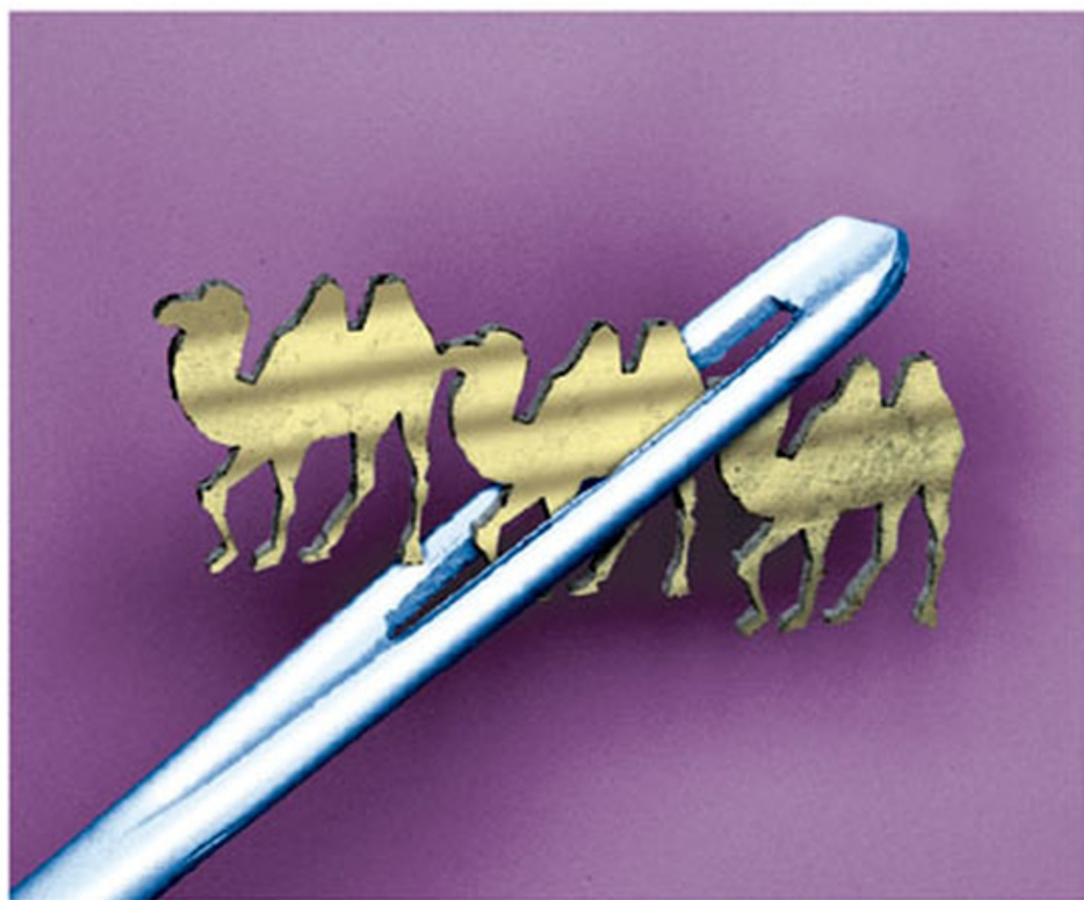


Wolfgang Menz, Jürgen Mohr,
Oliver Paul

 WILEY-VCH

Mikrosystemtechnik für Ingenieure

Dritte, vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage



W. Menz, J. Mohr, O. Paul

Mikrosystemtechnik für Ingenieure

Weitere interessante Titel zu diesem Thema:

O. Brand, G.K. Fedder (Volume Editors)

CMOS-MEMS

(Vol. 2)

2005

ISBN 3-527-31080-0

H. Baltes, O. Brand, G.K. Fedder, C. Hierold, J.G. Korvink, O. Tabata
(Volume Editors)

Enabling Technology for MEMS and Nanodevices

(Vol. 1)

2004

ISBN 3-527-30746-X

M. Köhler, W. Fritzsche

Nanotechnology

An Introduction to Nanostructuring Techniques

2004

ISBN 3-527-30750-8

J. Marek, H.-P. Trah, Y. Suzuki, I. Yokomori (Volume Editors)

Sensors for Automotive Technology

2003

ISBN 3-527-29553-4

J.G. Korvink, A. Greiner

Semiconductors for Micro- and Nanotechnology

An Introduction for Engineers

2002

ISBN 3-527-30257-3

W. Menz, J. Mohr, O. Paul

Microsystem Technology

2000

ISBN 3-527-29634-4

Wolfgang Menz, Jürgen Mohr, Oliver Paul

Mikrosystemtechnik für Ingenieure

Dritte, vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage



**WILEY-
VCH**

WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA

Autoren

Prof. Wolfgang Menz

Institut für Mikrosystemtechnik IMTEK
Albert-Ludwigs-Universität
79110 Freiburg

Dr. Jürgen Mohr

Institut für Mikrotechnik
Forschungszentrum Karlsruhe
76201 Karlsruhe

Prof. Oliver Paul

Institut für Mikrosystemtechnik IMTEK
Albert-Ludwigs-Universität
79110 Freiburg

Titelbild:

Ein biblisches Problem ist mit Hilfe der Mikrosystemtechnik gelöst, denn es heißt in Matthäus, Kap. 19, Vers 24: Es ist leichter, dass ein Kamel durch ein Nadelöhr gehe, als dass ein Reicher ins Reich Gottes komme.

Die Kamelkarawane wurde aus 0,5 mm starkem Stahlblech mittels funkenerosiven Schneidens auf einer Drahterodiermaschine Charmilles Robofil-2020SI mit einem Draht von 50 µm Durchmesser ausgeschnitten. Die Struktur hat eine Höhe von 2 mm.

■ Alle Bücher von Wiley-VCH werden sorgfältig erarbeitet. Dennoch übernehmen Autoren, Herausgeber und Verlag in keinem Fall, einschließlich des vorliegenden Werkes, für die Richtigkeit von Angaben, Hinweisen und Ratschlägen sowie für eventuelle Druckfehler irgendeine Haftung.

1. Auflage 1992
2. Auflage 1997
3. Auflage 2005

Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <<http://dnb.ddb.de>> abrufbar

© 2005 WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim

Alle Rechte, insbesondere die der Übersetzung in andere Sprachen, vorbehalten. Kein Teil dieses Buches darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages in irgendeiner Form – durch Photokopie, Mikroverfilmung oder irgendein anderes Verfahren – reproduziert oder in eine von Maschinen, insbesondere von Datenverarbeitungsmaschinen, verwendbare Sprache übertragen oder übersetzt werden. Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen, Handelsnamen oder sonstigen Kennzeichen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass diese von jedermann frei benutzt werden dürfen. Vielmehr kann es sich auch dann um eingetragene Warenzeichen oder sonstige gesetzlich geschützte Kennzeichen handeln, wenn sie nicht eigens als solche markiert sind.

