Mikroelektromechanické systémy

Microelectromechanical systems

Petr Juřička

Bakalářská práce
2010

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky
akademický rok: 2009/2010

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení:	**Petr JUŘIČKA**
Osobní číslo:	**A06157**
Studijní program:	**B 3902 Inženýrská informatika**
Studijní obor:	**Informační a řídicí technologie**
Téma práce:	**MEMS – mikroelektromechanické systémy**

Zásady pro vypracování:

1. **Vypracujte přehled vývoje mikroelektromechanických systemů (MEMS).**
2. **Pojednejte o technologii MEMS a možnostech aplikace a využití těchto systémů.**
3. **Uveďte příklady zařízení MEMS vhodných pro měření průtoku a složení látek.**
4. **Vypracujte přehled výrobců těchto systemů.**
5. **Proveďte cenové srovnání vybraných systemů.**
6. **Vypracujte prezentaci seznamující s problematikou MEMS.**

Rozsah bakalářské práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

1. **Bejček, L., Ďaďo, S., Platil, A.: Měření průtoku a výšky hladiny, Vydavatelství BEN, Praha 2006**
2. **Husák, M.: Mikrosenzory a mikroaktuátory, Vydavatelství Academia, Praha 2008**
3. **Varadan Vijay, K., Vinoy, K.J., Jose, K.A.: Rf Mems And Their Applications, vydavatelství Wiley, 2003**
4. **Vijay K. Varadan, K. J. Vinoy, S. Gopalakrishnan : Smart Material Systems and MEMS, vydavatelství John Wiley & Son, 2006**
5. **Mohamed Gad-el-Hak: The MEMS handbook, Vydavatelství CRC Press, 2002**
6. **Beeby, S.:MEMS Mechanical Sensors, vydavatelství Artech House, 2004**

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Lubomír Macků, Ph.D.**
Ústav elektroniky a měření

Datum zadání bakalářské práce: **5. března 2010**

Termín odevzdání bakalářské práce: **1. června 2010**

Ve Zlíně dne 5. března 2010

prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc.
děkan

UNIVERZITA TOMÁŠE BATI VE ZLÍNĚ
Fakulta aplikované informatiky
L.S.

doc. Ing. Ivan Zelinka, Ph.D.
ředitel ústavu

ABSTRAKT

Cílem práce bylo seznámení s technologií označovanou jako Mikroelektromechanické systémy (MEMS). Možnosti jejího využití a aplikace.

Teoretická část pojednává o historii této technologie a dále se zaměřuje na nejpoužívanější technologické procesy a materiály používané pří výrobě. V této části jsou také obsaženy základní metody a principy používané pro průtokoměry a pro zařízení schopné chemické analýzy látek.

V praktické části jsou popsány konkrétní produkty používané pří měření průtoku a pří rozboru chemických látek a dále je vypracován přehled výrobců využívajících pro své produkty technologii MEMS.

Klíčová slova: MEMS, mikroelektromechanické systémy, mikrosystém, mikrostruktury, mikrotechnologie, průtokoměr, Lab-on-Chip, chemická analýza

ABSTRACT

The main purpose of this work was familiarization with a technology reffered to as Micro-electro-mechanical systems (MEMS). The possibilities of its usage and application.

Theoretical section treat of a history of this technology and further focuses on the most used technological processes and materials used in a production. In this section, basicmethods and principles used for flowmeters and for devices able tochemical analysis of materials are included.

In the practical section there are described concrete products used in measuring of a flow and in analysis of chemical substances. Summary of producers, who use for thein products the MEMS technology is worked out and enclosed.

Keywords: MEMS, micro-electro-mechanical systems, microsystems, microstructure, microtechnology, flowmeter, Lab-on-Chip, chemical analysis

Poděkování

Děkuji vedoucímu mé bakalářské práce, panu Ing. Lubomíru Macků, Ph.D ,že mi umožnil tohle téma zpracovat, a za jeho pedagogickou a odbornou pomoc během vypracovávání bakalářské práce.

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby;
- beru na vědomí, že bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k prezenčnímu nahlédnutí, že jeden výtisk bakalářské práce bude uložen v příruční knihovně Fakulty aplikované informatiky Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji,

- že jsem na bakalářské práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

Ve Zlíně …….……

podpis diplomanta

OBSAH

ÚVOD **9**
I TEORETICKÁ ČÁST. **10**
1 MIKROSYSTÉM – POJMY A DEFINICE **11**
1.1 OBECNÁ DEFINICE MIKROSYTÉMU **11**
1.2 MIKROSYSTÉM V ELEKTRONICE **11**
1.2.1 DEFINICE MIKROSYSTÉMU V EVROPĚ 11
1.2.2 DEFINICE MIKROSYSTÉMU V USA 11
1.2.3 DEFINICE MIKROSYSTÉMU V JAPONSKU 12
2 HISTORIE MIKROSYSTÉMŮ A MIKROTECHNOLOGIE **13**
3 MEMS – MIKROELEKTROMECHANICKÉ SYSTÉMY **14**
3.1 MIKROSYSTÉMOVÉ TECHNOLOGIE PRO VZNIK STRUKTUR MEMS 15
3.1.1 POVRCHOVÉ MIKROOBRÁBĚNÍ 15
3.1.2 POVRCHOVÉ MIKROOBRÁBĚNÍ 16
3.1.3 FOTOLITOGRAFIE 18
3.1.4 TECHNOLOGIE LIGA 20
3.1.5 OBRÁBĚNÍ EXCIMEROVÝM LASEREM 21
3.1.6 TECHNOLOGIE HARPSS 22
3.1.7 TECHNOLOGIE HEXSIL 22
3.2 MATERIÁLY PRO MEMS 23
3.2.1 KŘEMÍK 23
3.2.2 POLYMERY 23
3.2.3 KERAMIKA 24
3.2.4 KOVY 24
3.2.5 SKLO 24
4 MĚŘENÍ PRŮTOKU S VYUŽITÍM SENZORU MEMS **26**
4.1 PRŮTOKOMĚRY S TEPLOTNÍM PRINCIPEM 26
4.1.1 TERMOANEMOMETRICKÉ MIKROSENZORY PRŮTOKU 26
4.1.2 KALORIMETRICKÉ MIKROSENZORY PRŮTOKU 27
4.2 PRŮTOKOMĚRY S KAPACITNÍM PRINCIPEM 27
4.3 PRŮTOKOMĚRY S REZONANČNÍMI STRUKTURAMI 28
4.3.1 PRŮTOKOMĚR S REZONANČNÍM MŮSTKEM 28
4.3.2 PRŮTOKOMĚR S REZONANČNÍ MEMBRÁNOU 29

4.4 PRŮTOKOMĚRY S PIEZOODPOROVÝMI ELEMENTY 30
4.4.1 PRŮTOKOMĚR S VYUŽITÍM SILOVÉHO PŮSOBENÍ PROTÉKAJÍCÍ TEKUTINY 30
4.4.2 PRŮTOKOMĚR S PRUŽNOU MEMBRÁNOU MĚŘÍCÍ ZMĚNY TLAKU 30
4.5 PRŮTOKOMĚRY S PIEZOODPOROVÝMI ELEMENTY 31
5 MIKROSTRUKTURY PRO CHEMICKOU A BIOCHEMICKOU ANALÝZU 32
5.1 LOC – LAB ON CHIP 32
5.1.1 KONCEPCE LOC 32
5.2 CHROMATOGRAF A SPEKTROMETR 33
5.2.1 Plynový chromatograf 33
5.2.2 Hmotnostní spektrometr 34
5.2.3 Optický spektrometr 34
II PRAKTICKÁ ČÁST 36
6 VYBRANÉ PRODUKTY (MEMS) POUŽÍVANÉ V PRAXI 37
6.1 PRŮTOKOMĚR SLQ-HC60 37
6.2 PRŮTOKOMĚR ASL1600 38
6.3 PRŮTOKOMĚR MF- 50 38
6.4 PRŮTOKOMĚR MFM 2020 39
6.5 BIOANALYZÉR LOCAD-PTS 2100 40
7 PŘEHLED VÝROBCŮ MEMS ZAŘÍZENÍ 41
7.1 SENSIRION 41
7.2 SIARGO 41
7.3 STMICROELECTRONICS 42
7.4 ISSYS 43
7.5 FRAUNHOFER 43
7.6 LEISTER 44
7.7 SILEX MICROSYSTEMS 44
ZÁVĚR 45
CONSLUSION 46
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY 47
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK 48
SEZNAM OBRÁZKŮ 49

ÚVOD

Miniaturizace se definuje jako zmenšování rozměrů a hmotnosti součástek při zachování původní funkce. Její počátky spadají už do 13. století, kdy hodináři měli snahu zmenšovat své stroje to minimálních rozměrů. Ve 21 .století již miniaturizace v elektronice dosahuje úctihodných výsledků. Nejde jenom o zmenšování rozměrů, miniaturizace sebou nese řadu výhod jako například snižování spotřeby, snižování nákladů, zvyšování kvality a spolehlivosti. Miniaturizace ještě zdaleka nedosáhla svého konce. Dá se předpokládat nejen další zmenšování, ale i vyšší integraci mikroelektronických součástek.

