

6	Mikrosenzory – mechanická doména.....	105
6.1	Základní pojmy a rozdělení.....	105
6.2	Mechanické vlastnosti křemíkových mikrostruktur	106
6.3	Mikrosenzory pro měření mechanického namáhání a síly	107
6.3.1	Mikrosenzory pro měření mechanického napětí – mikrotenzometry	110
6.3.2	Mikrosenzory pro měření silového namáhání	115
6.4	Tlakové mikrosenzory.....	119
6.4.1	Piezoodporové tlakové senzory	120
6.4.2	Kapacitní tlakové senzory	122
6.4.3	Kapacitní tlakový senzor se strukturou MOS – PSIGFET (PRESSFET).....	126
6.4.4	Piezoelektrické tlakové mikrosenzory.....	128
6.5	Akcelerometry – mikrosenzory zrychlení	129
6.5.1	Piezoodporové akcelerometry	130
6.5.2	Kapacitní akcelerometry	131
6.5.3	Piezoelektrické akcelerometry	134
6.5.4	Tepelné akcelerometry	134
6.5.5	Akcelerometry 2D a 3D	135
6.6	Průtokoměry.....	135
6.6.1	Průtokoměry s teplotním principem	136
6.6.2	Průtokoměry s kapacitním principem.....	141
6.6.3	Průtokoměry s rezonančními strukturami	143
6.6.4	Průtokoměry s piezoodporovými elementy	144
6.6.5	Průtokoměry s fluidickými oscilátory	145
6.7	Mikrosenzory pro měření posuvu	146
7	Mikrosenzory – tepelná doména	148
7.1	Základní pojmy a klasifikace	148
7.1.1	Klasifikace teplotních senzorů	148
7.1.2	Ekvivalence teplotních a elektrických veličin.....	150
7.2	Integrované teplotně závislé odporové mikrosenzory	152
7.2.1	Termistory.....	152
7.2.2	Křemíkové mikrosenzory s využitím odporu šíření	153
7.2.3	Tenkovrstvové odporové mikrosenzory SiC pro vyšší teploty.....	156
7.2.4	Tenkovrstvové křemíkové polykrystalické odporové mikrosenzory.....	156
7.2.5	Integrované struktury s teplotně závislým odporem dotované křemíkové vrstvy	157
7.2.6	Tenkovrstvové kovové odporové mikrosenzory	158
7.3	Teplotní mikrosenzory s přechodem pn.....	159
7.3.1	Integrované teplotní mikrosenzory s přechodem pn.....	161
7.3.2	Teplotní mikrosenzory s využitím přechodu pn bipolárního tranzistoru.....	161
7.3.3	Integrované teplotní mikrosenzory s tranzistorovými strukturami.....	162
7.4	Integrované teplotní mikrostruktury MOS	164
7.4.1	Teplotní senzor s tranzistory CMOS pracujícími v oblasti silné inverze.....	164
7.4.2	Teplotní senzor s tranzistory CMOS pracujícími v oblasti slabé inverze.....	165
7.4.3	Laterální integrované teplotní mikrosenzory BiCMOS.....	166
7.5	Integrované termoelektrické a Peltierovy články	168
7.5.1	Polovodičové termoelektrické články	168
7.5.2	Integrované termoelektrické články	169
7.5.3	Peltierovy články.....	171

7.6	Teplotní struktury SAW	174
7.7	Šumové mikrosenzory	176
7.8	Teplotní barevné indikátory	178
7.9	Porovnání vlastností teplotních mikrosenzorů	179
8	Mikrosenzory – magnetická doména	180
8.1	Hallův mikrosenzor	181
8.1.1	Integrované Hallovy mikrosenzory	183
8.2	Magneto odpor	184
8.2.1	Tenká magnetická vrstva	185
8.2.2	Supravodivý magnetorezistor	186
8.3	Magnetodiody	186
8.3.1	Integrovaná magnetodiody SOS	187
