

Halbleitertechnologie von A bis Z

Mikromechanik

DRIE: Deep Reactive Ion Etching	3
<i>Die Grenzen des Nassätzens</i>	3
<i>Der Bosch-Prozess: Ätzen und Passivieren im Wechsel</i>	3
<i>Scallops: die charakteristische Wellenstruktur</i>	3
<i>Aspektverhältnis und Grenzen des Verfahrens</i>	4

DRIE: Deep Reactive Ion Etching

Die Grenzen des Nassätzens

Anisotropes KOH/TMAH-Ätzen liefert präzise, aber durch die Kristallstruktur fest vorgegebene Geometrien – bei (100)-Silicium immer den $54,74^\circ$ -Winkel, unabhängig davon, wie schmal oder tief die gewünschte Struktur eigentlich sein soll. Für viele MEMS-Anwendungen, etwa enge, senkrandige Gräben mit hohem Aspektverhältnis (Tiefe zu Breite), reicht diese Formfreiheit nicht aus.

DRIE (Deep Reactive Ion Etching) löst dieses Problem mit einem trockenen, plasmabasierten Verfahren, das nahezu beliebige laterale Geometrien mit nahezu senkrechten Wänden erzeugen kann – unabhängig von der Kristallorientierung des Substrats.

Der Bosch-Prozess: Ätzen und Passivieren im Wechsel

Das heute dominierende DRIE-Verfahren ist der nach seinem Erfinder benannte Bosch-Prozess. Er löst das grundlegende Dilemma des reaktiven Ionenätzens – hohe Ätzrate gegen hohe Anisotropie – durch schnellen Wechsel zweier Teilschritte. Im Ätzschritt greift ein Fluor-basiertes Plasma (meist SF_6) das Silicium isotrop an, also in alle Richtungen etwa gleich schnell, für wenige Sekunden. Im darauffolgenden Passivierungsschritt scheidet ein anderes Gas (meist C_4F_8 , chemisch verwandt mit Teflon) eine dünne, polymerartige Schutzschicht auf allen freiliegenden Flächen ab, auch auf dem Boden des gerade geätzten Grabens.

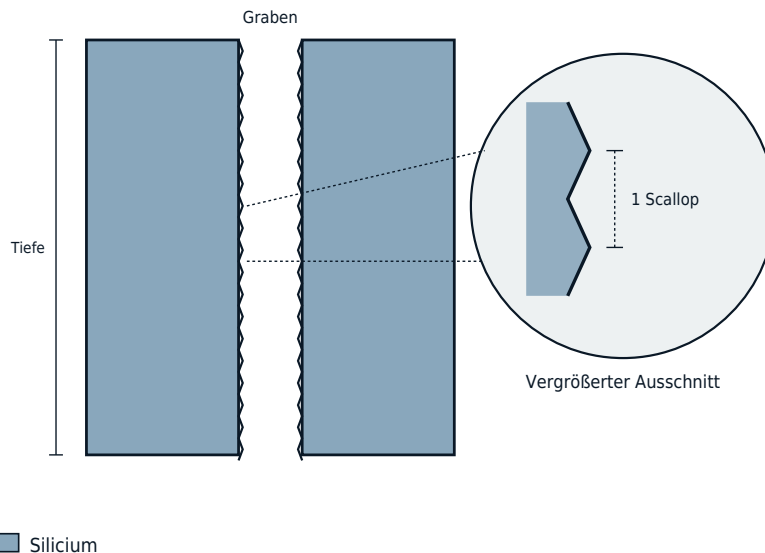
Im nächsten Ätzschritt trifft ein gerichteter Ionenbeschuss die Passivierungsschicht am Grabenboden stärker als an den Seitenwänden und entfernt sie dort bevorzugt, sodass das Ätzen am Boden weitergeht, während die Seitenwände geschützt bleiben. Dieser Zyklus aus Ätzen und Passivieren wiederholt sich hunderte bis tausende Male und treibt den Graben Schritt für Schritt in die Tiefe.

Scallops: die charakteristische Wellenstruktur

Weil jeder Ätzschritt kurz isotrop wirkt, bevor die neue Passivierungsschicht ihn stoppt, entsteht an den Seitenwänden keine perfekt glatte, sondern eine leicht wellige Oberfläche mit charakteristischen horizontalen Riffelungen – den sogenannten Scallops. Ihre Größe hängt direkt von der Dauer der einzelnen Ätz- und Passivierungsschritte ab: kürzere Zyklen erzeugen feinere, längere Zyklen gröbere Scallops, typischerweise im Bereich von 50 bis 500 Nanometern.

Für die meisten MEMS-Anwendungen sind Scallops unproblematisch, bei optischen Anwendungen (etwa Wellenleitern) oder Strukturen mit besonders hohen Anforderungen an die Oberflächengüte können sie jedoch störende Lichtstreuung verursachen und erfordern zusätzliche Glättungsschritte.

Scallops: die Wellenstruktur beim DRIE-Ätzen
Jeder Ätz-/Passivierungszyklus hinterlässt eine feine Riffelung



Kürzere Ätz-/Passivierungszyklen erzeugen feinere, längere Zyklen
größere Scallops (typisch 50 bis 500 Nanometer).

Aspektverhältnis und Grenzen des Verfahrens

DRIE erreicht routinemäßig Aspektverhältnisse von 20:1 bis 30:1, in Extremfällen auch deutlich mehr – ein enger, wenige Mikrometer breiter Graben kann damit hundert Mikrometer und tiefer werden, bei nahezu senkrechten Wänden.

Mit zunehmender Tiefe wird es jedoch schwieriger, sowohl reaktive Spezies als auch Ionen bis zum Grabenboden vordringen zu lassen – ein Effekt, der als RIE-Lag bekannt ist: Breitere Öffnungen ätzen schneller in die Tiefe als schmale, sodass Strukturen unterschiedlicher Breite auf demselben Wafer nach gleicher Prozesszeit unterschiedlich tief sind.