Vývoj Mikroelektromechanických systémů MEMS, o kterých pojednává tato práce, je poháněn vývojem miniaturizace. I když už se miniaturizace pomalu začíná angažovat v oblasti nanosystémů, předpokládá se, že mikrosystémy technologie MEMS budou ještě nějakou dobu na trhu dominovat.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 MIKROSYSTÉM – POJMY A DEFINICE

1.1 Obecná definice mikrosystému

Mikrosystém lze obecně definovat jako množiny součástí pracujících v jednom celku. Tyto množiny mohou pracovat samostatně a můžou být vybavené různými stupni inteligence.[1]

1.2 Mikrosystém v elektronice

Z rozvojem elektroniky se začaly některé polovodičové struktury postupně uplatňovat v mezioborových aplikací.Tím začaly vznikat mezioborové produkty, které sdružovaly různé typy veličin (tepelné, mechanické, optické,magnetické, elektrické nebo i chemické). Mezioborové systémy začaly využívat moderní technologie zpracování polovodičových materiálů a přitom využívaly poznatků ze všech oborů.Vzniklý mezioborový systém se začal nazývat pojmem mikrosystém. V oboru integrované elektroniky je tedy mikrosystém definován jako systém, který v sobě sdružuje poznatky z různých technických oborů jako je například mechanika, optika a elektronika. [1]

1.2.1 Definice mikrosystému v Evropě

V Evropě je mikrosystém definován jako miniaturní inteligentní systém, který vykonává 3 základní úkony:

- snímání informace
- zpracování signálu
- vykonávání akční funkce na výstupu

Mikrosystém může být řešen jako integrovaný na jednom čipu, ale taky může fungovat jako multičipový hybrid. [1]

1.2.2 Definice mikrosystému v USA

Mikrosystém je v USA převážně chápán jako mikroelektromechanický systém neboli MEMS.Pojem MEMS představuje technologii, kterou se vyrábí mikrosystémy kombinující elektrické a mechanické součástky s rozměry od μm do mm. Funkce mikrosystému jsou

výpočetní operace, snímání informace a akční působení a pomocí těchto funkcí nám umožňují řídit veličiny fyzikálního nebo biochemického prostředí. [1]

1.2.3 Definice mikrosystému v Japonsku

V Japonsku se pojem mikrosystém chápe jako mikropřístroj, který vykonává specifickou funkci. Mikrosoučástky takového mikropřístroje jsou schopny využívat komplexně mikroskopické vlastnosti. [1]

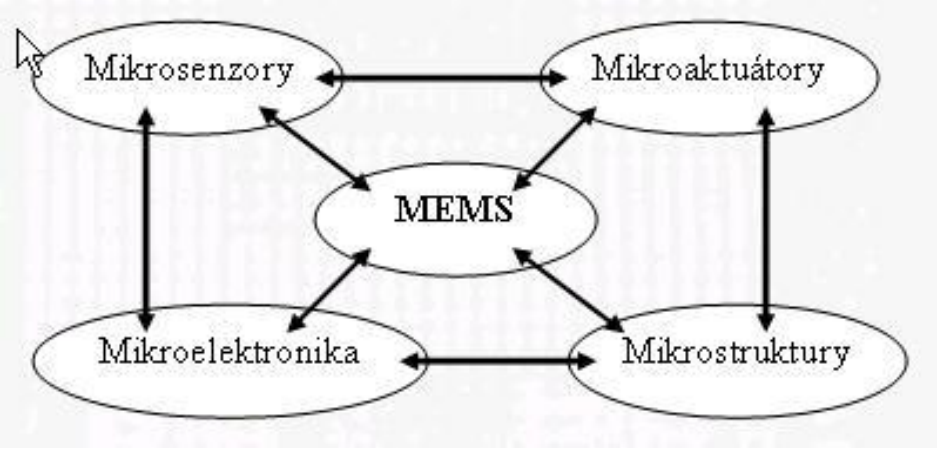
2 HISTORIE MIKROSYSTÉMŮ A MIKROTECHNOLOGIE

Oblast mikrosystémů je bezesporu považována za jednu z klíčových technologií 21.století. Její počátky ovšem spadají zhruba do poloviny 20. století. Objev polovodičového tranzistoru v roce 1947 dal podnět k rozvoji polovodičové elektroniky. Elektronika prodělala snad nejrychlejší rozvoj ze známých technických oborů. Za narozeninový rok mikrotechnologie je však považován rok 1954 kdy byl v Bellových laboratořích v Kalifornii objevem piezorezistivní jev v křemíku a germaniu. Samotný podnět k rozvoji mikrotechnologie dal v roce 1959 americký fyzik a nositel Nobelovy ceny Richard Feynman, který nabídnul 1000 amerických dolarů tomu, kdo sestaví elektromotor, který se vejde do krychle o straně 1/64 palce což odpovídá délce 0,4 milimetru. Feynman ve svých přednáškách prezentoval technologickou vizi extrémní miniaturizace.Na základě svých znalostí fyzikálních zákonů předpověděl způsob manipulace a řízení objektů miniaturních rozměrů. Jeho vize se začala naplňovat a následující desetiletí přinesla v oblasti miniaturizace velké pokroky. V osmdesátých a devadesátých letech nastal veliký rozvoj výrobních technologií. Po celém světě se konaly nejrůznějším konference a jejich úsilí bylo věnováno technickému rozvoji a novým přístupům spojených se systémovým inženýrstvím pro vývoj nových aplikací, které tak nezůstávaly rozpracovány v teoretické rovině ale začaly přecházet do praxe. Na jedné takové konferenci se zaměřením na mikrodynamiku se v roce 1987 v USA objevil termín MEMS (Micro-Electro-Mechanical System), který pojmenovával novou oblast mikrozařízení. Výzkum v této oblasti s sebou začal přinášet nové poznatky. MEMS neboli mikroelektromechanické systémy začaly způsobovat převrat v takřka v každé produktové kategorii a jejich použití vedlo ke zlepšování vlastností dosavadních systémů. V oblastech, kde se mechanické součástky vyrobené klasickými obráběcími technikami neuplatnily, přinášela miniaturizace mechanických systémů jedinečnou příležitost. Mikromechanické součástky se staly menšími, lehčími, rychlejšími, přesnějšími a taky méně nákladnějšími než jejich makroskopické protějšky. Avšak jejich vývoj vyžadoval odpovídající technologie výroby. V současnosti je jejich vývoj již na vysoké úrovni a začíná se prolínat s vývojem nanosystémů. MEMS se staly běžnou součástí všech zařízení. Bez mikrosystémových technologií by se nerozvíjel kosmický výzkum, letectví, bezpečnostní systémy nebo ochrana životního prostředí. Je taky zřejmé, že jejich význam a uplatnění do budoucna ještě poroste.

3 MEMS – MIKROELEKTROMECHANICKÉ SYSTÉMY

Zkratka MEMS je původem z USA, a ve světě se tahle technologie někdy pojmenovává i jako MST (Microsystems Technology). Tato označení se používají pro výrobní technologii používanou pro výrobu malých integrovaných zařízení nebo systémů, které kombinují mechanické a elektrické součásti. Mikrosystémy této technologie mohou měřit od několika mikrometrů do několika milimetrů. V mikrosystémech této technologie lze nalézt 4 základní části:

- **Mikrostruktury -** představují v mikrosystémech pohyblivé mechanické části
- **Mikrosenzory –** slouží ke snímání a měření neelektrických veličin z okolního prostředí. Jde zpravidla o snímají informace o všech dostupných fyzikálních, chemických a biochemických parametrech jako je například teplota, tlak, síla, rychlost, úhel, chemická analýza, koncentrace, napětí, proud a podobně.
- **Mikroelektronika –** tato část by se dala označit jako procesor celého mikrosystému. Je to elektronická funkční jednotka, ve které se informace odvozena ze senzorů zpracovává do požadovaného výstupního tvaru. Může být propojena s řídícími signály nebo přenosem informace.
- **Mikroaktuátory –** mikroaktuátor se označuje jako akční člen a slouží jako výstupní převodník. Podle účelu mikrosystému může mikroaktuátor ovládat nebo jinak ovlivňovat veličiny okolní prostředí. Příkladem takových zásahů může být posun, umístění, regulace, pumpování, filtrování a podobně.



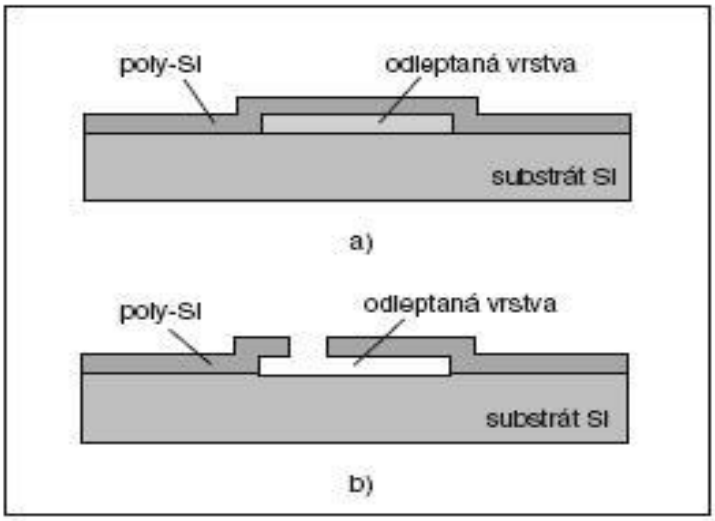
Obr. 1 Schématické rozdělení komponent MEMS

3.1 Mikrosystémové technologie pro vznik struktur MEMS

Mikrosystémové technologie umožňují formovat prostorové (3D) struktury mikrosystémů o velikosti řádů mikrometrů. Mikrostruktury realizované pomocí nejrůznějších mikrosystémových technologií, mají širokou škálu využití. Jsou využitelné pro mikrosenzory, mikroaktuátory nebo i pro jednotlivé mikrosoučástky jako jsou mikrospínače a podobně. Kompatibilita s klasickými mikroelektronickými technologiemi dovoluje integrovat mikrostruktury senzorů a aktuátorů společně s mikroelektronickými obvody na jeden společný čipu. Výroba prostorových struktur MEMS je založena na mnoha nástrojích a metodách. Většina metod byla převzata nebo upravena z výroby integrovaných obvodů. Ty nejvíce používané metody realizace MEMS jsou uvedeny v dále. [2]