Printed in the Federal Republic of Germany
Gedruckt auf säurefreiem Papier

Cover Design SCHULZ Grafik-Design,
Fußgönheim

Satz K+V Fotosatz GmbH, Beerfelden

Druck betz-druck GmbH, Darmstadt

Bindung J. Schäffer GmbH, Grünstadt

ISBN-13: 978-3-527-30536-0

ISBN-10: 3-527-30536-X

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	Wärmeleitungs-vakuummeter	99
3.6.3	Reibungs-vakuummeter	100
3.6.4	Ionisations-vakuummeter mit unselbständiger Entladung (Glühkathode)	100
3.6.5	Ionisations-vakuummeter 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

- 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 Ionenstrahlolithographie 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

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	Prozesskenngößen	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	Thermokompressionsdrahtbonds (Warmpressschweißen)	494
10.2.2	Ultraschalldrahtbonds (Ultraschallschweißen)	495
10.2.3	Thermosonicdrahtbonds (Ultraschallwärmeschweißen)	495
10.2.4	Ball-Wedge-Bonds (Kugel-Keil-Schweißen)	496
10.2.5	Wedge-Wedge-Bonds (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

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
-----------------------------	-----

Vorwort

Es ist heutzutage keine leichte Aufgabe, ein Buch über Mikrosystemtechnik zu schreiben, da die Technologie so rasant fortschreitet und ständig neue Varianten veröffentlicht werden. Wollte man aktuell bleiben, so müsste man das Manuskript ständig umschreiben, bevor es überhaupt gedruckt werden könnte. Hinzu kommt noch ein weiterer Grund, der die Herausgabe eines solchen Buches erschwert: Die Mikrosystemtechnik breitet sich mit großer Geschwindigkeit über immer neue Anwendungsgebiete aus. Waren es gestern Anwendungen in der allgemeinen Messtechnik z. B. auf dem Kraftfahrzeugsektor, so dominieren heute Problemlösungen in der minimal-invasiven Chirurgie oder der biochemischen DNA-Analyse. Da die Mikrosystemtechnik längst die Grenzen der Halbleitertechnologie überschritten hat, schien es uns angebracht, das Kapitel „Alternative Technologien“ zu erweitern. Wir freuen uns, dass wir für die Abschnitte „Mikrofunkenerosion“ und „Präzisions-Elektrochemische Mikrobearbeitung“ Herrn Dr. Ralf Förster, einen bekannten Fachmann auf diesem Gebiet, gewinnen konnten.

Es war nicht unsere Intention, als wir uns daran machten, dieses Buch zu schreiben, die neuesten Ergebnisse der Forschung und Entwicklung zu präsentieren; das soll den Proceedings der entsprechenden Fachkonferenzen vorbehalten bleiben. Stattdessen wollten wir dem Studierenden und dem interessierten Ingenieur ein Buch an die Hand geben, das die notwendigen Grundlagen vermittelt und die grundsätzlichen Techniken zur Mikrostrukturierung beschreibt. Insbesondere lag uns daran, aufzuzeigen, wie sich diese Technologie aus der Mikroelektronik entwickelte, indem sie die Grenzen der Elektronik überschritt und neue physikalische, chemische und biologische Bereiche eroberte. Damit lassen sich Systeme aufbauen, die vielleicht einmal die wirtschaftlichen Erfolge der Mikroelektronik in den Schatten stellen.

Der Lehrstoff dieses Buches ist in vielen Vorlesungen an der Universität Karlsruhe, der ETH Zürich und schließlich am Institut für Mikrosystemtechnik (IMTEK) der Universität Freiburg an zahlreichen Studentengenerationen erprobt und optimiert worden. Nach einer englischen und einer chinesischen Übersetzung des Buches liegt nun die deutsche Version in der dritten Auflage vor. Wir hoffen, mit diesem Buch einen wertvollen Beitrag zur Proliferation dieses faszinierenden Gebietes hinzufügen zu können.

Es bleibt uns die angenehme Pflicht, den vielen Studenten, Kollegen und Mitarbeitern zu danken, die mit Beiträgen, Vorschlägen und konstruktiver Kritik zu diesem Projekt beigetragen haben.

Freiburg, im März 2005

Wolfgang Menz
Jürgen Mohr
Oliver Paul

1

Allgemeine Einführung in die Mikrostrukturtechnik

1.1

Was ist Mikrostrukturtechnik?

Mit der Mikrosystemtechnik verlässt der Mensch die ihm gewohnten Dimensionen des „Begreifbaren“ und begibt sich auf ein Gebiet, das nicht mehr seinen natürlichen Sinnesempfindungen entspricht. Er muss lernen, mit diesen neuen Möglichkeiten zu arbeiten, wohl seine Erfahrungen einzubringen, aber der neuen Technologie nicht unbedacht aufzuzwingen. Diese Entwicklung setzte bereits mit der Mikroelektronik ein, nur ist die Elektronik von sich aus schon für den normalen Menschen „abstrakt“, und der Konflikt mit der persönlichen Erfahrung entstand erst bei der Auseinandersetzung mit mechanischen Mikrostrukturen.

Die Mikrosystemtechnik ist heutzutage in aller Munde. Leider trägt diese Tatsache nicht zur Versachlichung bei, sondern hat im Gegenteil zur Folge, dass die Begriffe häufig unklar erscheinen und Missverständnisse nicht ausbleiben. Zunächst soll der grundsätzliche Unterschied zwischen Mikrostrukturtechnik und Mikrosystemtechnik näher erläutert werden, obwohl eigentlich schon die Wortwahl Verwechslungen ausschließen sollte.

Die Mikrostrukturtechnik ist das Werkzeug, mit dem die geometrischen Strukturen eines Körpers, dessen Dimensionen im Mikrometerbereich liegen, erzeugt werden. In einigen Fällen erstreckt sich der Körper nur in *einer* Dimension im Bereich weniger Mikrometer, während die beiden anderen gar im Millimeterbereich liegen, in anderen Fällen bewegt man sich schon im „Submikrometerbereich“. Wesentlich sind weniger die aktuellen Dimensionen als die Technologie, die von der Mikroelektronik abgeleitet ist und das Potential beinhaltet, in den Mikrometerbereich zu gehen. Wenn schon die „Mikrotechnik“ schwierig zu definieren ist, so ergeben sich bei der „Nanotechnik“ noch mehr Definitionsnöte. Sicherlich wäre es falsch, von Nanotechnik zu reden, wenn man eine Struktur darstellt, deren Dimensionen Bruchteile von Mikrometern ausmachen. Auch hier ist wieder von der Technologie auszugehen, die es ermöglicht, Nanostrukturen herzustellen oder zu vermessen. Diese Technologie hat wieder ganz andere Wurzeln und es wäre falsch, anzunehmen, dass die eine Technologie kontinuierlich in die andere überginge.

