

Wolfgang Menz, Jürgen Mohr, Oliver Paul

Mikrosystemtechnik für Ingenieure

Dritte, vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage



**WILEY-
VCH**

WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA

Inhalt

Vorwort XV

1	Allgemeine Einführung in die Mikrostrukturtechnik	1
1.1	Was ist Mikrostrukturtechnik?	1
1.2	Von der Mikrostrukturtechnik zur Mikrosystemtechnik	9
2	Parallelen zur Mikroelektronik	15
2.1	Herstellung von Einkristallscheiben	15
2.1.1	Herstellung von Silizium-Einkristallen	17
2.1.1.1	Tiegelziehverfahren (Czochralski-Verfahren)	19
2.1.1.2	Zonenziehverfahren (Float-Zone-Verfahren)	21
2.1.1.3	Segregation	23
2.1.1.4	Weiterverarbeitung der Ingots	25
2.1.2	Herstellung von GaAs-Einkristallen	28
2.1.2.1	Bridgman- und Gradient-Freeze-Verfahren	28
2.1.2.2	LEC-Verfahren (Liquid Encapsulated Czochralski)	30
2.2	Technologische Grundprozesse	31
2.2.1	Herstellung eines integrierten Schaltkreises	33
2.2.1.1	Reinigung	33
2.2.1.2	Oxidation	34
2.2.1.3	Photolithographie	34
2.2.1.4	Ionenimplantation und Diffusion	35
2.2.1.5	Ätzen	35
2.2.1.6	Beschichtung	36
2.3	Weiterverarbeitung der integrierten Schaltungen	36
2.3.1	Anforderungen an die Aufbau- und Verbindungstechnik	37
2.3.2	Hybridtechniken	38
2.3.2.1	Dickschichttechnik	38
2.3.2.2	Bestücken und Löten der Schaltung	39
2.3.2.3	Montage und Kontaktierung ungehäuster Halbleiterbauelemente	40
2.4	Reinraumtechnik	41
2.4.1	Partikelmessung im Reinraum	45
2.5	Punktfehler und Ausbeute bei Halbleiterbauelementen	45

3	Physikalische und chemische Grundlagen der Mikrotechnik	49
3.1	Kristalle und Kristallographie	49
3.1.1	Gitter und Gittertypen	50
3.1.2	Stereographische Projektion	52
3.1.3	Silizium-Einkristall	56
3.1.4	Reziprokes Gitter und Kristallstrukturanalyse	58
3.2	Methoden zur Bestimmung der Kristallstruktur	65
3.2.1	Röntgenstrahlbeugung	65
3.2.2	Elektronenstrahlbeugung	67
3.3	Grundlagen der galvanischen Abscheidung	69
3.3.1	Phasengrenze Elektrode-Elektrolyt	72
3.3.1.1	Elektrisches und elektrochemisches Potential	72
3.3.2	Polarisation und Überspannung	75
3.3.3	Mechanismen der kathodischen Metallabscheidung	77
3.3.3.1	Migration	79
3.3.3.2	Diffusion	80
3.3.3.3	Konvektion	80
3.3.3.4	Stofftransportvorgänge während der Mikrogalvanoformung	83
3.4	Grundlagen der Vakuumtechnik	84
3.4.1	Mittlere freie Weglänge	84
3.4.2	Wiederbedeckungszeit	86
3.4.3	Geschwindigkeit von Atomen und Molekülen	87
3.4.4	Gasdynamik	89
3.4.5	Einteilung des technischen Vakuums	89
3.5	Vakuumerzeugung	91
3.5.1	Pumpen für Grob- und Feinvakuum	91
3.5.1.1	Verdrängervakuumpumpen	91
3.5.2	Hochvakuum- und Ultrahochvakuum-pumpen	93
3.5.2.1	Treibmittelvakuum-pumpen	95
3.5.2.2	Gas bindende Vakuum-pumpen (Sorptionspumpen)	96
3.6	Vakuummessung	99
3.6.1	Druckmessdose	99
3.6.2	Wärmeleitungsvakuummeter	99
3.6.3	Reibungsvakuummeter	100
3.6.4	Ionisationsvakuummeter mit unselbständiger Entladung (Glühkathode)	100
3.6.5	Ionisationsvakuummeter mit selbständiger Entladung (Penning-Prinzip)	101
3.6.6	Leckage und Lecksuche	102
3.7	Eigenschaften von Dünnschichten	103
3.7.1	Struktur-zonenmodelle	103
3.7.2	Haftfestigkeit der Schicht	106