3.1.1 Povrchové mikroobrábění

Tento technologický proces se nejčastěji používá k vytvoření pohyblivých struktur na povrchu křemíkového či jiného substrátu. Takto vzniklé struktury, i přes extrémně malé rozměry, se dají relativně snadno integrovat na čip společně s elektronickými obvody. Funkční mikrostruktury vznikají nanášením tenkých vrstev na povrch křemíkového substrátu. Takový technologický proces má 3 základní postupy, mezi které patří postupná depozice, suché leptání a mokré odleptání. Povrchovým mikroobráběním lze realizovat velice složité struktury mikrosenzorů, mikroaktuátorů a mikrosystémů s nejrůznějším využitím. Jedná se především o membrány, mikronosníky, mikromůstky, kanálkové mikrostruktury, zavěšené membrány a podobně. [2]



Obr. 2 Povrchového mikroobrábění :

realizace struktury komorového typu

3.1.2 Povrchové mikroobrábění

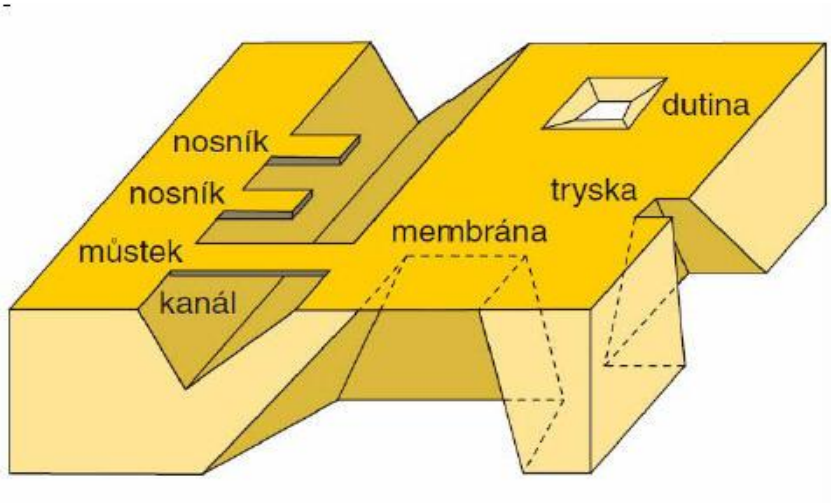
Tento způsob realizace MEMS lze jednoduše vysvětlit jako tvarování struktury z objemu základního materiálu. Nejde však o obrábění pomocí strojů nýbrž o různé technologické operace, které selektivně odstraňují určené části substrátu jako je například křemík nebo sklo. Mezi typické technologické procesy, které jsou součástí této technologie, patří izotropní a anizotropní mokré leptání, leptání se závislostí na koncentraci příměsí s využitím roztoku KOH a různé způsoby suchého leptání. Leptání je technologický proces, při kterém jsou odstraňovány části krycích či podkladových vrstev. [2]

Existují 2 základní metody:

- **Mokré leptání** – využívá speciální chemický roztok, do kterého je ponořena součást, kterou je třeba povrchově opracovat. V roztoku požadovaná část materiálu změní své skupenství na tekutou sloučeninu, která je v konečné fázi procesu odplavena. [3]
- **Suché leptání** - při metodě dochází k leptání použitím plazmatu nebo iontového paprsku. [3]

V konečné fázi objemového mikroobrábění mohou vznikat nejrůznější součásti MEMS (nosníky, membrány, destičky), které se používají pro výrobu různých typů senzorů nebo aktuátorů.

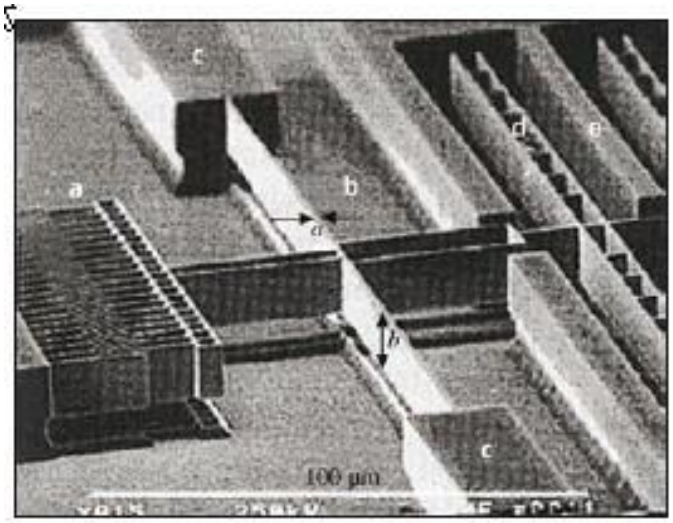
-



Obr. 3 Geometrické motivy realizované objemovým mikroobráběním

Existuji různé modifikace objemového mikroobrábění:

- **Speciální technologie SCREAM** (Single Crystal Reactive Etch and Metallization) pro objemové mikroobrábění, která využívá a kombinuje izotropní a anizotropní suché leptání pro vytváření jednoduchých tvarovaných zavěšených struktur. [2]

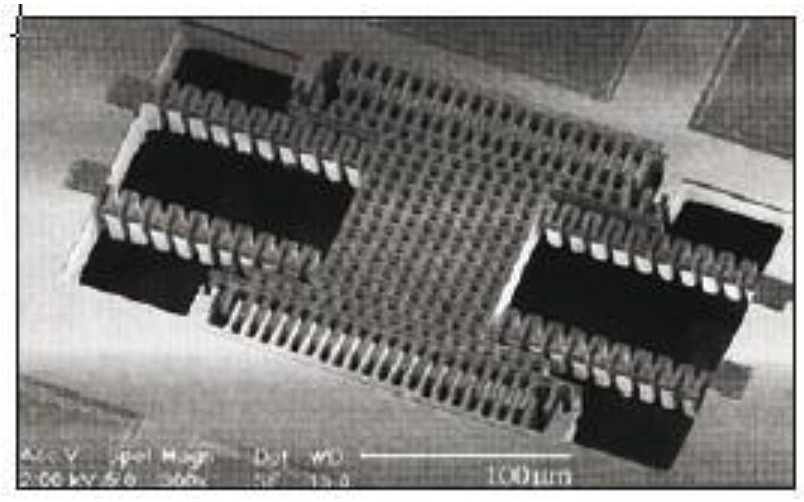


Obr. 4 Hřebenový aktuátor realizovaný technologií SCREAM:

a) hřebenový aktuátor,b) pružina, c) ukotvení pružiny,

d) pohyblivá deska kondenzátoru, e) pevná deska kondenzátoru

- **Technologie post-CMOS** objemového mikroobrábění, která využívá suché leptání a principu, který je založen na maskovací schopnosti vrstvy Al/SiO2. Tato technologie je vhodná pro vytvoření zavěšených mikrostruktur ve spojení s integrovanými obvody CMOS. [2]



Obr. 5 Hřebenový aktuátor realizovaný technologií post-CMOS

3.1.3 Fotolitografie

Fotolitografie je metoda, která se používá převážně pro tvorbu polovodičových struktur např. integrovaných obvodů. Je založena na principu chemicko-fyzikálního zpracování povrchu. Fotolitografie se využívá převážně tam, kde je potřeba zpracovávat jen určitou část povrchu bez poškození jiných části. Celý proces litografie by se dal shrnout do 5 kroků: [4]

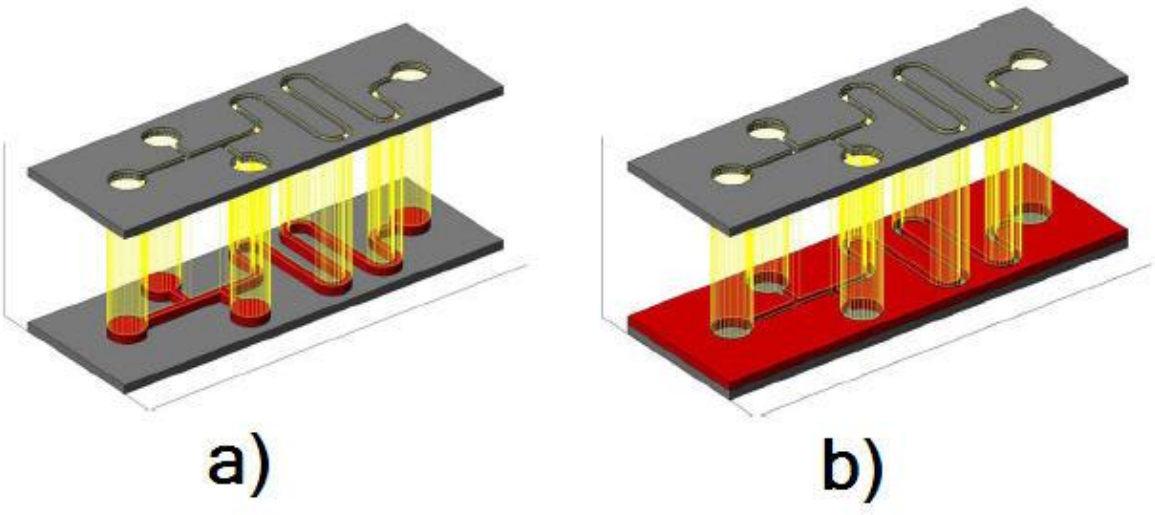
- Na vhodně upravený základní povrch se nanese tenká vrstva tzv. fotorezistu, což je chemická substance, která mění svou rozpustnost v rozpouštědle při působení podnětu určitého druhu. Takovým podnětem k chemické reakci může být například světelné záření nebo elektrony. [4]