Mit Hilfe der Mikrostrukturtechnik besteht also die Möglichkeit, Mikrokörper oder Mikrokomponenten zu erzeugen. Tatsache ist, dass in den meisten Fällen, wenn von Mikrosystemtechnik gesprochen wird, in Wirklichkeit Mikrostrukturtechnik gemeint ist. Mikrosystemtechnik bedeutet dann konsequenterweise die Verknüpfung von Komponenten zu einem System. Ein Beispiel aus der Mikroelektronik soll dies verdeutlichen: Die intelligente Verknüpfung von Hunderten oder Tausenden von „dummen“ Transistoren führt zum Mikrosystem, dem Mikroprozessor, der erst die Leistungsfähigkeit der Mikroelektronik ausmacht.

In diesem Buch sollen also zunächst die Grundlagen der Mikrostrukturtechnik behandelt werden, bevor in weiteren Kapiteln die Mikrosysteme und die dazu notwendigen technologischen Voraussetzungen diskutiert werden.

Eine grundsätzliche Frage zur Mikrosystemtechnik soll an den Anfang des Buches gestellt werden:

Aus welchem Grund wurde die Mikrosystemtechnik entwickelt?

Zur Beantwortung dieser Frage ist es notwendig, sich mit der Entwicklung der Mikroelektronik während der letzten fünf Jahrzehnte auseinanderzusetzen. Was ist während dieser Zeit geschehen? Vor der Mikroelektronik gab es konventionelle elektrische und elektronische Bauelemente, wie Widerstände, Kondensatoren, Elektronenröhren. Diese Komponenten wurden zu Schaltkreisen zusammengefügt, geprüft und durch Veränderung der Komponentenparameter abgeglichen, bis die Schaltung die geforderte Spezifikation erfüllte. Dadurch wurde jede Schaltung zu einer Art Unikat. Durch die Größe der individuellen Bauelemente war die Packungsdichte begrenzt und die Funktionsdichte einer elektronischen Schaltung war es ebenfalls.

Mit der Mikroelektronik trat ein einschneidender Wandel in der Elektronik ein. Bauteile wurden nicht mehr mechanisch hergestellt und gefügt, sondern durch Photolithographie auf das Werkstück, den Siliziumwafer, optisch übertragen und vervielfacht. Bemerkenswert ist die Tatsache, dass durch die optische Abbildung nur zweidimensionale Strukturen übertragen werden können. Zunächst sieht das wie ein schwerwiegender Nachteil für die Technologie aus, weil wir es gewohnt sind, dreidimensional zu konzipieren, zu entwerfen und zu fertigen. Da die optischen Abbildungen uns aber die Möglichkeit bieten, zum einen Strukturen zu übertragen, deren Strukturdetails im Wesentlichen nur durch die Wellenlänge des Lichtes limitiert sind, zum anderen wegen der Verschleißfreiheit der optischen Abbildungen mit extrem hoher Wiederholgenauigkeit zu arbeiten und wegen der Parallelität der optischen Übertragung außerdem sehr hohe Informationsflüsse zu erreichen, wird dieser Nachteil durch die technologischen Vorteile bei weitem aufgewogen.

Im Laufe der letzten Jahrzehnte der Entwicklung der Mikroelektronik konnten so die Dimensionen der Bauelemente um Zehnerpotenzen verringert werden. Heute befindet man sich mit den kritischen Dimensionen weit im Submikrometerbereich. Da im Fertigungsprozess in einem „Batch“, also mit einer Charge von Wafern, auf denen sich jeweils viele Millionen von Transistoren befinden, viele integrierte Schaltungen parallel hergestellt werden, konnte man die Herstell-

kosten wegen der Erhöhung der Packungsdichte um mehrere Zehnerpotenzen senken. Ein wichtiges Qualitätsmerkmal einer Schaltung, wie sie etwa für einen Rechner gebraucht wird, ist die Schaltgeschwindigkeit. Durch die Verkürzung der internen Leitungswege konnte auch dieser Parameter um viele Größenordnungen verbessert und damit die Qualität eines integrierten Schaltkreises erhöht werden.

Heutzutage beherrscht die Mikroelektronik unser Leben. Alle technischen Bereiche wurden wesentlich durch die Mikroelektronik bereichert, zum Teil überhaupt erst möglich gemacht. Für die Entwicklung unserer Zivilisation zur „Informationsgesellschaft“ hat die Mikroelektronik die Voraussetzungen geschaffen. Diese Einflüsse lassen sich schwerlich in Zahlen fassen. Für die technologische Entwicklung der Mikroelektronik soll ein kleines Gedankenexperiment dienen: Definiert man etwa einen Bewertungsfaktor, der aus dem Produkt „Qualitätsverbesserung“ und „Kostenreduzierung“ über eine gewisse Zeitspanne, etwa vier Jahrzehnte, gebildet wird, so wäre dieser Faktor in der Mikroelektronik etwa 10000000. Nun nehme man zum Vergleich irgendeine andere Technologie, etwa die Stahlgewinnung oder den Fahrzeugbau, so kann man den gewaltigen Unterschied zu dieser Entwicklung ermessen.

Die Frage lag nun auf der Hand, wenn die Mikroelektronik derartige Erfolge zu verzeichnen hat, kann man diese Entwicklung nicht auch auf anderen, nichtelektronischen Bereichen nachvollziehen und ähnliche technologische Schübe erwarten? Kann man die Entwicklungskonzepte, die Prozesse, die Materialien nicht auch auf mechanische, optische, fluidische oder chemische und biochemische Verhältnisse übertragen? Diese Fragestellung schließlich hat zur Mikrosystemtechnik geführt. Es lässt sich also konstatieren:

Die Mikrosystemtechnik kann als die konsequente Weiterentwicklung der Mikroelektronik auf nichtelektronische Gebiete angesehen werden.