8.3.2	Magnetodiody CMOS	187
8.4	Magnetotranzistory	188
8.4.1	Laterální magnetotranzistor	188
8.4.2	Vertikální struktura magnetotranzistorů	189
8.4.3	Magnetotranzistor s potlačeným postranním vstřikem (SSIMT)	190
8.4.4	Magnetotranzistor MOS – MAGFET	191
8.5	Nosičově doménové mikrosenzory magnetického pole	193
8.5.1	Vertikální čtyřvrstvý CDM	194
8.5.2	Kruhový (horizontální) čtyřvrstvý CDM	195
8.5.3	Kruhový (horizontální) třívrstvý CDM	196
8.6	SAW – mikrosenzory magnetického pole	196
8.7	SQUID – mikrosenzory magnetického pole	197
8.8	Magnetické mikrosenzory se spinově závislým tunelováním	198
8.9	Porovnání vlastností mikrosenzorů magnetického pole	199
9	Mikrosenzory – doména záření	202
9.1	Základní definice a dělení	202
9.2	Mikrosenzory ionizujícího záření	203
9.2.1	Polovodičové mikrosenzory typu fotodiody	205
9.2.2	Polovodičové iontově-driftové mikrosenzory záření (planární struktura typu PIN)	205
9.2.3	Senzor s povrchovou bariérou	206
9.2.4	Implantovaný senzor pn	207
9.3	Mikrosenzory pro monitorování ultrafialového, viditelného a blízkého infračerveného záření	207
9.3.1	Fotorezistor	208
9.3.2	Fotodiody	211
9.3.3	Fototranzistor	213
9.4	Mikrosenzory pro oblast infračerveného záření	215
9.4.1	Fotorezistory pro infračervené struktury	216
9.4.2	Hradlové infračervené mikrosenzory	216
9.4.3	Termoelektrické baterie	216
9.4.4	Mikrobolometry	217
9.4.5	Pyroelektrické senzory	219

9.5	Mikrosenzory mikrovláknového záření – tepelné konvertory	222
9.5.1	Pasivní mikrosenzory	223
9.5.2	Mikrosenzor AlGaAs-GaAs s aktivním konvertorem výkonu	224
10	Mikrosenzory – biochemická doména	227
10.1	Chemorezistory	229
10.1.1	Oxidové chemorezistory	230
10.1.2	Chemorezistory s tenkými a tlustými vrstvami	231
10.1.3	Vodivé polymerové a kompozitní chemorezistory	233
10.2	Chemokondenzátory (chemokapacity)	233
10.3	Chemodiody	234
10.4	Chemotranzistory	235
10.4.1	Senzory plynu se strukturami tranzistoru MOSFET	235
10.4.2	ISFET – senzor iontů a pH (Ion Sensitive FET)	238
10.4.3	Biosenzory s modifikovanými strukturami MOS a referenční elektrodou	241
10.5	Teplotní chemické mikrosenzory	243
10.5.1	Pyroelektrické mikrosenzory	243
10.5.2	Kalorimetrické mikrosenzory	244
10.6	Gravimetrické chemické mikrosenzory	245
10.6.1	Krystalový hmotnostní chemický mikrosenzor	245
10.6.2	Hmotnostní chemické mikrosenzory SAW	247
10.7	Optické chemické senzory	249
10.8	Biosenzory	250
10.9	Zhodnocení vlastností chemických mikrosenzorů	253
11	Taktilní senzory	254
11.1	Taktilní 1D senzory pro zjišťování působení síly nebo tlaku	254
11.1.1	Kontaktní taktilní senzory	254
11.1.2	Taktilní senzory s piezoelektrickými vrstvami	255
11.1.3	Taktilní senzor s odporovou tlustou vrstvou (elastomerem)	256
11.1.4	Taktilní senzor s odporovou tenkou vrstvou	256
11.1.5	Taktilní senzor s vakuovou diodovou strukturou	257
11.2	Taktilní 2D senzory jako dotykové displeje	258