4	Materialien der Mikrosystemtechnik	109
4.1	Materialeigenschaften	111
4.1.1	Thermische Eigenschaften	112
4.1.1.1	Wärmeleitfähigkeit	113
4.1.1.2	Spezifische Wärme	113
4.1.1.3	Latente Wärme	114
4.1.1.4	Wärmeausdehnungskoeffizient	114
4.1.2	Elektrische Eigenschaften	115
4.1.2.1	Elektrische Leitfähigkeit	115
4.1.2.2	Dielektrische Konstante	116
4.1.2.3	Thermoelektrizität	116
4.1.2.4	Piezoresistivität	117
4.1.3	Mechanische Eigenschaften	119
4.2	Kunststoffe	120
4.2.1	Ordnung der Makromoleküle	121
4.2.2	Polymere für die Lithographie	122
4.2.3	Flüssigkristalle	124
4.2.4	Flüssigkristalline Polymere	125
4.2.5	Gele	127
4.2.6	Elektorrheologische Flüssigkeiten	129
4.3	Halbleiter	131
4.4	Keramiken	134
4.4.1	Keramik als Substrat	134
4.4.2	Keramik als Material für Aktoren	135
4.4.3	Keramik als Material für Gassensoren	135
4.5	Metalle	136
4.5.1	Magnetostriktive Metalle	137
4.5.2	Anwendungen der Magnetostriktion	139
4.5.3	Formgedächtnis-Legierungen	140
4.5.3.1	Einwegeffekt	141
4.5.3.2	Zweiwegeffekt	142
4.5.3.3	Unterdrücktes Formgedächtnis	143
4.5.3.4	Einsatz als Aktoren	144
4.5.3.5	Herstellung	144
4.5.3.6	Eigenschaften der Formgedächtnislegierungen	145
5	Basistechnologien der Mikrotechnik	147
5.1	Schichtabscheidung	147
5.1.1	Physikalische Beschichtungstechniken	147
5.1.1.1	Aufdampfen	147
5.1.1.2	Sputtern (Kathodenzerstäuben)	151
5.1.1.3	Ionenplattieren	153
5.1.2	Chemische Beschichtungstechniken	154
5.1.2.1	CVD-Verfahren	154
5.1.2.2	Epitaxie	160

