukturierung der ersten Opfer- bzw. Funktionsschicht; c), d) Abscheidung und Strukturierung der zweiten Opfer- bzw. Funktionsschicht; e) Freilegen des Zahnrades durch Opferschichtätzen

4.10.2 Herstellung von Hohlräumen

Viele Anwendungen benötigen abgeschlossene, zumeist auch hermetisch dichte Hohlräume. So erfordern Absolutdrucksensoren Vakuum auf einer Seite der deformierbaren Druckplatte. Für das Herauslösen der Opferschichten ist andererseits aber der Zugang unter die Funktionsschichten notwendig, um die Opferschichten herausätzen zu können. Üblicherweise werden dazu spezielle Opferschichtkanäle vorgesehen, über die die entsprechende Ätzlösung die Opferschichten herauslösen kann. Diese relativ dünnen Kanäle werden anschließend verschlossen (**Bild 4.49**):

- Thermische Oxidation: Sind die Opferschichtkanäle in (einkristallines oder Poly-) Silizium eingebettet, wachsen diese bei thermischer Oxidation zu (s. **Bilder 4.49d1** und **4.11**).
- Schichtabscheidung (**Bild 4.49d2**).

Beispiel 4.10 Herstellung eines resonanten Drucksensors

Bild 4.50 zeigt einen resonanten Drucksensor, bei dem eine H-förmige Struktur an den vier Enden des H mit der Oberfläche einer Druckplatte verbunden ist und in Resonanz schwingt. Die Schwingungsbewegung senkrecht zur Druckplatte wird durch einen Wechselstrom angeregt, der durch die Arme der H-Struktur fließt, und entsteht durch

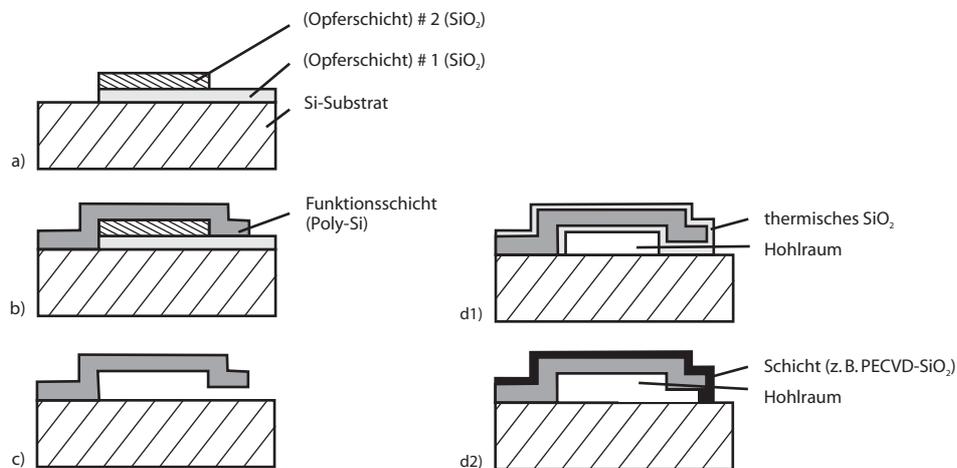


Bild 4.49 Herstellung abgeschlossener Hohlräume mittels Oberflächenmikromechanik: a) Abscheidung zweier Opferschichten zur Schaffung von Opferschichtätzkanälen (#1) und des Hohlraums (#2), b) Abscheidung der Funktionsschicht; c) Opferschichtätzen; d1) Verschluss des Hohlraums durch thermische Oxidation; d2) durch Schichtabscheidung

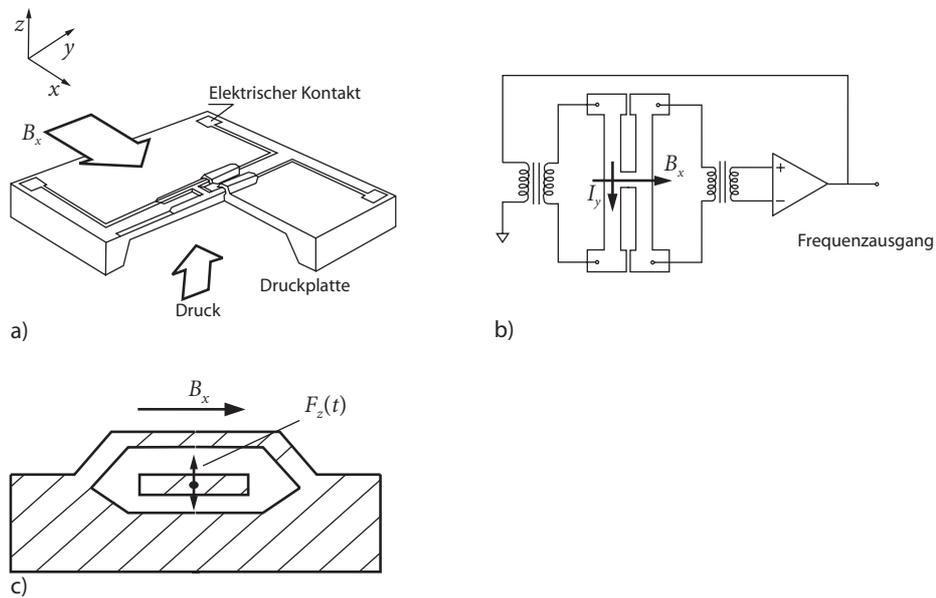


Bild 4.50 Resonanter Drucksensor (nach ¹⁵): a) Aufbau; b) schematische Darstellung des Funktionsprinzips; c) Querschnitt durch die Schwingungsstruktur