11.2.1	Dotykové 2D displeje s odporovým principem	259
11.2.2	Dotykové 2D displeje s ultrazvukovým principem	261
11.2.3	Dotykové 2D displeje s kapacitním principem	263
11.2.4	Dotykové 2D displeje s infračerveným principem	264
11.2.5	Taktilní senzory pro roboty	264
11.3	Senzory otisků prstů	265
11.3.1	Základní princip kapacitního senzoru otisků	266
11.3.2	Struktura CMOS senzoru otisků	268
11.4	Shrnutí poznatků o taktilních senzorech	270
12	Inteligentní senzory	271
12.1	Základní definice a terminologie	271
12.2	Vývoj inteligence mikrosenzorů pro moderní měřicí a řídicí systémy	275
12.3	Vnitřní subsystémy inteligentních senzorů	276

12.4	Systémový přístup k návrhu inteligence pro senzory	278
12.5	Způsoby realizace inteligence v senzorech	280
12.6	Inteligentní senzory pro měřicí a regulační účely	281
12.7	Multisenzorové inteligentní systémy – umělý elektronický nos	283
III MIKROAKTUÁTORY		285
13	Mikroaktuátory – základní pojmy a klasifikace	287
13.1	Základní deformovatelné mechanismy mikroaktuátorů	291
13.2	Mikronosník	291
13.3	Mikromůstek	294
13.4	Membrána	296
13.5	Torzní struktura	297
14	Elektrostatické mikroaktuátory	300
14.1	Typy posuvů v aktuátoru vyvolaných elektrostatickými silami	301
14.1.1	Aktuátor s podélným pohybem	301
14.1.2	Aktuátor s posuvným (příčným) pohybem	304
14.1.3	Aktuátor s dielektrikem	306
14.1.4	Aktuátor s vodivou pohyblivou částí	307
14.1.5	Kombinovaný podélný a příčný pohyb	308
14.2	Mikromanipulátory	309
14.2.1	Mikrouchyty (elektronická pinzeta)	309
14.2.2	Monolitický mikromanipulátor	310
14.2.3	Mikroposuvy 1D a 2D	312
14.3	Mikroventily membránové	313
14.3.1	Elektrostatický fóliový mikroventil	314
14.4	Elektrostatické přepínače	315
14.4.1	Elektrostatické přepínače MEMS	315
14.4.2	Pohyblivý klínový aktuátor – spínač	317
14.4.3	Optické přepínače	318
14.5	Mikropumpy membránové	322
14.6	Mikrouzávěrka s membránou	323
14.7	Mikroaktuátorová membránová „baterie“	324
14.8	Elektrostatické mikromotory	325
14.8.1	Elektrostatické lineární aktuátory s hřebenovými elektrodami (Comb-drive)	326
14.8.2	Lineární elektrostatické mikromotory	327
14.8.3	Rotační elektrostatické mikromotory	330
14.9	Optická mikrozrcátka	336
14.10	Elektrohydrodynamické aktuátory	339
14.11	Elektroreologické aktuátory	341
14.12	Elektrostatické generátory kapek (ink-jet)	343
14.13	Elektrostatické měniče napětí	344
15	Piezelektrické mikroaktuátory	346
15.1	Základní principy piezelektrických aktuátorů	347
15.2	Lineární piezelektrické aktuátory (mikromotory)	351

15.3	Rotační piezoelektrické aktuátory (mikromotory)	352
15.4	Cykloidní piezoelektrické mikromotory	355
15.5	Piezoelektrické mikroventily a mikropumpy	355
15.5.1	Jednoduchá struktura piezoelektrické bezventilové mikropumpy	356
15.5.2	Piezoelektrická membránová mikropumpa	356
15.5.3	Piezoelektrické aktivní ventily	357
15.6	Piezoelektrické mikromanipulátory	358