- V dalším kroku se fotorezist přes stínící masku ozáří. Při působení světelného záření se v místě dopadu vytvoří nový typ vazby, který v dalším kroku zabrání odstranění takto ozářené vrstvy. [4]

- Na fotorezist se v dalším kroku nanese vrstva leptadla, která neleptá ozářená místo, ale působí jen na neozářené místa. Je však důležité aby leptadlo leptalo směrem dolů, jinak by se vyleptala i ozářená místa.Taková fotolitografie se označuje jako negativní fotolitografie. Existuje i opačná varianta pozitivní fotolitografie, při které se ozařují místa, která přijdou vyleptat. V takovém případě je však nutné použít fotorezist s jiným chemickým složením. [4]

- Po vyleptání fotorezistu zůstává původní povrch pokrytý v patřičných ozářených místech a přechází se k další technologické operaci, na kterou se povrch připravoval. Je však nutné, aby zbylá vrstva fotorezistu byla pro danou operaci nepropustná a nepoškozovala se. Příkladem operace může být vyleptání původního povrchu nebo nanesení nové vrstvy materiálu na vyleptaná místa. [4]

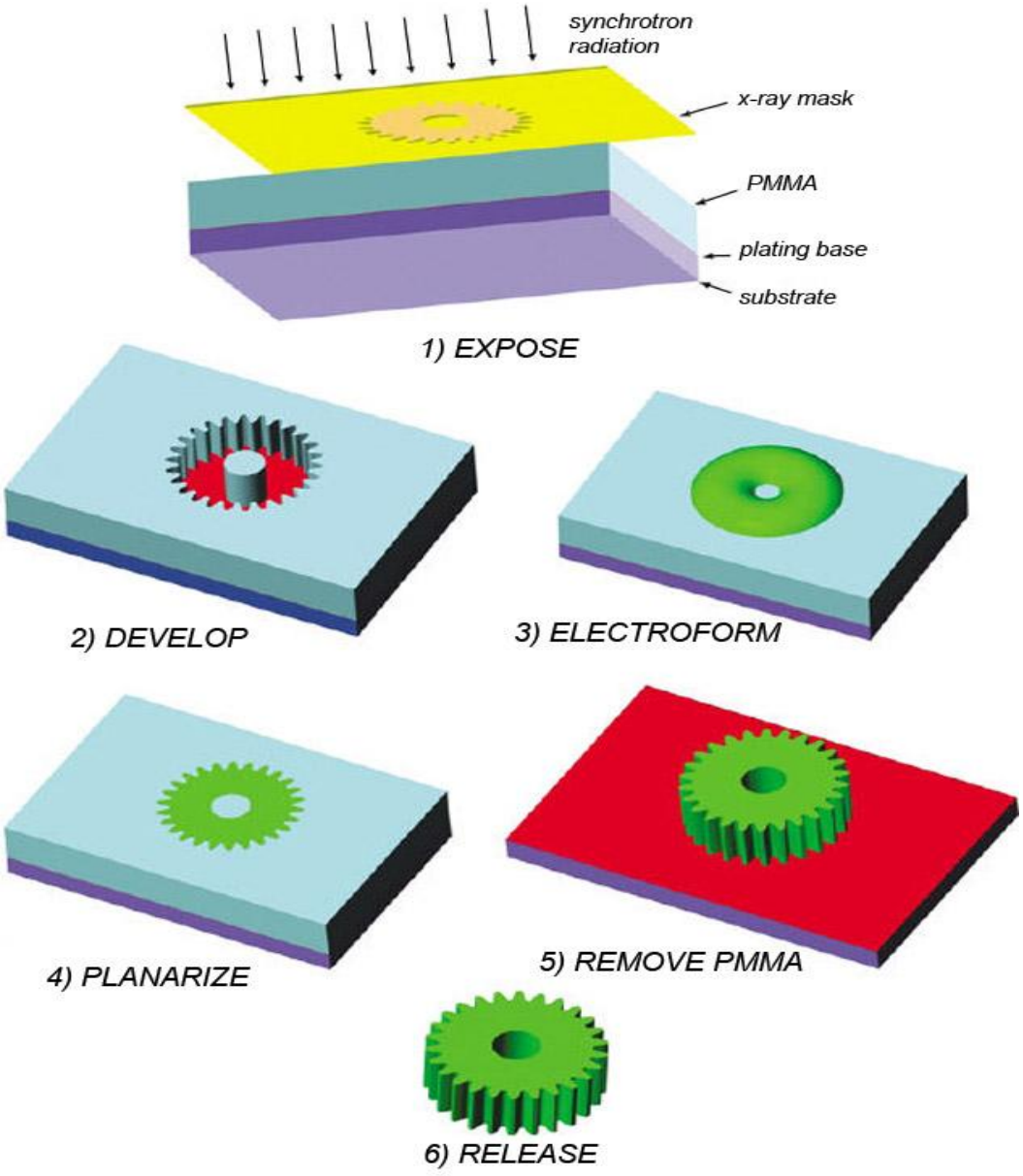
- Posledním krokem je odstranění ozářeného fotorezistu a omytí povrchu. [4]



Obr. 6 Fotolitografie – a)negativní fotorezist, b) pozitivní fotorezist

3.1.4 Technologie LIGA

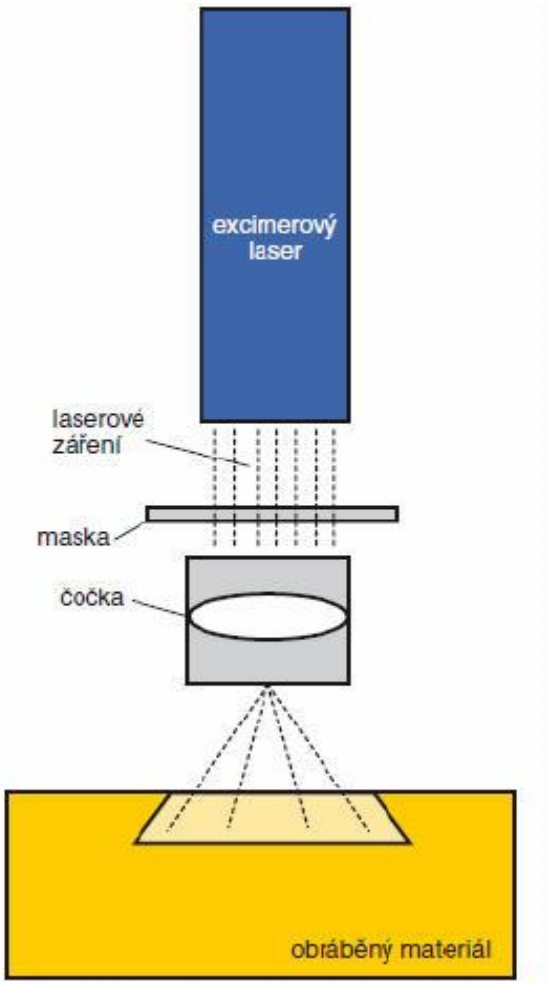
Technologie LIGA (Litographie Galvanoformung Abformung) se používá pro prostorové (3D) mikrotvarování kovů, plastů, keramiky nebo skla. Pomocí této technologie lze vytvořit mikrostruktury velmi jemných tvarů. Při výrobně mikrosystémů MEMS využívá litografie, elektrolytické (galvanického) pokovení a lisování.Taky se používá speciální rentgenová litografie (synchrontronové záření) při modelování motivů ve velmi silné vrstvě fotorezistu. Elektrolytické pokovení není u této technologie nijak omezeno a tudíž jej lze kombinovat s jinými technologickými procesy. Technologie LIGA dává možnost realizovat struktury s výškou až 1 000 μm a velkým geometrickým rozlišením. [1]



Obr. 7 Postup výrobní technologie LIGA

3.1.5 Obrábění excimerovým laserem

Technologie mikroobrábění excimerovým laserem je založena na odstraňování materiálu laserovým paprskem pracujícím v impulsním režimu. Lze přesně řídit množství odstraněného materiálu, hloubku a geometrický tvar materiálu. Pro realizaci složitějších tvarů lze využít metodu zahrnující zaměřování laserového paprsku pomocí speciální optiky, která umožňuje realizaci 3D struktur se šikmými hranami. Technologii excimerového laseru je možné využívat pro mikroobrábění organických materiálů, plastů nebo polymerů. [2]

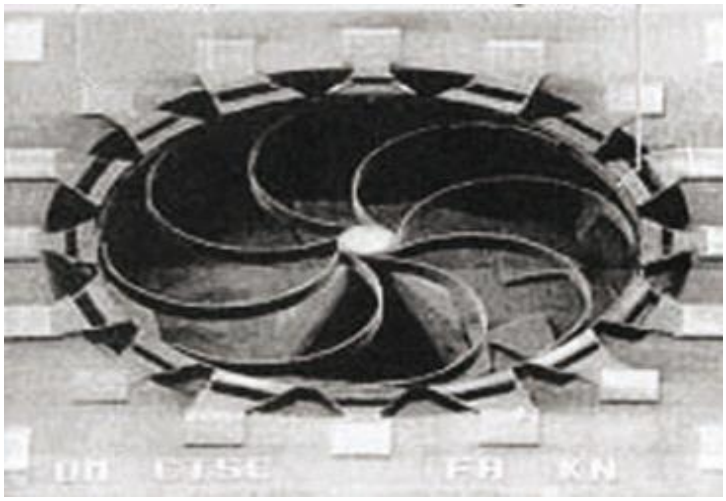


Obr. 8 Obrábění eximerovým laserem-

systém s projekční maskou

3.1.6 Technologie HARPSS

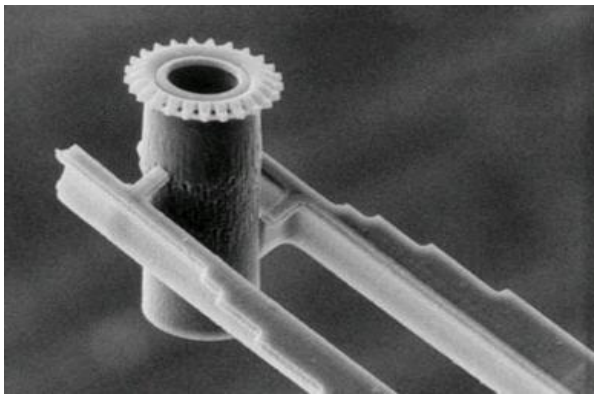
Technologie HARPSS (High Aspect Ratiocombined with Poly and Single-Crystal Silicon) umožňuje realizovat elektricky izolované polykrystalické a monokrystalické křemíkové (nebo i jiné) mikrostruktury s kapacitní vzduchovou mezerou s rozměry do desítek mikrometrů. Možnost vytvořit MEMS s malými vertikálními mezerami a tloušťkou struktur umožňuje výrobu inertních senzorů nebo RF rezonátorů. [2]



Obr. 9 Mikrogyroskop vyrobený technologií HARPSS

3.1.7 Technologie HEXSIL

Technologií HEXSIL (HEXagonal honeycomb polySILicon) se vytvářejí struktury s velkým poměrem hloubka-šířka. Jsou využívány známé technologické procesy, jako je např. DRIE, leptání fluorovodíkem a podobně.



