

Michael Köhler

# Atzverfahren für die Mikrotechnik

**WILEY-VCH**

Weinheim • New York • Chichester  
Brisbane • Singapore • Toronto

# Inhalt

Vorwort . . . . .	V
Inhaltsverzeichnis . . . . .	VII
Symbole und Formelzeichen . . . . .	XI
Abkürzungen . . . . .	XV
<b>1 Einführung . . . . .</b>	<b>1</b>
<b>2 Besonderheiten mikrotechnischer Ätzverfahren . . . . .</b>	<b>5</b>
2.1 Ätzen als formgebendes Verfahren . . . . .	5
2.1.1 Grenzen additiver mikrotechnischer Strukturierung . . . . .	6
2.1.2 Subtraktive Strukturierung . . . . .	7
2.2 Ätzrate und Selektivität . . . . .	9
2.2.1 Ätzrate und Zeitbedarf . . . . .	9
2.2.2 Der Ätzvorgang . . . . .	10
2.2.3 Transportprozesse . . . . .	11
2.2.4 Prozeßgeschwindigkeiten . . . . .	12
2.3 Isotropes und anisotropes Ätzen . . . . .	16
2.4 Flankengeometrie und Kantenrauigkeit . . . . .	20
2.4.1 Abweichung von der idealen Geometrie . . . . .	20
2.4.2 Flankengeometrie beim isotropen Ätzen . . . . .	20
2.4.3 Herstellung flacher Flankenwinkel durch isotropes Ätzen . . . . .	21
2.4.4 Flankengeometrie beim anisotropen Ätzen . . . . .	24
2.4.5 Einstellung der Flankengeometrie durch partiell anisotropes Ätzen . . . . .	25
2.5 Maßhaltigkeit . . . . .	26
2.6 Monitoring von Ätzprozessen . . . . .	29
<b>3 Naßätzverfahren . . . . .</b>	<b>33</b>
3.1 Abtrag an der Grenzfläche fest-flüssig . . . . .	33

## VIII *Inhalt*

3.2	Vorbereitung der Oberfläche . . . . .	35
3.2.1	Oberflächenbeschaffenheit . . . . .	35
3.2.2	Reinigung . . . . .	37
3.2.3	Digitales Ätzen . . . . .	39
3.3	Ätzen von dielektrischen Materialien . . . . .	40
3.3.1	Naßätzen durch physikalische Auflösung . . . . .	40
3.3.2	Naßchemisches Ätzen von Nichtmetallen . . . . .	43
3.4	Ätzen von Metallen und Halbleitern . . . . .	48
3.4.1	Außenstromloses Ätzen . . . . .	48
3.4.2	Selektivität beim außenstromlosen Ätzen . . . . .	62
3.4.3	Ätzen von Mehrschichtsystemen unter Bildung von Lokalelementen . . . . .	69
3.4.4	Geometrieabhängige Ätzraten . . . . .	72
3.4.5	Geometrieabhängige Passivierung . . . . .	79
3.4.6	Elektrochemisches Ätzen . . . . .	82
3.4.7	Photochemisches Naßätzen . . . . .	90
3.4.8	Photoelektrochemisches Ätzen (Photoelectrochemical Etching, PEC) . . . . .	92
3.5	Kristallografisches Ätzen . . . . .	96
3.5.1	Naßchemischer Materialabtrag an Einkristalloberflächen . . . . .	96
3.5.2	Anisotropes Ätzen von einkristallinen Metallen . . . . .	100
3.5.3	Anisotropes Ätzen von Silizium . . . . .	101
3.5.4	Anisotropes Elektrochemisches und photoelektrochemisches Ätzen . . . . .	113
3.5.5	Poröses Silizium . . . . .	114
3.5.6	Anisotropes Ätzen von Verbindungshalbleitern . . . . .	118
3.6	Herstellung freitragender Mikrostrukturen . . . . .	120
3.6.1	Oberflächenmikromechanik . . . . .	120
3.6.2	Substrat-Mikromechanik („Bulk-Mikromechanik“) . . . . .	123
3.6.3	Poröses Silizium als Opferschichtmaterial . . . . .	124
<b>4</b>	<b>Trockenätzverfahren . . . . .</b>	<b>127</b>
4.1	Abtrag an der Grenzfläche fest-gasförmig . . . . .	127
4.2	Plasmafreies chemisches Ätzen in der Gasphase . . . . .	133
4.2.1	Plasmafreies Trockenätzen mit reaktiven Gasen . . . . .	133
4.2.2	Photogestütztes Trockenätzen mit reaktiven Gasen . . . . .	135
4.2.3	Direktschreibende Mikrostrukturierung durch Laserscanning-Ätzen . . . . .	136
4.2.4	Elektronenstrahlgestütztes Dampfätzen . . . . .	138
4.3	Plasma-Ätzverfahren . . . . .	140
4.3.1	Materialabtrag durch Reaktionen mit Plasmaspezies . . . . .	140
4.3.2	Plasmaerzeugung . . . . .	143
4.3.3	Plasmaätzen im Rohrreaktor . . . . .	145