VIII | Inhalt

- 5.1.2.3 GaAs-Epitaxie 163
- 5.1.2.4 Plasmapolymerisation 163
- 5.2 Schichtmodifikation 164
 - 5.2.1 Thermische Oxidation 164
 - 5.2.2 Diffusion 165
 - 5.2.3 Ionenimplantation 167
- 5.3 Schichtabtragung (Ätzen) 168
 - 5.3.1 Physikalische und chemische Trockenätzverfahren 170
 - 5.3.1.1 Plasmaquellen 172
 - 5.3.1.2 Charakteristika der rein physikalischen Ätzprozesse 173
 - 5.3.1.3 Kombination chemischer und physikalischer Ätzprozesse 178
 - 5.3.1.4 Charakteristika des reaktiven Ionen- und Ionenstrahlätzens 180
 - 5.3.1.5 Das rein chemische Ätzen 181
 - 5.4 Analyse von Dünnschichten und Oberflächen 184
 - 5.4.1 Elektronenstrahl-Mikroanalyse (Electron Probe Microanalysis, EPM) 185
 - 5.4.2 Auger-Elektronenspektroskopie (AES) 186
 - 5.4.3 Photoelektronenspektroskopie (Electron Spectroscopy for Chemical Analysis, ESCA) 187
 - 5.4.4 Sekundärionen-Massenspektrometrie (SIMS) 188
 - 5.4.5 Sekundär-Neutralteilchen-Massenspektrometrie (SNMS) 188
 - 5.4.6 Ionen-Streuspektroskopie (ISS) 189
 - 5.4.7 Rutherford-Rückstreuungsspektroskopie (Rutherford Backscattering Spectroscopy, RBS) 189
 - 5.4.8 Rastertunnelmikroskop (Atomic Force Microscope, AFM) 190
- 6 Lithographie 191**
 - 6.1 Überblick und Historie 191
 - 6.2 Resists 196
 - 6.3 Verfahren der Lithographie 198
 - 6.3.1 Computer Aided Design (CAD) 199
 - 6.3.1.1 CAD-Entwurf 200
 - 6.3.1.2 Justiermarken und Teststrukturen 202
 - 6.3.1.3 Organisation des Entwurfs (Hierarchie, Layers) 203
 - 6.4 Elektronenstrahlolithographie 205
 - 6.4.1 Gauß'scher Strahl 206
 - 6.4.2 Geformter Strahl 211
 - 6.4.3 Postprozessor 213
 - 6.5 Proximity-Effekt 214
 - 6.6 Optische Lithographie 216
 - 6.6.1 Masken 217
 - 6.6.2 Schattenprojektion 218
 - 6.6.3 Abbildende Projektion 221
 - 6.6.3.1 Ganzscheiben-Belichtung 222
 - 6.6.3.2 Moderne Lithographiemaschinen 223

6.7	Weiterentwicklungen	224
6.7.1	Phasenmasken	224
6.7.2	Spezielle Resisttechnologien	225
6.7.3	Optische Lithographie für die Mikrostrukturtechnik	226
6.8	Ionenstrahlithographie	231
6.9	Röntgenlithographie	232
6.9.1	Masken für die Röntgenlithographie	233
6.9.2	Röntgenlichtquellen	234
6.9.3	Synchrotronstrahlung	235
6.9.4	Einsatz der Röntgenlithographie	240
7	Silizium-Mikromechanik	241
7.1	Siliziumtechnologie	242
7.1.1	IC-Prozesse und -Substrate	243
7.1.2	Foundry-Technologien	247
7.2	Silizium-Bulk-Mikromechanik	248
7.2.1	Einleitung	248
7.2.1.1	Ätzrate und Anisotropie	250
7.2.1.2	Selektivität	251
7.2.1.3	Prozesskompatibilität	251
7.2.1.4	Einfachheit der Verwendung und Sicherheit	252
7.2.1.5	Kosten	253
7.2.2	Nasschemisches Ätzen	253
7.2.2.1	HNA-Ätzlösungen	253
7.2.2.2	Alkalihydroxid-Ätzlösungen	255
7.2.2.3	Ammoniumhydroxid-Ätzlösungen	259
7.2.2.4	Ethylendiamin-Brenzkatechin-Ätzlösungen	260
7.2.3	Grundlegende Ätzformen	261
7.2.3.1	Ätzgruben und -gräben	262
7.2.3.2	Membranen	264
7.2.3.3	Mesas und Spitzen	264
7.2.3.4	Cantilever	265
7.2.3.5	Brücken	267
7.2.4	Ätzkontrolle	268
7.2.4.1	Ätzstoppmechanismen	268
7.2.4.2	Elektrochemisches Siliziumätzen	271
7.2.4.3	Elektrochemische Siliziumporosifizierung	273
7.2.5	Charakterisierung von anisotropen Nassätzmitteln	274
7.2.6	Trockenätzen	276
7.2.6.1	XeF ₂ -Ätzen	276
7.2.6.2	Fertigung von Mikrostrukturen mit hohem Aspektverhältnis	279
7.2.6.3	Anwendungen von trockenem Siliziumätzen	281
7.3	Oberflächenmikromechanik	285
7.3.1	Polysilizium-Mikromechanik	287
7.3.2	Opferaluminium-Mikromechanik	290