Obr. 10 Mikrosoučástka vyrobená technologií HEXSIL

3.2 Materiály pro MEMS

I přes širokou škálu teoretických i praktických poznatků je vyhodnocování tribologických vlastností velmi složitý proces, protože se musí brát v úvahu velké množství faktorů. Jde hlavně o provozní podmínky, které mají velký vliv na funkci mikrosystémů. Příkladem provozních podmínek může být míra zatížení, teplota, hodnota a rychlost tření a topografie třecího povrchu. Dalšími faktory, které ovlivňují funkci, jsou vlastnosti používaných tribologických materiálů. Jde především o chemické složení a druh materiálu, k němuž patří tvrdost, pružnost, tvárnost, houževnatost, tepelná vodivost, únavové vlastnosti. Nejvíce používané materiály v oblasti MEMS jsou uvedeny dále. [5]

3.2.1 Křemík

Křemík je bezesporu nejvíce používaným materiálem v oblasti mikrotechnologie. Stál už u zrodu většiny integrovaných obvodů ve spotřební elektronice. Vlastnosti křemíku jsou hlavním důvodem jeho využití. Dosahuje vynikajících fyzikálních vlastností, jako je třeba tvrdost a pevnost v tahu. Dokáže odolávat velkému namáhání čímž je řazen mezi nejspolehlivější materiály. Má nízkou chemickou odolnost a hlavní výhodou je elektrická vodivost tudíž mu lze včlenit i elektrickou funkci. Navíc v krystalické formě je křemík téměř dokonalý Hookeovský materiál, což znamená, že při své deformaci neztrácí energii. Avšak čistý křemík má i své nevýhody. Mezi největší patří jeho tribologické vlastnosti. Pro zlepšení těchto vlastností se proto používá chemické nebo topografické povrchové úpravy např. nanesení vrstvy uhlíku jako diamant. Základní metodou pro produkci křemíku do MEMS jsou nánosy vrstev na materiál. Pomocí litografie odleptávání z povrchu pak můžou vznikat požadované tvary mikrostruktur. [5]

3.2.2 Polymery

I přesto, že elektronický průmysl poskytuje výhodu v podobně velkovýroby pro průmysl křemíku, v komplexnější krystalické formě je křemík stále relativně drahý materiál. Proto se v oblasti výroby MEMS často používají polymery, které mohou mít velkou paletu charakteristik materiálu. Z polymerů se MEMS zařízení vyrábí procesy jako je např. výlisek, reliéfní tisk nebo litografie. Mezi polymery patří zejména nejrůznější druhy plastů, které mají různé vlastnosti,kvalitu a použití. Mezi nejpoužívanější polymery patří PVC,

polyetylén, polypropylen a polystyrén. Základními vlastnostmi polymerů jsou teplotní stabilita, nízká tvrdost a v některých případech i nízká chemická odolnost. Výhodou je jejich nízká cena. [5]

3.2.3 Keramika

Mezi základní materiál keramiky patří oxid hlinitý neboli korund. Vyznačuje se svou žáruvzdorností, chemickou stabilitou, nízkou tepelnou vodivostí a nízkou tepelnou roztažností. Jediná nevýhoda je vysoce problematická výroba jemných mikrostruktur. Dalším významným materiálem keramiky, který se používá pro výrobu MEMS zařízení je oxid berylia (BeO). Ten se vyznačuje především svou vysokou tepelnou vodivostí. Nevýhodou je, že jeho prachové částice jsou toxické. Keramika se často uplatňuje v tribologických aplikacích, kde jsou již klasické kovové materiály na hranici svých možností. Jde zejména o keramiku na bázi karbidu křemíku. Jde o křehký materiál s velmi nízkým koeficientem tření a vysokou odolností vůči vysokým teplotám. Předpokladem všech keramických materiálů je schopnost reprodukce, dlouhá životnost a samomaznost. Proto jsou převážně používané v mechanických systémech, které zahrnují vysoké náklady, třecí rychlost a vyšší teploty. Tyto předpoklady nejlépe splňuje kysličník hlinitý. Jeho širšímu uplatnění a používání však brání jeho složitá výroba,zpracování a vysoké náklady. [5]

3.2.4 Kovy

Kovové materiály se také používají pro výrobu MEMS struktur. Co se ovšem týká mechanických vlastností, nemají takové výhody jako křemík. I přesto jejich použití zaručuje vysokou míru spolehlivosti. Nevýhodou je obtížné vytváření 3D mikrostruktur, oproti tomu vytváří aktivní vrstvy, mikrokomponenty či elektrody. Mezi běžně používané kovy patří zlato, nikl, hliník, wolfram, platina, stříbro. [5]

3.2.5 Sklo

Sklo je amorfní materiál na bázi oxidu křemičitého. Mezi typické vlastnosti patří transparentnost, pevnost a elektrická nevodivost. Jako nevýhoda se jeví jeho křehkost,těžká opracovatelnost a obtížnost při spojování s jinými materiály. Sklo se používá převážně při výrobě struktur v chemických, biochemických a biologických aplikací. [5]

4 MĚŘENÍ PRŮTOKU S VYUŽITÍM SENZORU MEMS

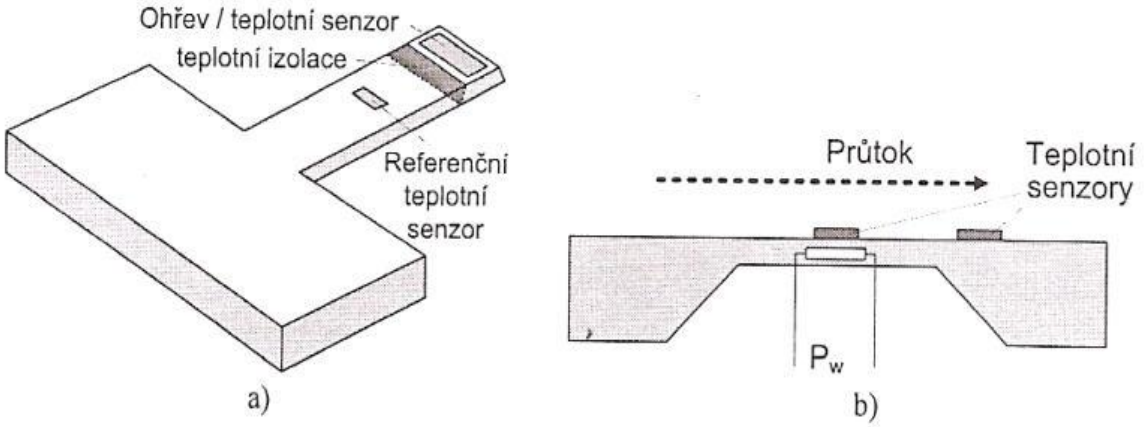
Mikrosenzory průtoku využívající technologii MEMS, náleží do mechanické domény, která je jednou z nejčastějších domén vyskytujících se na vstupu mikrosystémů. Samotné měření průtoku je třetí nejdůležitější měřená veličina v průmyslu. V současnosti existuje tisíce různých typů průtokoměrů, které lze členit zhruba do 50 skupin. Není proto divu, že aplikace, typy průtokoměrů a jejich ceny pokrývají extrémně široký rozsah možností. Existuje celá řada klasických metod pro měření průtoku. Avšak využití polovodičových mikrosenzorů lze realizovat jen pro některé z nich. Největšího rozvoje dosáhly mikrosenzory při realizaci tepelných, oscilátorových a kapacitních průtokoměrů. [1]

4.1 Průtokoměry s teplotním principem

Podle principu činnosti lze teplotní průtokoměry rozdělit na termoanemometry a kalorimetrické průtokoměry. [1]

4.1.1 Termoanemometrické mikrosenzory průtoku

V principu se využívá závislosti koeficientu přestupu tepla na rychlosti proudění média. Termoanemometry pracují s teplotně citlivým prvkem zahřívaným na vyšší teplotu, než je teplota okolí. Snímá se teplota prvku a teplota okolního média. Proud kapaliny prvek ochlazuje. Vyhodnocovací jednotka tak musí prvek více zahřívat. To se provádí zvětšením dodávky elektrické energie. Toto zvětšení je úměrné rychlosti proudění média. Jako teplotně citlivé prvky se používají polovodičové nebo kovové odporové elementy. Klasický termoanemometrický průtokoměr používá vyhřívaný drát nebo termistor. Polovodičový drát se vytváří vhodnou mikrosystémovou technologií o délce řádově mm, a tloušťce menší než 10 μm. Drát je upevněn mezi dvěma držáky. Teplotní element je nutné teplotně izolovat od ostatních části mikrostruktury např. umístěním elementu na izolační mikronosník nebo membránu. [1]