Die Mikrosystemtechnik baut also auf dem gewaltigen technologischen und theoretischen Erfahrungsschatz der Mikroelektronik, die diese in mehreren Jahrzehnten mit hohem Aufwand erarbeitet hat, auf. Viele Technologien, die uns heute eine Selbstverständlichkeit sind, wurden mit hohem finanziellen und personellen Aufwand von der wirtschaftlich blühenden Mikroelektronik entwickelt. An hervorragender Stelle steht hier die Photolithographie, von der an zahlreichen Stellen in diesem Buch noch die Rede sein wird. Aber auch die Dünnschichttechnik, die Oberflächenanalyse und die Simulation sind Bereiche, die entscheidende Impulse aus der Mikroelektronik gewonnen haben.

Um auf diesen Erfahrungen eine neue Technologie aufbauen zu können, ist es zunächst nötig, die grundlegende „Philosophie“ der Mikroelektronik zu ergründen, oder, um es mit einfachen Worten zu sagen, die „Erfolgsrezepte“ der Mikroelektronik zu definieren, um sie, entsprechend modifiziert, auch für andere Technologien nutzbar zu machen.

Dazu lassen sich aus der Vielzahl von Verfahren und Denkansätzen drei Schwerpunkte herauschälen, die im Folgenden näher erläutert werden sollen.

Der Entwurf eines integrierten Schaltkreises geschieht ausschließlich auf dem Rechner. Das traditionelle Vorgehen, sich durch Versuch, Abprüfung und

Wiederholung (trial and error) iterativ an eine optimale Lösung heranzuarbeiten, lässt sich wirtschaftlich in der Mikroelektronik nicht mehr vertreten. Diese Entwicklungsstufe muss durch aufwendige Entwurfs- und Simulationsverfahren bereits auf dem Rechner geleistet werden. In der Tat wird eine Schaltung (zumindest eine digitale Schaltung) nach der Entwurf- und Optimierungsphase auf dem Rechner bereits beim ersten Fertigungslauf die vorbestimmten Parameter erfüllen, wenn es sich um einen etablierten Prozess handelt. Nur in wenigen Fällen bedarf es eines zweiten Fertigungsdurchlaufes, um das Produkt zu optimieren. Die Simulationsprogramme sind mit großem Aufwand in vielen Tausenden von Personen-Jahren entwickelt worden. Bemerkenswert und neu ist hierbei auch, dass Erkenntnisse der theoretischen Physik, die Quantenmechanik, unmittelbar in die Produktgestaltung einfließen. Nirgendwo sonst kommen naturwissenschaftliche Grundlagenforschung und Fertigungsgestaltung in so engen Kontakt wie in der Mikroelektronik. Ein Begriff, der diesen Zustand beispielhaft beschreibt, ist das „band gap engineering“, ein Vorgang also, bei dem sich Erkenntnisse der theoretischen Festkörperphysik und ingenieurmäßiges Fertigungswissen unmittelbar berühren.

Man kann also als ersten Schwerpunkt der Mikroelektronik den Entwurf, die Simulation und die Optimierung eines Produktes auf dem Rechner benennen.

Ein weiterer Schwerpunkt betrifft die Realisierung der auf dem Rechner ermittelten Struktur auf dem Werkstück. Die Übertragung der geometrischen Daten geschieht hier auf optischem Wege. Die Vorteile dabei sind: Die Übertragung ist verschleißfrei und unterliegt dadurch keiner Abnutzung. Durch die Abbildung lassen sich die Strukturen in einem Maße verkleinern, das nur durch die Wellenlänge des verwendeten Lichtes und durch Fehler des übertragenden optischen Systems begrenzt ist.

Diese optische Übertragung oder „Photolithographie“ (das Wort ist angelehnt an eine alte Drucktechnik, bei der ein glatt geschliffener Stein (griech.: $\lambda\theta\theta\sigma$) entsprechend geätzt wird, so dass er an bestimmten Teilen Druckfarbe annimmt, an anderen diese abstößt) hat wohl den größten technologischen Einfluss auf die Mikroelektronik, wenn man einmal von der Herstellung des Grundmaterials, dem Silizium-Einkristall, absieht.

Durch die Verkleinerung der Strukturen bis in den Submikrometerbereich lässt sich die Packungsdichte von Komponenten, die pro Flächeneinheit auf dem Werkstück unterzubringen sind, gegenüber konventionellen Techniken der Übertragung um viele Größenordnungen erhöhen. Dadurch ist es erklärlich, dass trotz steigender Prozesskosten die Kosten für das Einzelelement ständig gesenkt werden konnten. Gelingt es, durch Verbesserung der Photolithographie die linearen Dimensionen zu halbieren, kann man auf dem Substrat viermal so viele Strukturen herstellen und parallel prozessieren. Selbst wenn sich die Aufwendungen für die Photolithographie dabei um den Faktor drei erhöhen, hat man unter dem Strich für die Fertigung einen Gewinn erzielt. Neben diesem Kostenvorteil bringt die Miniaturisierung aber auch einen wesentlichen Qualitätsvorteil. Integrierte Schaltungen werden im Allgemeinen an ihrer Funktionsdichte und ihrer Schaltgeschwindigkeit gemessen. Durch die Miniaturisierung werden die elektrischen

Wege innerhalb der Schaltung entsprechend verkürzt, was sich unmittelbar auf die Geschwindigkeit der Signalverarbeitung auswirkt. Eine einfache Rechnung zeigt, dass bereits die freie Lichtgeschwindigkeit 0,3 mm pro Pikosekunde beträgt. Die Laufwege pro Pikosekunde eines Signals auf einer mit Kapazitäten und Induktivitäten behafteten Leitung sind aber noch wesentlich kürzer und kommen in die geometrischen Dimensionen der Schaltung selbst.

Die optische Abbildung bedeutet eine parallele Informationsübertragung. Mit einem hochwertigen Objektiv, wie es in der Lithographie verwendet wird, lassen sich Strukturen mit Minimalabmessungen von $0,13 \mu\text{m}$ über ein Feld von 1 cm^2 übertragen, das entspricht einem parallelen Fluss von $5 \cdot 10^9$ Pixel. Der Vorgang der Übertragung ist dabei natürlich unabhängig davon, welche Muster übertragen werden. Eine komplexe Struktur benötigt keinen höheren Aufwand als eine einfache, solange man die Minimalabmessungen einer gegebenen Technologie nicht unterschreitet. Gelingt es also, durch geschickten Entwurf Strukturen ineinander zu verschachteln, hat man damit Packungsdichte ohne zusätzlichen technologischen Aufwand gewonnen.