x | *Inhalt*

- 7.3.3 Opferpolymer-Mikromechanik 292
- 7.3.4 Sticking 293
- 7.4 Mikrowandler und -systeme in der Siliziumtechnologie 294
- 7.4.1 Mechanische Bauteile und Systeme 295
- 7.4.1.1 Drucksensoren 296
- 7.4.1.2 Beschleunigungssensoren 298
- 7.4.1.3 Drehratensensoren 300
- 7.4.1.4 Stresssensoren 302
- 7.4.2 Thermische Mikrobauteile und -systeme 304
- 7.4.2.1 Temperaturmessung 304
- 7.4.2.2 Durchflusssensoren 308
- 7.4.2.3 Vakuum- und Drucksensoren 311
- 7.4.3 Komponenten und Systeme für Strahlungssignale 313
- 7.4.3.1 Ungekühlte Infrarotdetektoren 313
- 7.4.3.2 Thermische Szenensimulatoren 316
- 7.4.3.3 Lichtschalter 316
- 7.4.4 Magnetische Bauteile und Systeme 319
- 7.4.5 Chemische Mikrosensoren 321
- 7.4.5.1 Mikrofluidische Komponenten und Systeme 324
- 7.4.6 Mikromechanische Bauteile für die Signalverarbeitung 326
- 7.5 Zusammenfassung und Ausblick 328

- 8 LIGA-Verfahren 329**
- 8.1 Überblick 329
- 8.2 Maskenherstellung 331
- 8.2.1 Prinzipieller Aufbau einer Maske 331
- 8.2.1.1 Absorber 331
- 8.2.1.2 Trägerfolie 332
- 8.2.2 Herstellung der Trägerfolien 334
- 8.2.3 Strukturierung des Resists für Röntgenzwischenmasken 335
- 8.2.3.1 Optische Lithographie 335
- 8.2.3.2 Direkte Elektronenstrahlolithographie 336
- 8.2.3.3 Reaktives Ionenätzen 337
- 8.2.3.4 Vergleich der Strukturierungsmethoden zur Herstellung von Zwischenmasken 337
- 8.2.4 Goldgalvanik für Röntgenmasken 337
- 8.2.5 Herstellung von Arbeitsmasken 339
- 8.2.6 Justieröffnungen in Röntgenarbeitsmasken 340
- 8.3 Röntgentiefenlithographie 341
- 8.3.1 Herstellung von dicken Resistschichten 341
- 8.3.1.1 Strahleninduzierte Reaktionen und Entwicklung des Resists 343
- 8.3.2 Anforderungen an die absorbierte Strahlendosis 347
- 8.3.3 Einflüsse auf die Strukturqualität 350
- 8.3.3.1 Fresnel-Beugung, Photoelektronen 351
- 8.3.3.2 Divergenz der Strahlung 353