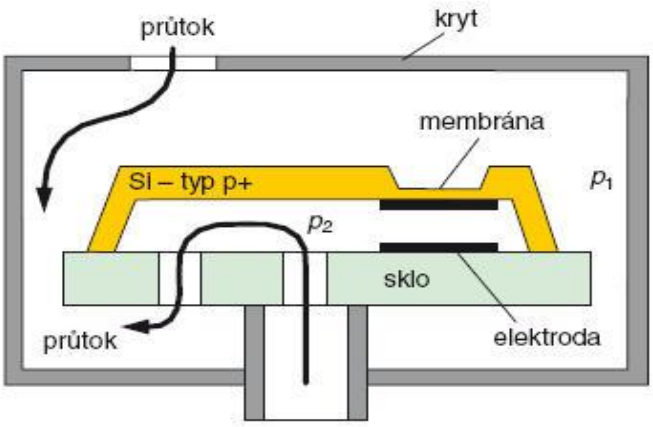
Obr. 11 Mikrotermoanemometr s tepelnou izolací a) s izolační podložkou b) s membránou

4.1.2 Kalorimetrické mikrosenzory průtoku

Činnost těchto průtokoměrů spočívá v principu přenosu tepla procházejícím médiem od tepelného zdroje k měřícímu teplotně závislému prvku, kde intenzita přenosu tepla odpovídá rychlosti proudění média. Teplotní zdroj a senzory mohou být umístěny buď vně anebo uvnitř průtokové cesty. [1]

4.2 Průtokoměry s kapacitním principem

Princip kapacitního průtokoměru je založen na rozdílech vstupního a výstupního tlaku proudícího média. Rozdílu tlaku se dociluje vhodně umístěnou překážkou v průtokovém kanálku, který musí mít taky vhodnou geometrii. Rozdílné tlaky na vstupu a výstupu jsou příčinou prohýbání membrány, která současně plní funkci kapacitního senzoru. Změna kapacity je jednoznačně určena změnou průtoku. Změnu kapacity lze vyhodnocovat například obvody se spínanými kondenzátory vhodnými zejména k CMOS integraci. U těchto mikroprůtokoměrů se měření pohybuje v řádech 10^{-8} ml/s. [1]



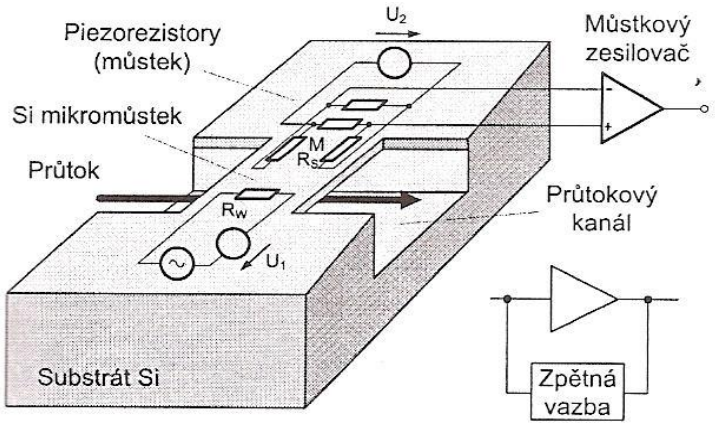
Obr. 12 Kapacitní průtokový senzor

4.3 Průtokoměry s rezonančními strukturami

Průtokoměr využívá princip činnosti mikrosenzorů s mechanickou rezonancí materiálu modulovanou působením průtoku média. Existují různé varianty těchto průtokoměrů. [1]

4.3.1 Průtokoměr s rezonančním můstkem

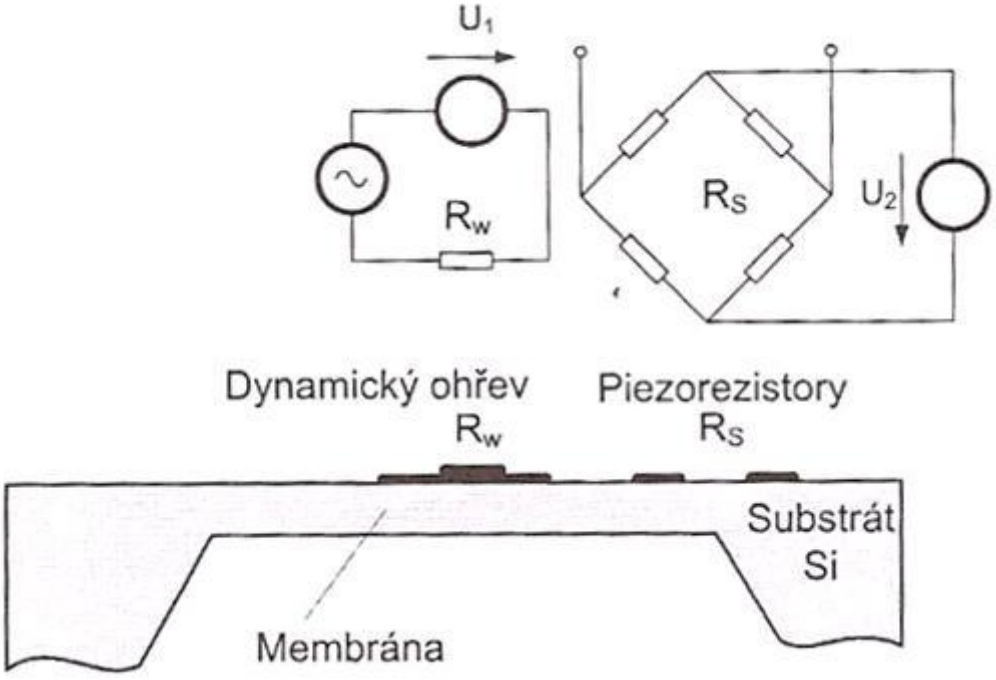
Používá se pro měření průtokového množství. Má frekvenční výstup a je vyroben tenkovrstvou technologií. Základem je křemíkový můstek, který je umístěn ve středu průtokového kanálu. Uvnitř můstku se nachází tenkovrstvý budící rezistor, který pomocí střídavého a stejnosměrného napájení budí mechanické kmity. Ty jsou detekovány tenkovrstvými tenzometry uspořádanými do Wheatstoneova můstku. Zářením zesilovače do zpětnovazební smyčky je vytvořen elektrotermomechanický oscilátor. Funkcí průtoku tekutiny je pak oscilační frekvence tohoto oscilátoru. [1]



Obr. 13 Průtokoměr s rezonančním můstkem

4.3.2 Průtokoměr s rezonanční membránou

Další rezonanční strukturou, kterou lze použít je rezonanční tepelně buzená membrána. I v tomto případě je průtok kapaliny ovlivněn rezonanční frekvencí. Rezistor, umístěný ve středu membrány, slouží pro teplotní buzení membrány k vytvoření kmitů. Dále mikroprůtokoměr obsahuje piezorezistory,které jsou umístěn na okraji membrány a slouží ke snímání mechanických kmitů. Po přivedení střídavého a stejnosměrného napětí na ohřívací rezistor, se membrána začne ohřívat.Vzniklé teplo je přenášeno do proudící kapaliny a taky po okrajích do substrátu. Výsledná průměrná teplotní odchylka membrány je závislá na ochlazovacím efektu procházející kapaliny. [1]

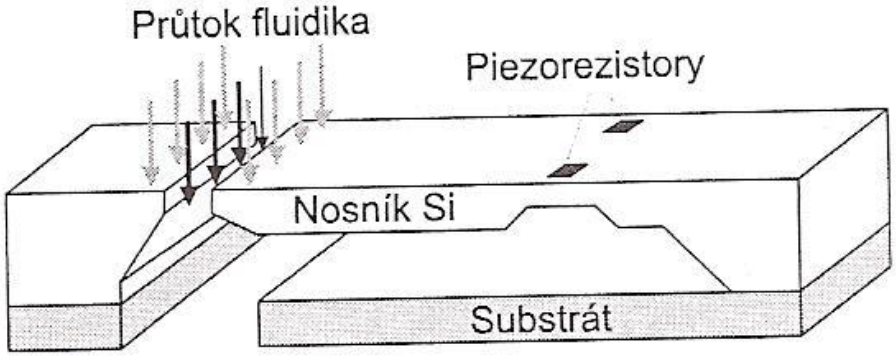


Obr. 14 Rezonanční průtokoměr s rezonanční membránou

4.4 Průtokoměry s piezoodporovými elementy

4.4.1 Průtokoměr s využitím silového působení protékající tekutiny

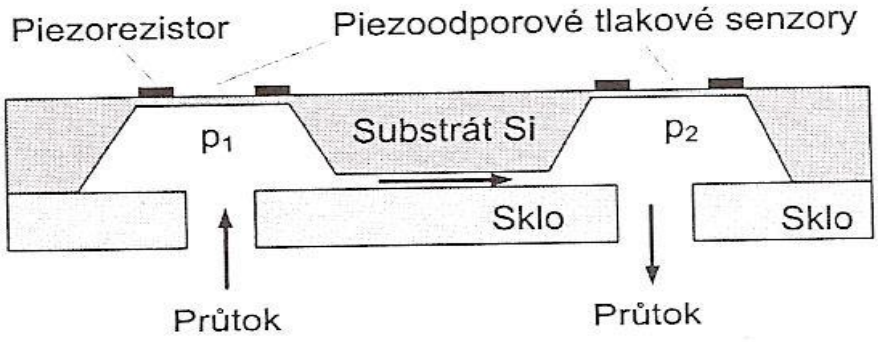
Princip je založen na silovém působení procházející tekutiny na objekt, který je vložen přímo do průtoku. Průtokoměr obsahuje pohyblivou část, kterou tvoří nosník s integrovanými piezorezistory. Protékající kapalina silově působí na nosník a tím ho deformuje ohybem. Taková deformace způsobuje změnu odporu piezorezistorů. Nosník je vyroben povrchovým a objemovým obráběním a jeho tloušťka je řádově μm. [1]



