

Michael Köhler

Ätzverfahren für die Mikrotechnik



WILEY-VCH

Weinheim • New York • Chichester
Brisbane • Singapore • Toronto

Inhalt

| | |
|---|-----------|
| Vorwort | V |
| Inhaltsverzeichnis | VII |
| Symbole und Formelzeichen | XI |
| Abkürzungen. | XV |
| 1 Einführung | 1 |
| 2 Besonderheiten mikrotechnischer Ätzverfahren | 5 |
| 2.1 Ätzen als formgebendes Verfahren | 5 |
| 2.1.1 Grenzen additiver mikrotechnischer Strukturerzeugung | 6 |
| 2.1.2 Subtraktive Strukturerzeugung | 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 |
| 3 Naßätzverfahren | 33 |
| 3.1 Abtrag an der Grenzfläche fest-flüssig. | 33 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 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 |
| 4 | Trockenätzverfahren | 127 |
| 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 Planarreaktor | 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-Strahlätzen (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 |
| 5 | Mikroformgebung durch Ätzen von lokal verändertem Material . . . | 199 |
| 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 |
| 6 | Ausgewählte Vorschriften | 207 |
| 6.1 | Erläuterung zur Vorschriftensammlung | 207 |

| | | |
|--------------------------------|-----------------------------------|---|
| Ag | GaN | Pd |
| Al | GaP | PSG (Phosphosilikatglas) |
| Al(Ti) | GaSb | Pt |
| (Al,Ga)As | Ge | RuO ₂ |
| (Al,Ga)P | Ge ₂ Si | Sb |
| (Al,Ga,In)P | Hf | Si |
| (Al,In)As | HgTe | SiC |
| AlInN | InAs | Si ₃ N ₄ |
| (Al,In)P | (In,Ga)N | SiO ₂ |
| AlN | InN | Si _x O _y N _z |
| Al ₂ O ₃ | InP | Sn |
| AsSG (Arsenosilikatglas) | InSb | SnO ₂ |
| Au | In ₂ Te ₃ | Ta |
| Bi | (In,Sn) | TaN |
| BSG (Borosilikatglas) | (In,Sn)O | Ta ₂ O ₅ |
| C (amorph) | (ITO, Indium-Zinn-Oxid) | TaSi ₂ |
| C (Diamant) | KTiOPO ₄ (KTP) | (Ta,Si)N |
| (C,H,(O,N))-Polymere | LiAlO ₂ | Te |
| CdS | LiGaO ₂ | Ti |
| CdTe | LiNbO ₃ | TiN |
| (Co,Cr) | Mg | TiO ₂ |
| (Co,Nb,Zr) | Mo | V |
| Co ₂ Si | MoSi ₂ | W |
| Cr | Nb | WO ₃ |
| Cu | NbN | WSi ₂ |
| Fe (Fe,C) | Ni | (Y,Ba)CuO ₂ (YBCO) |
| (Fe,Ni) | (Ni,Cr) | Zn |
| GaAs | Pb | ZnO |
| (Ga,In)As | PbS | ZnS |
| (Ga,In)P | (Pb,La,Zr)TiO ₃ (PLZT) | ZnSe |
| | (Pb,Zr)TiO ₃ (PZT) | |