- 8.3.3.3 Neigung der Absorberwände zum Strahl 354
- 8.3.3.4 Fluoreszenzstrahlung aus der Maskenmembran 354
- 8.3.3.5 Erzeugung von Sekundärelektronen aus der Haft- und Galvanikstartschicht 354
- 8.3.3.6 Quellen des Resists 356
- 8.4 Galvanische Abscheidung 356
- 8.4.1 Galvanische Abscheidung von Nickel für die Mikrostrukturherstellung 357
- 8.4.2 Formeinsatzherstellung für die Mikroabformung 361
- 8.4.3 Galvanische Abscheidung weiterer Metalle und Legierungen 362
- 8.5 Kunststoffabformung im LIGA-Verfahren 364
- 8.5.1 Herstellung von Mikrostrukturen im Reaktionsgießverfahren 365
- 8.5.2 Herstellung von Mikrostrukturen im Spritzgießverfahren 368
- 8.5.3 Herstellung von Mikrostrukturen im Heißprägeverfahren 374
- 8.5.4 Herstellung von metallischen Mikrostrukturen aus abgeformten Kunststoffstrukturen (zweite Galvanoformung) 377
- 8.5.4.1 Zweite Galvanoformung geprägter Mikrostrukturen 377
- 8.5.4.2 Zweite Galvanoformung mit Hilfe einer metallischen Angussplatte 377
- 8.5.4.3 Zweite Galvanoformung mit Hilfe elektrisch leitfähiger Kunststoffe 379
- 8.5.4.4 Zweite Galvanoformung durch Beschichtung der Kunststoffstrukturen 381
- 8.6 Variationen und ergänzende Schritte des LIGA-Verfahrens 382
- 8.6.1 Opferschichttechnik 382
- 8.6.2 3D-Strukturierung 385
- 8.6.2.1 Gestufte Strukturen 385
- 8.6.2.2 Geneigte Strukturen 387
- 8.6.2.3 Konische Strukturen und Strukturen mit sphärischer Oberfläche 388
- 8.6.2.4 Herstellung von Strukturen mit beweglicher Maske 389
- 8.6.3 Herstellung Licht leitender Strukturen durch Abformung 391
- 8.7 Protonenlithographie (DLP) – ein weiteres Strukturierungsverfahren zur Herstellung von Mikrostrukturen mit großem Aspektverhältnis 394
- 8.8 Anwendungsbeispiele 399
- 8.8.1 Starre metallische Mikrostrukturen 400
- 8.8.1.1 Filter für das Ferne Infrarot 400
- 8.8.1.2 Mikrospulen 401
- 8.8.1.3 Mikrozahnräder, Mikrogetriebe 403
- 8.8.2 Bewegliche Mikrostrukturen, Mikrosensoren, Mikroaktoren 403
- 8.8.2.1 Beschleunigungssensoren 404
- 8.8.2.2 Elektrostatischer Linearantrieb 406
- 8.8.2.3 Elektromagnetischer Linearaktor 407
- 8.8.2.4 Mikroturbine, Strömungssensoren, Mikrofräser 412

8.8.2.5	Mikromotoren	413
8.8.3	Fluidische Mikrostrukturen	416
8.8.3.1	Mikrostrukturierte Fluidplatten	416
8.8.3.2	Mikropumpen nach dem LIGA-Verfahren	416
8.8.3.3	Mikrofluidische Schalter	416
8.8.3.4	Mikrofluidische Linearaktoren	418
8.8.4	LIGA-Strukturen für optische Anwendungen	419
8.8.4.1	Einfache optische Elemente – Linsen, Prismen	420
8.8.4.2	Mikrooptische Bank	422
8.8.4.3	Mikrooptische Bänke mit Aktoren	426
8.8.4.4	Funktionsmodule mit optisch aktiven Elementen – modulares Aufbaukonzept	429
9	Alternative Verfahren der Mikrostrukturierung	437
9.1	Ultrapräzisionsmikrobearbeitung	438
9.1.1	Anwendungsbeispiele	443
9.1.1.1	Mikrowärmeüberträger	443
9.1.1.2	Mikroreaktoren	445
9.1.1.3	Retrospiegel	446
9.1.1.4	Mikropumpen	447
9.2	Mikrofunkenerosion (von R. Förster)	448
9.2.1	Physikalisches Prinzip	448
9.2.1.1	Aufbauphase	450
9.2.1.2	Entladephase	451
9.2.1.3	Abbauphase	451
9.2.2	Funkenerosive Bearbeitung keramischer Werkstoffe	452
9.2.2.1	Siliziuminfiltriertes Siliziumcarbid (SiSiC)	453
9.2.2.2	Siliziumnitrid (Si ₃ N ₄)	454
9.2.2.3	Elektrisch nicht leitfähige Keramiken	454
9.2.3	Verfahrensvarianten	455
9.2.3.1	Funkenerosives Senken	455
9.2.3.2	Funkenerosives Schneiden	456
9.2.4	Anwendungsbeispiele	459
9.3	Präzisionselektrochemische Mikrobearbeitung (von R. Förster)	461
9.3.1	Vorgänge im Bearbeitungsspalt	462
9.3.1.1	Spannungsabfall	462
9.3.1.2	Anodische Metallauflösung	464
9.3.2	Elektrolytlösungen	466
9.3.2.1	Kenngrößen der Elektrolytlösungen	468
9.3.3	Untersuchungen verschiedener Werkstoffe	469
9.3.3.1	Eisen, Eisenlegierungen und Stähle	469
9.3.3.2	Titan und Titanlegierungen	470
9.3.3.3	Hartmetalle	470
9.3.4	ECM-Senken mit oszillierender Werkzeugelektrode	471
9.3.4.1	Prozesskenngrößen	471