Eine Einschränkung bildet die optische Übertragung zunächst in ihrer Zweidimensionalität. Da die Abbildung stets eine begrenzte Tiefenschärfe aufweist, sind alle übertragenen Muster zweidimensional. Eine mikroelektronische Schaltung mag sich mehrere Millimeter oder gar Zentimeter lateral – also in x- und y-Richtung – ausdehnen, in z-Richtung, d. h. in die Tiefe, erstreckt sie sich nur selten über $10 \mu\text{m}$ hinaus. Man kann also mit gutem Recht behaupten, dass die gesamte Mikroelektronik quasizweidimensional ist. Sicherlich kann man mit weiteren Verfahren erreichen, dass eine Schaltung aus mehreren Ebenen übereinander aufgebaut ist, das ändert aber nichts an der Tatsache, dass die Strukturen im Prinzip nur zweidimensional übertragen werden. Das ist eigentlich verwunderlich, verzichtet man doch hier gegenüber der konventionellen Elektronik auf $1/3$ der Gestaltungsmöglichkeiten. Dennoch hat die optische Übertragung der Strukturen derartige Vorteile, dass dieser Nachteil um ein Vielfaches kompensiert werden kann. Die eindrucksvolle Überlegenheit der Mikroelektronik sei hier Beweis genügt.

Der zweite Schwerpunkt der Mikroelektronik ist daher zweifelsfrei die Anwendung der Photolithographie.

Durch die hohe Packungsdichte der Bauelemente auf dem Wafer unterliegen nun Millionen von Strukturelementen genau den gleichen Prozessbedingungen. Dadurch ist wiederum die Fertigungsstreuung sehr klein. Prozesse, die im Laufe der Entwicklung immer aufwendiger wurden, lassen sich durch das Herunterbrechen auf Millionen von Bauelemente auf einem Wafer kostenmäßig abfangen oder gar überkompensieren. Durch geringe Fertigungsstreuung und hohe Ausbeute lassen sich wiederum die Prozesse immer besser beschreiben und simulieren. Dadurch werden die Aussagen, die man mit den Software-Werkzeugen zum Entwurf der Schaltungen machen kann, besser und realistischer, so dass sich hier der Kreis wieder schließt.

Den dritten Schwerpunkt bilden also die Fertigungsverfahren, die gleichzeitig auf viele Wafer angewendet werden (Batch-Verfahren).

Was hat sich nun parallel zur Fertigungstechnologie grundsätzlich in der Entwicklungsphilosophie der Elektronik auf ihrem Wege zur Mikroelektronik verändert? An die Stelle der Vielfalt individueller Bauelemente sind wenige, standardisierte, eng tolerierte Baugruppen getreten, wobei allerdings durch Fokussierung der Forschungs- und Entwicklungsarbeiten auf diese vergleichsweise wenigen Standardtypen die Leistungsmerkmale gegenüber konventionellen Grundschaltungen um Größenordnungen gesteigert werden konnten.

Durch geeignete, rechnergestützte Auswahl und Verknüpfung von Bausteinen aus Bibliotheken lassen sich diese Grundbausteine zu fast beliebig komplexen Schaltungen kombinieren. Durch Verbesserung der Design-Werkzeuge, ebenso wie durch ständige Erhöhung der Qualität der Bauelemente können heute Funktionen, die noch vor wenigen Jahren technisch nicht möglich waren, dargestellt werden. Als Beispiel seien nur die Personal Computer angeführt, die die Leistungsfähigkeit von Großrechnern der siebziger Jahre bereits um viele Größenordnungen übertreffen.

Die gleichen grundlegenden Konzepte der Mikroelektronik liegen nun auch der Mikrostrukturtechnik zugrunde. Wir haben hierbei den großen Vorteil, aus dem riesigen Technologievorrat der Mikroelektronik schöpfen zu können. Wenn auch einige Prozesse neu entwickelt werden mussten, kann doch im Wesentlichen auf den theoretischen und technologischen Grundlagen, die mit der Mikroelektronik erarbeitet wurden, aufgebaut werden.

Zusammenfassend kann man also für die Mikrostrukturtechnik fordern:

Die Mikrostrukturtechnik muss, um ähnlich erfolgreich wie die Mikroelektronik zu sein, dem Pfad folgen, der von dieser vorgezeichnet wurde.

Auch in der Mikrostrukturtechnik muss also die Entwicklungsphilosophie heißen:

- Bereitstellung leistungsfähiger Software-Entwicklungswerkzeuge für Mikrokomponenten; Entwicklung, Simulation und Optimierung der Strukturen auf dem Rechner; Vermeidung unnötiger Prozessdurchläufe.
- Übertragung der auf dem Rechner entwickelten Strukturen auf das Werkstück mittels Photolithographie; Nutzung der Möglichkeiten hoher Packungsdichte und Verkleinerung der Strukturen.
- Fertigung im Nutzen mit engen Fertigungstoleranzen durch präzise Prozesssteuerung und Prozessüberwachung.
- Entwicklung weniger, durchkonstruierter Grundstrukturen, die durch hohe Packungsdichte und Miniaturisierung kostengünstig auf dem gleichen Substrat vervielfältigt werden können und durch geeignete Verknüpfung zu einem „intelligenten“ System zusammengefügt werden können.

Natürlich führt das – ebenso wie seinerzeit in der Elektronik – zu einem völligen Umdenken in der Sensorik, der Aktorik, in der Feinwerktechnik und schließlich auch im Maschinenbau.

Wenn sich auch die Verfahren der Mikrostrukturtechnik aus guten Gründen eng an die der Mikroelektronik anlehnen, so waren doch einige Modifikationen nötig, die von der Mikroelektronik nicht geleistet werden konnten, um vor allem die dritte Dimension für die geometrischen Mikrokörper zu erschließen. Es mussten also Verfahren entwickelt werden, die trotz Nutzung der Photolithographie die Herstellung dreidimensionaler Körper ermöglichen. Das hat im Laufe der Jahre zu mehreren Varianten geführt, deren zwei wichtigste an dieser Stelle nur kurz skizziert werden sollen, da jede von ihnen ein ganzes Kapitel dieses Buches füllt.