Obr. 15 Průtokoměr s deformací nosníku

4.4.2 Průtokoměr s pružnou membránou měřící změny tlaku

Princip je založen na vyhodnocování rozdílu tlaku proudícího médie ve dvou místech. Snímání obou tlaků zajišťují dva pizezoodporové senzory s pružnou membránou. Změny tlaku se dosahují. Změny tlaku je dosaženo geometrií struktury (úzký kanál). Rozsah průtoku se pohybuje od 1 μl/min až 300 μl/min s tlakovým rozdílem 50 hPa. Nevýhodou tohoto průtokoměru je silná teplotní závislost výstupního signálu na proudícím médiu. Tato závislost se však dá kompenzovat v elektronických obvodech. [1]

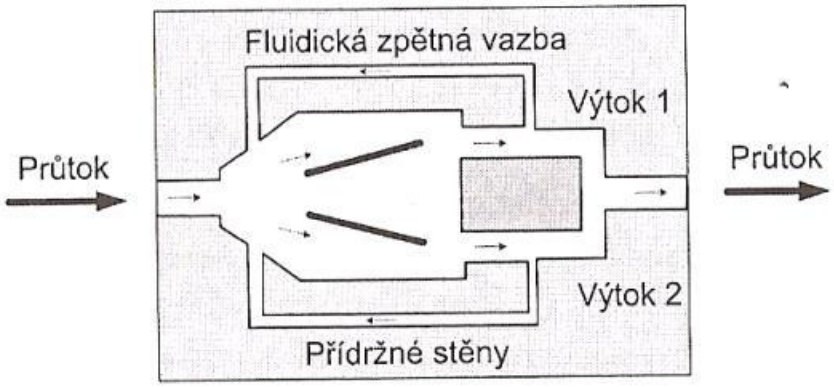


Obr. 16 Průtokoměr s piezoodporovými tlakovými senzory a úzkým kanálem

4.5 Průtokoměry s piezoodporovými elementy

Průtokoměr obsahuje fluidický oscilátor jehož základem je fluidický bistabilní obvod a zesilovač, v jehož kanálcích dochází k přeměně tlakové energie tekutiny na energii kinetickou. Účinkem Coandova jevu přilne průtok kapaliny ze vstupu k jedné nebo druhé přídržné stěně. Pomocí zpětné vazby je průtok překlápěn střídavě k jedné nebo druhé stěně. Kmitočet vzniklých oscilací je závislý pouze na rychlosti proudění tekutiny. Senzor neobsahuje žádné pohyblivé části a je v širokém rozsahu závislý na teplotě. Oscilace fluidita lze měřit tlakovým nebo termoanemometrických senzorem zavedeným do zpětnovazebního fluidického kanálku. [1]

- **Coandův jev** – plyny a kapaliny mají tendenci přilnout k zakřivenému povrchu, který obtékají. Vytéká-li z trysky paprsek kapaliny, nasává jeho rozvířený povrch kapalinu z okolí, do něhož vtéká. Jestliže paprsek proudí podél stěny, vysaje proud tekutinu za vzniku podtlaku a vlivem jeho působení se paprsek přisaje ke stěně tělesa. [5]

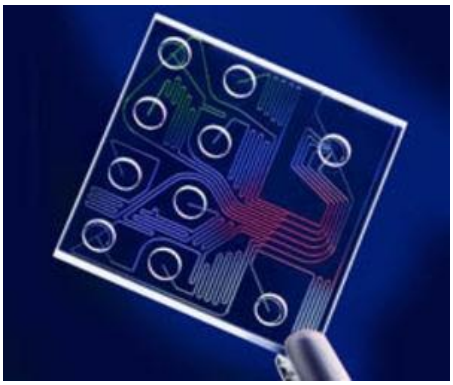


Obr. 17 Fluidický oscilátor

5 MIKROSTRUKTURY PRO CHEMICKOU A BIOCHEMICKOU ANALÝZU

5.1 LOC – Lab on Chip

Tímto termínem se označují zařízení, která integrují až několik laboratorních funkcí na jeden čip. Dalším označení, které se používá pro systémy tohoto typu, je μTAC (Mocro Total Analysis Systems). Tyto systémy dokážou analyzovat vzorky o objemu menším něž několik pikolitrů. Základní struktury LOC tvoří mikrotekutinové struktury, mezi které patří zejména pumpy, ventily, průtokoměry, viskozimetry, multiplexery a dávkovače. [1]



Obr. 18 LOC firmy Agilent

5.1.1 Koncepce LOC

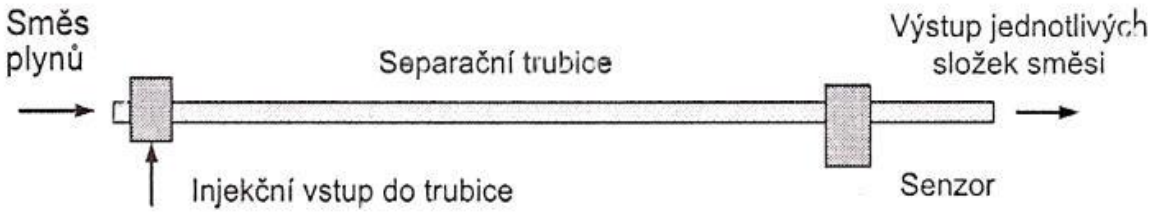
Výhodou LOC je především minimální množství diagnostikovaného vzorku tekutiny k vyšetření. K analýze stačí množství řádově několika pikolitrů. Další výhodou je rychlost procesu analýzy vzorku a s tím je spojena i vyšší účinnost. V důsledku malých objemů je pro správnou funkci zapotřebí minimální energie. Systémy LOC se vyznačují rychlou odezvou systému a tím dovolují lepší kontrolu a řízení celého procesu. LOC také dokážou vykonávat řadu paralelních činností. Důležitá je i bezpečnost provozu čemuž přispívá nízké napájecí napětí popřípadě akumulátorový. Základním předpokladem pro masovou produkci jsou nízké výrobní náklady těchto systémů. Není divu, že z důvodů všech těchto výhod, jsou systémy LOC rozšiřovány a aplikovány do nejrůznějších procesů. LOC však mají i své nevýhody. Jde především o problémy spojené s výrobní technologií, která se jeví ne zcela zvládnutá. Problémy se objevují i při miniaturizaci, kdy snižování rozměrů nevede vždy k efektivnosti. [1]

5.2 Chromatograf a spektrometr

Chromatograf i spektrometr jsou zařízení, které se používají pro analýzu látek, které jsou tvořeny nejrůznějšími směsi plynů nebo kapalin. Tyto mikrosystémy jsou široce používaný v oblasti analýz chemických látek, případně v oblasti analýz různých pachů a vůní. [1]

5.2.1 Plynový chromatograf

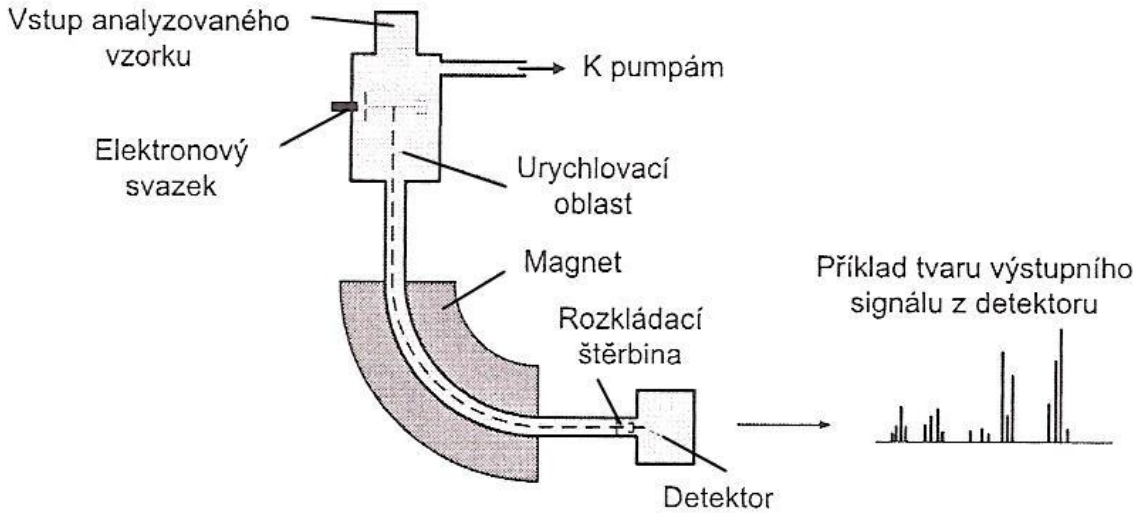
Jde o analytický nástroj, který dokáže analyzovat a vyhodnocovat jednotlivé složky obsažených ve zkoumané směsi plynů. Struktura je tvořena, nádobou (zdroj směsi), separační trubicí (může být i více paralelních trubic), injekčním vstupem do trubice, senzorem a systémem pro zpracování a vyhodnocení dat. Princip činnosti oddělování jednotlivých složek směsi plynů je založen na vlastnostech vnitřní vrstvy separační trubice. Vrstva absorbuje různé složky plynů s různým stupněm absorpce. Jednotlivé složky směsi se pohybují separační trubicí různou rychlostí v závislosti na reakci s absorpčním materiálem. Tímto způsobem lze jednotlivé složky od sebe oddělit a poté potřebné složky dále analyzovat. Nevýhodou chromatografů je časově náročná analýza, protože směs plynů může prostupovat separační trubicí jen určitou rychlostí. Další nevýhody jsou spojeny s problémovou miniaturizací těchto přístrojů. [1]