9.3.4.2	Darstellung der Vorgänge im Arbeitsspalt	472
9.3.4.3	Werkzeugelektrodenwerkstoffe	473
9.3.5	Elektrochemische Bearbeitungsverfahren in der Mikro- systemtechnik	474
9.3.5.1	Elektrochemisches Mikrobohren	474
9.3.5.2	Elektrochemisches Mikrodrahtschneiden	474
9.3.5.3	Elektrochemisches Mikrofräsen	475
9.3.5.4	Weitere Anwendungsbeispiele des Verfahrens in der Mikro- systemtechnik	476
9.4	Replikationstechniken	478
9.4.1	Spritzgießen	478
9.4.2	Heißprägen	480
9.5	Laserunterstützte Verfahren	482
10	Aufbau- und Verbindungstechniken	485
10.1	Hybridtechniken	486
10.1.1	Substrate und Pasten	486
10.1.2	Schichterzeugung	489
10.1.2.1	Trocknen und Einbrennen der Pasten	490
10.1.3	Bestücken und Löten der Schaltung	490
10.1.4	Montage und Kontaktierung ungehäuster Halbleiter- bauelemente	493
10.2	Drahtbondtechniken	493
10.2.1	Thermokompressionsdrahtbonden (Warmpressschweißen)	494
10.2.2	Ultraschalldrahtbonden (Ultraschallschweißen)	495
10.2.3	Thermosonicdrahtbonden (Ultraschallwärmeschweißen)	495
10.2.4	Ball-Wedge-Bonden (Kugel-Keil-Schweißen)	496
10.2.5	Wedge-Wedge-Bonden (Keil-Keil-Schweißen)	497
10.2.6	Vor- und Nachteile der einzelnen Drahtbondverfahren	498
10.2.7	Prüfverfahren und Alternativen	499
10.3	Alternative Kontaktierungstechniken	500
10.3.1	TAB-Technik	500
10.3.2	Flip-Chip-Technik	501
10.3.3	Entwicklung neuer Kontaktierungssysteme	503
10.4	Kleben	503
10.4.1	Isotropes Kleben	504
10.4.2	Anisotropes Kleben	505
10.5	Anodisches Bonden	507
11	Systemtechnik	511
11.1	Definition eines Mikrosystems	511
11.2	Sensoren	513
11.3	Aktoren	517
11.4	Signalverarbeitung	519
11.4.1	Signalverarbeitung für Sensoren in Mikrosystemen	519

XIV | *Inhalt*

11.4.2	Neuronale Datenverarbeitung für Sensorarrays	523
11.5	Schnittstellen eines Mikrosystems	528
11.5.1	IE-Übertragung	531
11.5.1.1	Elektrische Mikro-/Makroankopplungen	531
11.5.1.2	Optische Mikro-/Makroankopplungen	533
11.5.1.3	Lichtwellenleiter-Ankopplungen	533
11.5.1.4	Mechanische Mikro-/Makroankopplungen	533
11.5.1.5	Ultraschallübertragung	534
11.5.2	S-Übertragung	535
11.5.2.1	Fluidische Mikro-/Makroankopplungen	535
11.5.2.2	Fluidische Mikrokomponenten	535
11.6	Entwurf, Simulation und Test von Mikrosystemen	537
11.7	Modulkonzept der Mikrosystemtechnik	540

Literatur 545

Stichwortverzeichnis 565