Die *Silizium-Mikromechanik* folgt in jeder Beziehung sehr eng der Mikroelektronik. Es werden nicht nur sehr ähnliche Herstellungsprozesse übernommen, auch der Silizium-Einkristall ist hier wie dort das Grundmaterial für die Mikrostruktur. Als maßgeblicher Entwickler dieses Verfahrens ist hier K. E. Petersen, damals Mitarbeiter von IBM, zu nennen, der bereits Anfang der 1980er Jahre darüber eine grundlegende Veröffentlichung geschrieben hat: „Silicon as Mechanical Material“ [Pete82]. Zur Erschließung der dritten Dimension wurde ein anisotropes Ätzverfahren entwickelt, mit dem man subtraktiv den Einkristall bearbeiten kann, um zur gewünschten Form zu kommen. Spezielle Ätzlösungen tragen das Material des Einkristalls anisotrop, also entsprechend der Kristallmorphologie, ab. Durch so genannte Resistmasken werden Teile der Siliziumoberfläche dem Ätzmittel ausgesetzt, um so zur gewünschten Geometrie zu kommen. Außerdem können in den Kristall künstliche Schichten eingebracht werden, die als zusätzliche Ätzstoppschichten dienen. An dieser Ebene bleibt der Ätzvorgang stehen. Durch Anwendung geeigneter Ätzmasken, Ätzstoppschichten und den Einsatz von isotropen und anisotropen Ätzlösungen können fast beliebige dreidimensionale Strukturen aus der Siliziumscheibe herausgearbeitet werden. Diese bilden dann die Basiselemente für Sensoren, Aktoren oder sonstige Komponenten (Abb. 1.1-1). Der besondere Vorteil der Silizium-Mikromechanik liegt in der Möglichkeit, durch Kombination von Ätzverfahren und den üblichen Prozessen der Mikroelektronik auf dem gleichen Substrat sowohl Mikrostrukturkörper (z. B. Sensorelemente) als auch passende elektronische Auswerteschaltungen unterzubringen [Heub89].

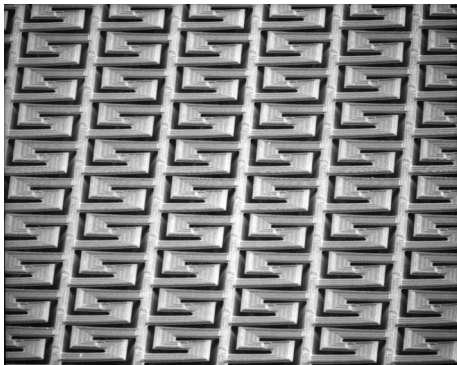


Abb. 1.1-1 Beispiel einer dreidimensionalen Mikrostruktur in Silizium. Bei dem gezeigten Objekt handelt es sich um ein Array von CMOS-compatiblen thermoelektrischen Infrarot-Detektoren (siehe Kap. 7).

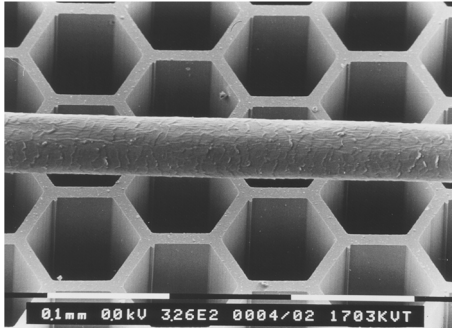


Abb. 1.1-2 Mikrostruktur in LIGA-Technik, die als mechanischer Filter verwendet werden kann. Die „Schlüsselweite“ der Löcher beträgt $80\ \mu\text{m}$, die Wandstärke ist $8\ \mu\text{m}$ bei einer Strukturhöhe von ca. $200\ \mu\text{m}$. Zum Größenvergleich dient ein menschliches Haar (siehe Kap. 8).

Das zweite wichtige Strukturierungsverfahren stellt das so genannte *LIGA-Verfahren* dar, das im Kernforschungszentrum Karlsruhe (heute Forschungszentrum Karlsruhe) unter der Leitung von Erwin Becker am Institut für Kernverfahrenstechnik (heute Institut für Mikrostrukturtechnik) und von Wolfgang Ehrfeld als maßgeblichem Wissenschaftler zu Beginn der achtziger Jahre entwickelt wurde, um damit Komponenten zur Isotopentrennung von Uranhexafluorid UF_6 herstellen zu können [Beck86].

Die Abb. 1.1-2 zeigt eine Anordnung identischer geometrischer Formen, die als mechanischer Filter verwendet werden kann. Dieser Mikrokörper wurde im LIGA-Verfahren hergestellt, einem Strukturierungsverfahren, das auf den Grundprozessen Röntgen-Lithographie, Galvanik und Abformung beruht und das Inhalt des Kapitels 8 ist. Eine auf dem Rechner erzeugte Struktur wird mittels eines Elektronenstrahlschreibers auf eine Maske übertragen, die Struktur dieser Maske wird durch paralleles Röntgenlicht (Synchrotronstrahlung) als „Schattenwurf“ auf eine für diese Strahlung empfindliche Kunststoffschicht abgebildet. Durch die geringe Absorption der Röntgenstrahlung an diesen Kunststoffschichten dringt die Strahlung ohne merkliche Streuung tief in die Schicht ein, so dass Schichtdicken von mehreren hundert Mikrometern ohne Strukturverfälschung „belichtet“ werden können. Im Gegensatz dazu werden in der Mikroelektronik bei der Photolithographie mit Licht im sichtbaren Bereich oder im nahen Ultraviolett nur Schichtdicken von weniger als einem Mikrometer des photoempfindlichen Materials (so genannter Photoresist) verwendet. Der parallele Strahlengang der Röntgenquelle und die extreme Schichtdicke lassen die Fertigung von Strukturen mit einem Aspektverhältnis (d.h. Verhältnis von Strukturhöhe zu kleinstmöglicher lateraler Struktur) von über 100 zu. In der Mikroelektronik sind dagegen Aspektverhältnisse um 1 üblich.

In diesem ersten Schritt erhalten wir also einen Strukturkörper mit den Lateralkstrukturen der Maske und einer Strukturhöhe, die durch die Schichtdicke des Resists vorgegeben ist. In weiteren Verfahrensschritten kann die so erzeugte Struktur galvanisch mit Metall aufgefüllt werden. Wird der verbliebene Kunststoff aus der Metallstruktur herausgelöst, so erhält man das negative Abbild der Struktur in Metall. Diese Metallstruktur dient als Abformwerkzeug für weitere Kopien der Mikrostruktur mittels Spritzguss oder durch Prägeverfahren.

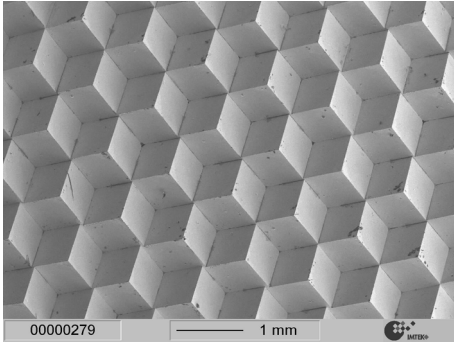


Abb. 1.1-3 Beispiel einer Struktur, die in mechanischer Mikrofertigung hergestellt wurde, und als Werkzeug zum Heißprägen lichtoptischer Reflektoren dient (siehe Kap. 9).

