

Halbleitertechnologie von A bis Z

Mikromechanik

Einführung MEMS	3
<i>Was ist ein MEMS?</i>	3
<i>Fertigung: mechanisch statt rein elektrisch</i>	3
<i>Anwendungsbeispiele</i>	3
Anisotropes Ätzen von Silicium	4
<i>Kristallorientierung und Ätzraten</i>	4
<i>Der charakteristische Winkel von 54,74°</i>	4
<i>(110)-Silicium: senkrechte Wände</i>	5

Einführung MEMS

Was ist ein MEMS?

MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems, zu Deutsch etwa mikroelektromechanische Systeme) bezeichnet Bauelemente, die mechanische und elektrische Funktionen auf demselben Chip vereinen – Sensoren, die Bewegung, Druck oder Schall in elektrische Signale umwandeln, oder Aktoren, die umgekehrt elektrische Signale in Bewegung übersetzen. Anders als klassische integrierte Schaltungen, die ausschließlich mit Ladungsträgern arbeiten, besitzen MEMS bewegliche mechanische Strukturen: freistehende Balken, Membranen, Kammstrukturen oder Federn, die im Nanometer- bis Mikrometerbereich auslenken.

Die Fertigung nutzt dieselben Grundwerkzeuge wie die klassische Halbleitertechnik – Lithografie, Ätzen, Abscheidung –, geht aber in ihrer Zielsetzung darüber hinaus: Während bei einem Transistor jede Schicht dauerhaft mit der nächsten verbunden bleiben soll, müssen MEMS-Strukturen gezielt freigelegt werden, damit sie sich bewegen können. Das erfordert zusätzliche Konzepte wie Opferschichten und tiefes, hochanisotropes Ätzen, die in der klassischen Fertigung keine Rolle spielen.

Anwendungsbeispiele sind allgegenwärtig: Beschleunigungssensoren in Smartphones (Bildschirmrotation), Drucksensoren in Reifendruckkontrollsystemen, Mikrofone in praktisch jedem mobilen Gerät und Mikrospiegel in Projektoren.

Fertigung: mechanisch statt rein elektrisch

Die Fertigung nutzt dieselben Grundwerkzeuge wie die klassische Halbleitertechnik – Lithografie, Ätzen, Abscheidung –, geht aber in ihrer Zielsetzung darüber hinaus: Während bei einem Transistor jede Schicht dauerhaft mit der nächsten verbunden bleiben soll, müssen MEMS-Strukturen gezielt freigelegt werden, damit sie sich bewegen können. Das erfordert zusätzliche Konzepte wie Opferschichten und tiefes, hochanisotropes Ätzen, die in der klassischen Fertigung keine Rolle spielen.

Anwendungsbeispiele

Anwendungsbeispiele sind allgegenwärtig: Beschleunigungssensoren in Smartphones (Bildschirmrotation), Drucksensoren in Reifendruckkontrollsystemen, Mikrofone in praktisch jedem mobilen Gerät und

Anisotropes Ätzen von Silicium

Kristallorientierung und Ätzraten

Einkristallines Silicium ätzt in alkalischen Lösungen wie Kaliumhydroxid (KOH) oder TMAH (Tetramethylammoniumhydroxid) nicht in allen Richtungen gleich schnell – man spricht von anisotropem Ätzen. Ursache ist die Kristallstruktur: Silicium kristallisiert im Diamantgitter, und die {111}-Kristallebenen sind deutlich dichter mit Atomen besetzt als die {100}- oder {110}-Ebenen. Weil dichter gepackte Ebenen weniger frei zugängliche Bindungen für die Ätzlösung bieten, werden sie erheblich langsamer abgetragen – typische Ätzratenverhältnisse zwischen {100} und {111} liegen bei 100:1 oder mehr.

Die {111}-Ebenen bilden deshalb die Seitenwände der geätzten Struktur, unabhängig davon, wie lange geätzt wird: Ist die {111}-Ebene erst einmal freigelegt, kommt der Ätzangriff dort praktisch zum Stillstand, während {100}- oder {110}-Flächen weiter abgetragen werden.

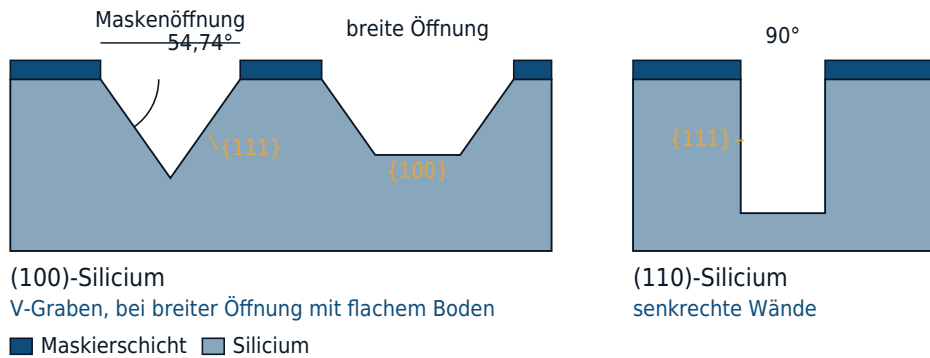
Der charakteristische Winkel von 54,74°

Bei (100)-orientierten Wafern – dem in der Halbleiterfertigung häufigsten Schnitt – liegt die Waferoberfläche parallel zur {100}-Ebene. Die {111}-Ebenen schneiden diese Oberfläche unter einem festen, durch die Kristallgeometrie vorgegebenen Winkel von 54,74°. Öffnet man die Maskierschicht rechteckig und ätzt durch diese Öffnung, entsteht deshalb kein senkrechter Graben, sondern ein V-förmiger Graben mit schrägen, exakt 54,74° geneigten Seitenwänden.

Ist die Maskenöffnung breit genug und die Ätzzeit ausreichend lang, treffen sich die beiden {111}-Seitenwände nicht in einer Spitze, sondern das Ätzen erreicht zuerst eine flache {100}-Bodenfläche – es entsteht ein Trapez mit flachem Boden statt eines spitzen V-Grabens. Bei schmaler Öffnung oder kurzer Ätzzeit bleibt es bei der V-Form.

Anisotrope Ätzung von Silicium in alkalischer Lösung

Die {111}-Ebenen werden am langsamsten abgetragen und bilden die Flanken



(110)-Silicium: senkrechte Wände

Verwendet man stattdessen einen (110)-orientierten Wafer, dessen Oberfläche parallel zur {110}-Ebene liegt, ändert sich die Geometrie grundlegend: Die {111}-Ebenen stehen hier senkrecht zur Waferoberfläche. Eine rechteckige Maskenöffnung erzeugt deshalb einen Graben mit exakt senkrechten (90°) Seitenwänden statt der schrägen 54,74°-Flanken des (100)-Wafers.

Diese Eigenschaft macht (110)-Silicium interessant für Anwendungen, die hohe Aspektverhältnisse bei gleichzeitig einfachem Nassätzen benötigen – etwa schmale, tiefe Gräben, die mit einem (100)-Wafer wegen der schrägen Wände deutlich mehr Fläche beanspruchen würden. Der Nachteil: (110)-Wafer sind weniger verbreitet und in der Fertigung entsprechend teurer und schwerer zu beschaffen als der Standard-(100)-Wafer.