LORENTZ-Kräfte F_z , wenn das Magnetfeld B parallel zur Plattenoberfläche wirkt (vgl. Abschn. 1.4):

$$F_z(t) = I_y(t) \cdot l_y \cdot B_x \quad (4.52)$$

Durch eine Biegedeformation infolge eines Messdrucks p ändert sich die Resonanzfrequenz der schwingenden H-Struktur. Eine Schwingung mit hoher Güte wird erreicht, wenn sie im Vakuum erfolgt. Aus diesem Grund ist es vorteilhaft, die H-Struktur entsprechend **Bild 4.50c** zu häusen. Für die Herstellung sind folgende Randbedingungen zu berücksichtigen:

- Die schwingende H-Struktur (Funktionsschicht #1) soll aus einkristallinem Silizium bestehen.
- Damit kommt als erste Opferschicht selbst nur einkristallines Silizium in Frage, das wie der H-Schwinger epitaktisch aufgebracht wird.

¹⁵ Ikeda, K., Kuwayama, H., Kobayashi, T., Watanabe, T., Nikshikawa, T., Yoshida, T., Harada, K.: Three dimensional micromachining of silicon pressure sensor integrating resonant strain gauge on diaphragm. Sensors and Actuators A 21-23 (1990), S. 328-331

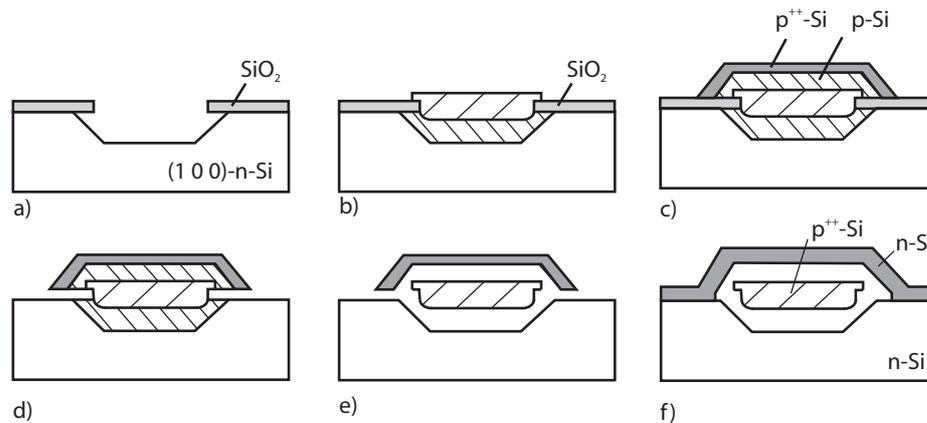


Bild 4.51 Herstellung des resonanten Drucksensors von Bild 4.50c (Erläuterung im Text)

- Um eine hinreichend gute Ätzselektivität zwischen Funktions- und Opferschichten zu erreichen, werden erstere mit Bor hoch dotiert und der Ätzstopp an solchen hoch dotierten p^{++} -Schichten angewendet (a. Abschn. 4.6.4), wo p-Si normal und p^{++} -Si mit einer um Größenordnung geringeren Ätzrate anisotrop nasschemisch abgetragen werden.
- Die Häusung der Schwingungsstruktur wird über eine zweite Funktionsschicht, wiederum aus p^{++} -Si, erreicht.

Die Herstellungsschritte sind in **Bild 4.51** dargestellt. Eine dünne SiO_2 -Schicht dient einerseits als Ätzmaske zum anisotropen Einätzen des Freiraumes für die Schwingungsschicht (**Bild 4.51a**) und später als Ätzkanal zum Opferschichtätzen (**Bild 4.51d**). Anschließend wird eine Opferschicht aus p-Si epitaktisch abgeschieden, deren Dicke größer als die Schwingungsamplitude der darauf epitaktisch aufgewachsenen p^{++} -Schicht (schwingende H-Struktur) sein muss (**Bild 4.51b**). Die nachfolgende p-Si-Opferschicht ermöglicht später die Schwingung der H-Struktur nach oben, während die darauf aufgebraute p^{++} -Schicht später den Gehäusedeckel bilden wird (**Bild 4.51c**). Anschließend werden die Opferschichten aus SiO_2 (**Bild 4.51d**) und aus p-Si herausgelöst (**Bild 4.51e**). Das erfolgt z. B. mit Flusssäure, die eine große Ätzselektivität zwischen SiO_2 und p- bzw. p^{++} -Si zeigt, sowie mit KOH-Lösung, die das p-Si ätzt, aber die p^{++} -Si-Funktionsschichten stehen lässt. Der Verschluss der Struktur erfolgt dann mittels epitaktischer Abscheidung von n-dotiertem Silizium (**Bild 4.51f**). Durch Tempern in Stickstoff-Atmosphäre erfolgt eine Ladungsträgerdiffusion aus der p^{++} -Si-Deckelschicht in die darüber liegende n-Si-Schicht, wo sie rekombinieren. Die resultierende oberste Deckelschicht ist damit nach der Temperung n-leitend, so dass nur noch die Schwingungsstruktur p^{++} -leitend ist. Damit