Neben diesen beiden grundsätzlichen Verfahren gibt es eine Vielzahl von Varianten, in denen Teilschritte der oben genannten Fertigungstechnologien verwendet werden und die für spezielle Anwendungen ihre besonderen Vorzüge haben. Auch diese alternativen Verfahren werden in diesem Buch ausführlich besprochen (siehe Kap. 9). An dieser Stelle sei als ein Beispiel die mechanische Mikrofertigung (Abb. 1.1-3) genannt [Bier89]. In eine ebene Metalloberfläche wird mit einem entsprechend geformten Diamanten ein Mikroprofil in die Oberfläche gefräst. Durch die Herstellung regelmäßiger Strukturen und durch geeignetes Stapeln mikrogeformter Folien lassen sich relativ kostengünstig dreidimensionale Mikrostrukturkörper aufbauen [Bier90]. So unterschiedlich auch die Herstellungsmethode gegenüber den beiden vorgenannten Verfahren ist, so können doch Teilschritte der anderen Verfahren angewendet werden, wie etwa das galvanische Auffüllen der Strukturen zur Herstellung eines Abformwerkzeuges für die Mengenfertigung von Mikrokörpern durch Spritzguss oder Heißprägen.

1.2

Von der Mikrostrukturtechnik zur Mikrosystemtechnik

Die bisher beispielhaft gezeigten Strukturen wären technologisch nur von mäßigem Interesse, wäre nicht das Potential der Integration zu einem System, also zur Mikrosystemtechnik, gegeben. Erst dann kann sich die Mikrosystemtechnik zu ihrer vollen Leistungsfähigkeit entwickeln. Als Beispiel gelte hier wiederum die Mikroelektronik, bei der die Erfindung des Transistors zwar die grundlegende Voraussetzung für wirtschaftlichen Erfolg war, als Triebfeder der ganzen Technologie aber erst die Entwicklung des Mikroprozessors wirkte. Auch in der Mikrosystemtechnik ist die Herstellung von Mikrokomponenten die Basis, auf der die Systemtechnik aufbaut. Würde man allerdings auf diesem Stadium stehen bleiben, bliebe die Technologie auf den Ersatz konventioneller Komponenten beschränkt. Von einer technologischen Revolution könnte man in diesem Falle sicher nicht sprechen. Erst die Integration mehrerer Sensoren zu einem Array, die Verknüpfung mit Aktoren und die Steuerung aller Vorgänge durch ei-

ne leistungsfähige Signalverarbeitung an Ort und Stelle macht aus einer Menge „dummer“ Komponenten ein „intelligentes“ System.

Mikrokörper, die mit den Mitteln der Mikrostrukturtechnik gefertigt wurden, müssen auf einem gemeinsamen Substrat zueinander gefügt werden. Zunächst soll nur das rein mechanische Befestigen einer Struktur auf einem geeigneten Träger betrachtet werden. Dies ist kein triviales Problem, denkt man etwa an die optische Nachrichtentechnik. Eine Monomode-Glasfaser langzeitstabil und kostengünstig zu einem optoelektronischen Bauteil auf Bruchteile eines Mikrometers genau auszurichten, ist ein komplexes Problem, zu dessen Lösung eine kostenintensive Entwicklung nötig war. Ein anderes Problem stellt die Verbindung zweier Komponenten mit unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten dar.

In der Sensorik besteht ein spezielles Problem darin, zum einen den mechanisch empfindlichen Mikrostrukturkörper vor Beschädigung und korrosivem Einfluss zu schützen, andererseits aber die physikalische oder chemische Größe, die der Sensor erfassen soll, möglichst verlust- und störfrei an das Sensorelement heranzuführen, also den Sensor möglichst intensiv der Umwelt auszusetzen. Die Aufbau- und Verpackungstechnik spielt insbesondere in der Mikrosystemtechnik eine Schlüsselrolle, wie später an vielen Beispielen zu sehen sein wird.

Neben dem rein mechanischen Aufbau besteht ein Mikrosystem aber auch aus einer Vielzahl von Schnittstellen zwischen den einzelnen Komponenten oder von der makroskopischen Außenwelt zum Mikrosystem und umgekehrt. Diese Schnittstellen sind von unterschiedlichster Art. Die elektrische Schnittstelle, die in der Mikroelektronik vorherrscht, ist nur eine unter vielen anderen. Nur für diese hält die Mikroelektronik auch Verfahren bereit, wie das Lötten, das Drahtbonden, die TAB-Technik (TAB=Tape Automated Bonding) oder das Flip-Chip-Verfahren. Gerade weil das Mikrosystem aber über die Elektronik hinausgeht, müssen auch optische, mechanische, fluidische oder akustische Schnittstellen betrachtet werden. Die Techniken hierfür sind zum Teil noch nicht entwickelt. Sie unterscheiden sich von den elektrischen Schnittstellen so sehr, dass es angebracht ist, einen neuen Namen dafür zu finden, da der Begriff „Schnittstelle“ eigentlich von der Mikroelektronik mit ihrer elektrischen Verbindungstechnik besetzt ist. Ein Vorschlag wäre, den Begriff „Koppelstelle“ einzuführen.

Eine wichtige Methode für den mechanischen Schutz der empfindlichen Mikrostrukturen ist das Abdecken mit einer Glasplatte. Ein geeignetes Verfahren hierfür ist das Anodische Bonden. Die zu fügenden Oberflächen (vorzugsweise Silizium und Glas) werden in engen Kontakt zueinander gebracht. Durch Erwärmung auf etwa 400 °C und mit Hilfe eines elektrischen Feldes werden Ionen im Dielektrikum des Glases irreversibel verschoben. Die dabei auftretenden elektrostatischen Kräfte sind groß genug, die beiden Oberflächen dauerhaft zusammenzuhalten und im Endeffekt eine chemische Bindung einzuleiten.

Mit den vorgestellten Verfahren sind die technologischen Voraussetzungen geschaffen, Mikromechanik, Mikrooptik, Mikrofluidik usw. und Mikroelektronik

monolithisch oder in Hybridlösungen zu komplexen Systemen zu integrieren und damit ein Tor aufzustoßen für grundlegend neue Konzepte der Sensorik, der Mess- und Regeltechnik, der Kommunikationstechnik, der Umwelt- und Medizintechnik und anderer Anwendungen, die vielleicht noch nicht einmal angedacht wurden.