15.6.1	Systém pro nastavení přesné polohy	358
15.6.2	Systém pro velké přesné posunutí	359
15.6.3	Bimorfnní struktura pro STM mikroskop	360
15.6.4	Struktura piezoelektricky řízeného skalpelu	361
15.7	Akustické a optické aplikace piezoelektrických aktuátorů	361
15.7.1	Piezoelektrické akustické aktuátory	361
15.7.2	Laserový piezoelektrický skener	362
15.8	Piezoelektrické kapkové mikrogenerátory (ink-jet tisk)	363
15.9	Piezoelektrické mikrogenerátory	365
15.10	Ostatní aplikace	367
16	Mikroaktuátory s magnetickými principy	369
16.1	Elektromagnetické mikroaktuátory	370
16.1.1	Elektromagnetický mikrosplínač	371
16.1.2	Elektromagneticky řízené ventily	371
16.1.3	Lineární elektromagnetický krokový reluktanční mikromotor	372
16.1.4	Rotační elektromagnetický reluktanční mikromotor	373
16.1.5	Rotační reluktanční elektromagnetický převodový mikromotor	374
16.1.6	Elektromagnetický krokový mikromotor	374
16.1.7	Stejnoseměrný elektromagnetický mikromotor s permanentním magnetem v rotoru	375
16.2	Elektrodynamické mikroaktuátory	376
16.2.1	Elektrodynamická mikropumpa	377
16.2.2	Lineární mikromotor s magnetickým vznášením	378
16.3	Termomagnetické mikroaktuátory	379
16.4	Magnetostrikční aktuátory	380
16.4.1	Elastický vlnový lineární motor	381
16.4.2	Přepínač směru toku	382
16.4.3	Membránový mikroventil	383
16.5	Magneto-reologické aktuátory	383
17	Tepelné mikroaktuátory	385
17.1	Princip činnosti tepelných mikroaktuátorů	385
17.2	Tepelné aktuátory využívající roztažnosti pevných látek	388
17.2.1	Vícevrstevová nosníková struktura	388
17.2.2	Tepelně řízená mikrozrcátka realizovaná v technologii CMOS	390
17.2.3	Homogenní nosníkový mikroaktuátor	391
17.2.4	Tepelně řízený mikroventil	392
17.2.5	Tisková hlava ink-jet s tepelnou deformací membrány	393

17.3	Mikroaktuátory s tvarovou pamětí.....	394
17.4	Tepelné aktuátory využívající roztažnosti plynů a kapalin.....	396
17.4.1	Tepelný aktuátor řízený světelným zářením	398
17.4.2	Tepelně řízené mikroventily a mikropumpy	398
17.4.3	Tepelně řízená tisková hlava ink-jet	401
17.5	Tepelné mikromotory	402
17.5.1	Stirlingův mikromotor	402
17.5.2	Spalovací mikroturbína.....	402
17.5.3	Raketové mikromotory	404
18	Optické mikroaktuátory	405
18.1	Optické mikroaktuátory s přímou přeměnou energie záření na akční mechanismus	406
18.1.1	Fotoelektrické mikroaktuátory.....	406
18.1.2	Fotovodivostní mikroaktuátory.....	407
18.1.3	Fotodiodové mikroaktuátory.....	408
18.1.4	Mikroaktuátory s optickou změnou permitivity plynu.....	409
18.1.5	Porovnání vlastností mikroaktuátorů s přímou přeměnou	410
18.2	Optické mikroaktuátory s nepřímou přeměnou energie záření na akční mechanismus.....	411
19	Mechanické mikroaktuátory	413
19.1	Pohybové mechanismy	413
19.1.1	Pevná spojení a další mechanismy.....	413
19.1.2	Deformovatelné spojení a páky	414