4.3.4	Plasmaätzen im Downstream-Reaktor . . . . .	147
4.3.5	Plasmaätzen im Pianarreaktor . . . . .	148
4.3.6	Magnetfeldgestütztes Plasmaätzen . . . . .	149
4.3.7	Plasmaätzen bei niedrigem Druck und hoher Ionendichte . . . . .	149
4.3.8	Ausbildung der Ätzstrukturen beim Plasmaätzen . . . . .	150
4.3.9	Geometrie-Einfluß auf das Plasmaätzen . . . . .	151
4.3.10	Plasma-Jet-Ätzen (Plasma Jet Etching; PJE) . . . . .	152
4.3.11	Anwendungen des Plasmaätzens . . . . .	153
4.4	Ätzen mit energetischen Teilchen . . . . .	157
4.4.1	Sputterätzen . . . . .	157
4.4.2	Reaktives Ionenätzen (Reactive Ion Etching; RIE) . . . . .	166
4.4.3	Magnetrongestütztes Reaktives Ionenätzen (Magnetic Field Enhanced Reactive Ion Etching; MERIE) . . . . .	172
4.4.4	Ionenstrahlätzen (Ion Beam Etching; IBE) . . . . .	172
4.4.5	Reaktives Ionenstrahlätzen (Reactive Ion Beam Etching; RIBE) . . . . .	178
4.4.6	Magnetfeldgestütztes reaktives Ionenstrahlätzen (Magnetic Field Enhanced Reactive Ion Beam Etching; MERIBE) . . . . .	179
4.4.7	Chemisch unterstütztes Ionenstrahlätzen (Chemical Assisted Ion Beam Etching; CAIBE) . . . . .	180
4.4.8	Reaktives Ätzen mit Anregung aus mehreren Quellen . . . . .	181
4.4.9	Elektronenstrahlgestütztes reaktives Ätzen (Electron Beam supported Reactive Etching; EBRE) . . . . .	181
4.4.10	Reaktives Ätzen mit fokussierten Ionenstrahlen (Focused Ion Beam Etching; FIB) . . . . .	183
4.4.11	Nanoteilchen-Strahl ätzen (Nano-particle Beam Etching; NPBE) . . . . .	184
4.4.12	Ausbildung der Strukturflanken-Geometrie beim Ionenstrahlätzen . . . . .	186
4.4.13	Materialschäden beim Ätzen mit energetischen Teilchen . . . . .	194
4.4.14	Anwendung der Ätzverfahren mit energetischen Teilchen . . . . .	196
<b>5</b>	<b>Mikroformgebung durch Ätzen von lokal verändertem Material . . . . .</b>	<b>199</b>
5.1	Prinzip der Formgebung durch lokale Materialveränderung . . . . .	199
5.2	Anorganische Resists . . . . .	200
5.3	Ätzen von photostrukturierbaren Gläsern . . . . .	201
5.4	Ätzen von Photoschädigungszonen . . . . .	202
5.5	Ätzen von Ionenstrahlschädigungszonen . . . . .	202
5.6	Teilchenspurätzen . . . . .	203
<b>6</b>	<b>Ausgewählte Vorschriften . . . . .</b>	<b>207</b>
6.1	Erläuterung zur Vorschriftensammlung . . . . .	207