Bisher war von den technologischen Voraussetzungen, die für die Realisierung eines Mikrosystems gegeben sind, die Rede. Im Folgenden soll nun die Bedeutung diskutiert werden, welche die Informatik und die Softwareentwicklung in der Mikrosystemtechnik spielen werden.

Die wohl wichtigste Eigenschaft eines Mikrosystems ist die Möglichkeit, statt eines individuellen Sensors ein ganzes Array von Sensoren mit hoher Packungsdichte und geringen Kosten zu fertigen. Während ein konventioneller Aufbau den analogen Messwert eines Sensors verstärkt und am Ausgang des Verstärkers zur Weiterverarbeitung „abliefern“, hat das intelligente System die Fähigkeit, die Signale mehrerer Sensoren parallel aufzunehmen und bereits an Ort und Stelle aufzubereiten. Jeder Sensor besitzt Querempfindlichkeiten auch für Einflussgrößen, die nicht gemessen werden sollen. Ein Drucksensor etwa hat meist auch einen Temperatursgang. In einem Sensorarray lassen sich unerwünschte Einflussgrößen herausrechnen, wenn es gelingt, für jeden einzelnen Sensor des Arrays den Einfluss der Querempfindlichkeiten mathematisch zu beschreiben. Die Aufgabe für den Mikrocomputer, der eine notwendige Komponente des Mikrosystems darstellt, besteht nun darin, ein n -dimensionales Gleichungssystem mit m Unbekannten zu lösen, wenn n die Anzahl der unterschiedlichen Sensoren und m die Zahl der erfassten Einflussgrößen (Messparameter) ist. In vielen Fällen wird allerdings die Qualität einer Messung schon signifikant erhöht, wenn es gelingt, die ein oder zwei einflussreichsten Störgrößen herauszurechnen.

Mit dem gleichen Ansatz könnte man auch die Selektivität eines Sensorsystems verbessern. Hätte beispielsweise ein Gassensor die Aufgabe, ein Gas komplexer Zusammensetzung in geringer Konzentration zu detektieren, so würde ein einzelner Sensor, etwa ein CHEMFET (=Chemical Field Effect Transistor), dieser Aufgabe im Allgemeinen nicht gerecht werden können. Ein ganzes Array von CHEMFETs mit jeweils unterschiedlicher Selektivität der Einzelelemente könnte durch geeignete Verknüpfung und unter Anwendung geeigneter Algorithmen zur Mustererkennung jedoch eine solche Aufgabe lösen. Das Besondere dieses Sensorsystems wäre zudem, dass es bei unveränderter Hardwarekonfiguration in der Lage wäre, nacheinander unterschiedliche Gase mit hoher Trennschärfe zu detektieren.

Die Kombination von Sensorelementen mit Analog-digital-Wandlung der Messwerte, einem Mikroprozessor und einer Schnittstelle nach außen ist also wesentliche Voraussetzung für ein Mikrosystem. Andere Komponenten, wie Multiplexer, ROM und RAM, vervollständigen die Systemfähigkeiten (Abb. 1.2-1).

Mit Hilfe eines eingespeicherten Kennfeldes entfällt der kostenintensive Laserabgleich des Sensors bei Erstbetrieb und beim Ersatz eines Sensorelementes. Alterungsvorgänge können durch die aufgezeichnete „thermische Historie“ des Sensors festgestellt und kompensiert werden. Aus mehreren gleichartigen Sensoren

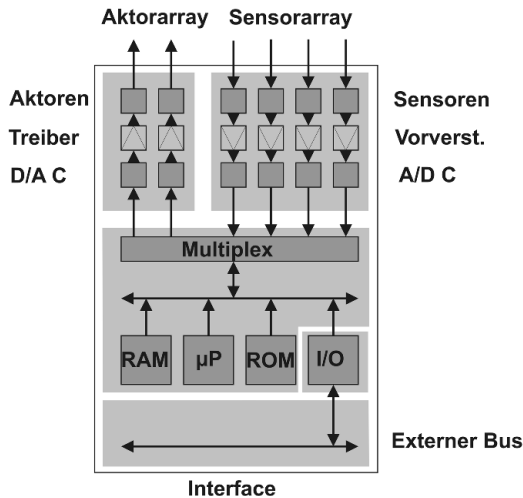


Abb. 1.2-1 Prinzipieller Aufbau eines Mikrosystems. Die Hauptbereiche gliedern sich in Sensorarray, Aktorarray, Signalverarbeitung, Speicher und Schnittstellen nach außen.

lassen sich Mittelwerte bilden, mit „gestuften“ Sensoren kann der jeweils optimale Empfindlichkeitsbereich ausgewählt werden, mit statistischen Methoden ist es möglich, die Messwerte „vor Ort“ zu interpretieren und zu gewichten. Mit Mikroaktoren, die wiederum auf die Sensoren einwirken, lassen sich rückgekoppelte und bewegungskompensierte physikalische Messsysteme verwirklichen.

Die Liste der Möglichkeiten ließe sich noch beliebig fortsetzen, würde aber den Rahmen dieser Einführung sprengen. Dennoch soll an dieser Stelle die Adaptionsfähigkeit eines solchen intelligenten Systems an eine gestellte Aufgabe noch einmal gesondert hervorgehoben werden. Das Mikrosystem kann sich damit einer zunächst unbekanntem Umgebung anpassen, ohne dass es eines Eingriffs von außen bedürfte. Diese Eigenschaft wäre bei Anwendungen zur Umweltüberwachung, bei Explorationsaufgaben, bei Weltraummissionen und bei medizinischen Implantaten von großem Vorteil.

In vielen Fällen muss ein Mikrosystem mit anderen Systemen kommunizieren können. Es besteht also für das Mikrosystem die Aufgabe, Daten senden und empfangen zu können. Diese Daten müssen fehlertolerant in zum Teil stark gestörter Umgebung übermittelt werden. Von Bedeutung ist auch die Kompatibilität mit anderen Systemen oder einem übergeordneten Rechner, mit dem das System kommuniziert. Mit Simulationsmethoden ist zu prüfen, ob das System das Zusammenspiel mit seiner Umgebung beherrscht und nicht etwa in undefinierte (chaotische) Zustände läuft.

Welche Aufgaben stellt nun die Mikrosystemtechnik an die Informatik? Wichtige Voraussetzungen für die Konzeption eines Mikrosystems sind die Systemspezifikation und die Simulation der Eigenschaften auf dem Rechner. Sind diese Eigenschaften nicht oder nicht in dem gewünschten Maße zu realisieren, muss man das Systemkonzept variieren, bis man iterativ das optimale Konzept gefunden hat.