19.1.3	Převodový mechanismus pro převod lineárního oscilačního pohybu na rotační.....	415
19.1.4	Mikropřevodovky	415
19.1.5	Realizace spojů v planární technologii	416
19.1.6	Pumpy s ozubeným soukolím pro viskózní kapaliny.....	418
19.1.7	Pohonné mechanické mikrosoučásti	418
19.1.8	Křemíkové mikropružiny.....	419
19.2	Struktury pro řízení průtoku tekutin	420
19.2.1	Tekutinové spínače a zesilovače.....	420
19.2.2	Dynamické pasivní ventily pro mikropumpy.....	420
20	Chemické a biochemické mikroaktuátory.....	423
20.1	Elektrochemické mikroaktuátory.....	423
20.1.1	Mikroaktuátor realizovaný na principu palivového článku (princip kyslíkové pumpy)	424
20.2	Chemicko-mechanické mikroaktuátory	426
20.2.1	Mikroaktuátory s vodivými polymery	427
20.2.2	Mikroaktuátory se syntetickými polymery napodobující svaly	430
20.2.3	Mikroaktuátory s gely.....	430

IV MIKROSYSTÉMOVÉ STRUKTURY A TECHNOLOGIE	433
21 Inteligentní mikrosktruktury pro chemickou a biochemickou analýzu	435
21.1 Mikrotekutinové pasivní struktury a elementy	435
21.1.1 Pasivní ventily	436
21.1.2 Pasivní směšovače, dávkovače, multiplexery a čerpadla	438
21.1.3 Materiály a technologie realizace čipů s mikrokanálky pro Lab-on-Chip	441
21.2 Lab-on-Chip	448
21.2.1 Koncepce Lab-on-Chip.....	450
21.2.2 Komerčně dostupné Lab-on-Chip.....	452
21.3 Chromatograf a spektrometr	455
21.3.1 Plynový chromatograf (GC – Gas Chromatography)	455
21.3.2 Hmotnostní spektrometr (MS – Mass Spectrometers)	457
21.3.3 Optické spektrometry.....	458
22 Mikrosystémové technologie	460
22.1 Mikrosystémové techniky (technologické postupy)	461
22.1.1 Tenkovrstvové technologie.....	462
22.1.2 Nanášení z kapalného fáze.....	465
22.1.3 Tlustovrstvové metody vytváření vrstev	466
22.2 Technologie MEMS	466
22.2.1 Objemové mikroobrábění (Bulk Micromachining).....	466
22.2.2 Povrchové mikroobrábění (Surface Micromachining).....	473
22.2.3 Mikroobrábění s velkým poměrem geometrického rozměru vertikálního k laterálnímu (technologie HEXSIL, HARPS, LIGA)	476
22.2.4 Mikroobrábění excimerovým laserem	482
22.2.5 Integrovaná fotonika.....	483
22.2.6 Optická vlákna.....	484
22.3 Propojovací technologie	485
22.3.1 Technologie flip-chip.....	486
22.3.2 Systémová integrace 2D – multičipové moduly (Multi Chip Modules – MCMs)	487
22.3.3 Systémová integrace 3D	488
22.3.4 Propojování vnitřních součástí mikrosystému	490
22.4 Pouzdření mikrosenzorů, mikroaktuátorů a mikrosystémů.....	491
22.4.1 Požadavky na pouzdro mikrosystému a jeho funkce	493
22.4.2 Sestavování (kompletování) hybridních mikrosystémů	494
22.4.3 Elektrické a mechanické průchodky	496
22.4.4 Pasivace	497
22.4.5 Materiály pouzder.....	498
22.4.6 Využití pouzření používaných u standardních integrovaných obvodů.....	499
22.4.7 Technologie pouzření	500
22.4.8 Další technologie pouzření MEMS.....	504
22.4.9 Náklady na pouzření mikrosystémů.....	508
Literatura.....	511
Rejstřík.....	535