Obr. 19 Plynový chromatograf

5.2.2 Hmotnostní spektrometr

Hmotnostní spektrometr je zařízení, které při proces analýzy pracuje s jednotlivými složkami zkoumané tekutiny. Princip spočívá v ionizaci molekul zkoumaného vzorku. Ionizace probíhá většinou v héliové atmosféře. Ionty se urychlují pomocí přiloženého napětí a následně působením magnetického pole jsou odděleny podle hmotnosti a náboje. Informace o množství obsažené látky spočívá v počítání jednotlivých iontů pro konkrétní hmotnost pomocí iontového měřiče. I přes výzkum a vývoj v oblasti miniaturizace jsou tato zařízení stále docela rozměrná, těžká a drahá. Zaváděním mikromechanických částí vzniká problém ve schopnosti separovat pouze malé množství různých látek. [1]

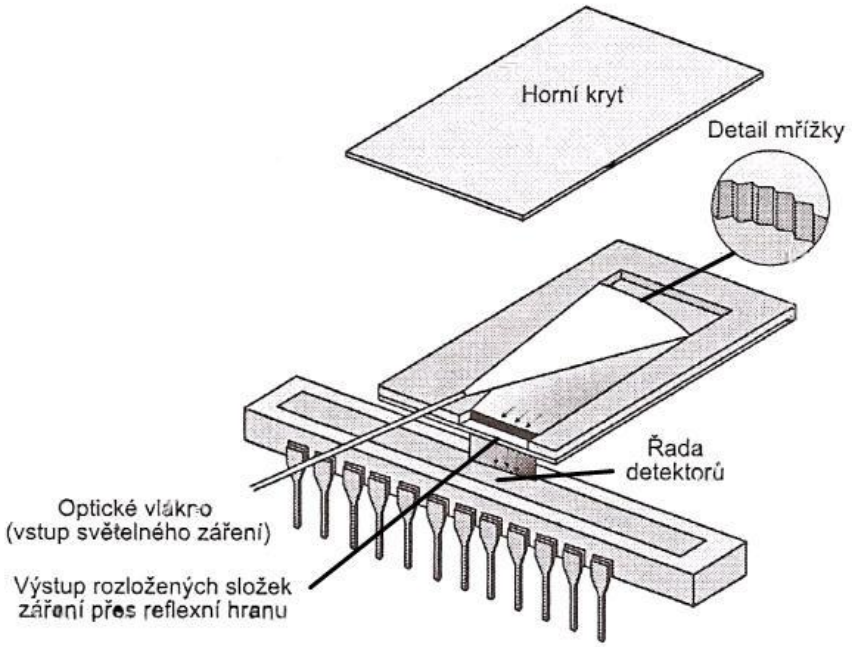


Obr. 20 Hmotnostní spektrometr

5.2.3 Optický spektrometr

Molekula každé látky je charakteristická svým módem vibrace a rotace. Molekuly mohou být detekovány pomocí světla o různých vlnových délkách. Molekuly pak dokážou takové světlo absorbovat. Tento princip se nazývá optické spektroskopie a využívá UV (ultrafialové)a IR (infračervené) optické záření. Základem mikrospektrometru je válcová difrakční mřížka s automatickým soustředěním paprsku do ohniska. Ve stejné rovině je umístěn i širokopásmový zdroj záření a taky řada fotodetektorů. Tyto fotodetektory tvoří elementy, z nichž každý snímá vybraný rozsah vlnové délky (v ideálním případě jen jednu vlnovou délku). Rozložení světelného záření na jednotlivé vlnové délky zaručuje mřížka, jejichž plošky mají rozměry v řádech mikrometrů. Analyzovaný vzorek protéká prostorem

před mřížkou. Šířka spektra musí odpovídat předpokládanému absorpčnímu spektru analyzovaného vzorku. Mirkospektrometr představuje kompromis mezi citlivostí, cenou a rozměry. Pomocí spektrometru lze analyzovat tekutiny, krystaly nebo i diamanty. Příkladem použití je například identifikace chemikálií při výrobě paliv. [1]



Obr. 21 *Optický mikrospektrometr*

II. PRAKTICKÁ ČÁST

6 VYBRANÉ PRODUKTY (MEMS) POUŽÍVANÉ V PRAXI

6.1 Průtokoměr SLQ-HC60

SLQ-HC60 je označení pro průtokoměr firmy SENSIRION. Průtokoměr obsahuje mikrostruktury vyrobené MEMS technologií. Struktura tohoto zařízení je typická tím, že neobsahuje žádné pohyblivé součásti což zaručuje vysokou spolehlivost. Mezi největší výhody patří jeho malé rozměry, vysoká citlivost a velmi přesné a rychlé měření průtoku. Časová odezva se je menší než 50 ms. Při měření průtoku dokáže v kapalině detekovat i malé bublinky a jejich výskyt pak zahrnout do vyhodnocování měření. Průtokoměr tohoto typu je navržen pro automatizované systémy, kde je potřeba měřit průtok do 100 ml/min. Je optimalizován pro měření průtoku látek obsahující uhlovodíky (líh, olej, nafta, benzín, lepidla apod.) Měření a vyhodnocování řídí mikročip patentované technologie CMOSens®.

Příklady aplikace:

- Monitorování průtoku paliv, oleje apod.
- Monitorování průtoku v dávkovacích aplikací
- Detekce prosakování
- Detekce bublin

Obr. 22 Průtokoměr SLQ-HC60

6.2 Průtokoměr ASL1600

Průtokoměr ASL1600 je opět produktem firmy SENSIRION. Patří do skupiny hmotnostních průtokoměrů. Nabízí vynikající chemickou odolnost a biokompatibilitu. Citlivý CMOSens® mikročip dokáže měřit velmi nízký průtok, až 100 nl/m. Maximální průtok je 4 ml/min. Časová odezva těchto průtokoměrů se pohybuje pod 30 ms. Výstup je kalibrovaný a lineární.

Příklady aplikace:

- Řízení průtoku kapalin
- Dávkovací aplikace
- Detekce prosakování

Obr. 23 Průtokoměr ALS1600

6.3 Průtokoměr MF- 50

Průtokoměr s tímto označení vyrábí firma Siargo. Jde o typ hmotnostního průtokoměru, který je určen pro měření průtoku plynů. Jeho struktura je typická tím, že na jeden čip je zpravidla integrováno více senzorů a tím se výrazně zvětšuje dynamický rozsah. Ve srovnání s klasickými průtokoměry pro plyny, nedochází k poklesu tlaku, čímž se redukují energetické ztráty. Průtokoměr je taky vybaven LCD displejem pro zobrazení měřených výsledků. Průtokoměr je vybaven komunikačním portem RS485, kterým lze připojit do sítě, čímž umožňuje vzdálené ovládání. Rychlost průtoku plynu se pohybuje v rozmezí od 0,01 m/s až do 65 m/s.

Příklady aplikace:

- Měření rychlost proudění plynů (vzduch, kyslík, helium, argon)
- Měření množství plynů

Obr. 24 Průtokoměr MF-50

6.4 Průtokoměr MFM 2020

Hmotnostní průtokoměr, vhodný díky svým rozměrům pro omezené prostory. Tento typ průtokoměrů je uzpůsoben pro měření spotřeby plynu vícekanálových zařízení. Další funkcí, kterou průtokoměr disponuje je měření teploty. Měření se provádí s vysokou přesností a charakteristická je taky krátká časová odezva. Průtokoměr je schopen měřit v rozsahu od 20 cm^3/min do 3000 cm^3/min.

Příklady aplikace:

- Plynová chromatografie
- Detekce prosakování
- Jednoduché i vícekanálové měření
- Kontrola jakosti

Obr. 25 Plynový průtokoměr MFM 2020

6.5 Bioanalyzér LOCAD-PTS 2100

Tento přístroj firmy Agilent umožňuje automatické analýzy, mikrotekutinovou separaci a fluorescenční detekci. Pro rychlou analýzu a snadné vyhodnocení stačí malý objem analyzovaného vzorku. Dokáže detekovat až 12 vzorků současně na ploše o velikosti počítačového čipu. Výsledky analýzy přístroj podává zpracováním vzorku, který obsahuje i pouze 20 000 buněk, což představuje výhodu při detekci a monitorování hladiny nádorových buněk u pacientů podstupující protinádorovou terapii. Speciální přístroj tohoto typu využila i NASA pro kosmické použití. Byl využit pro detekci bakterií nebo plísní na povrchu kosmické lodi. Dá se tak předcházet poškození materiálu např. korozí apod. Stejně tak se používá pro kontrolu zdravotního stavu vesmírné posádky.

Obr. 26 Minilaboratoř LOCAD-PTS

7 PŘEHLED VÝROBCŮ MEMS ZAŘÍZENÍ

7.1 Sensirion

Firma Sensirion je vyspělá high-tech společnost s hlavním sídlem ve Švýcarsku. Své pobočky však má i v USA, Číně, Japonsku a Jižní Korei. Ve firmě pracuje přes 170 vývojářů, jejichž práce je zaměřena především na senzorovou techniku. Firmu založili v roce 1998 Felix Mayer a Moritz Lechner. Až po 10 letech, kdy se společnosti povedlo získat i řadu národních ocenění, se firma začala orientovat i na celosvětový trh. Senzory Sensirion nacházejí uplatnění v medicíně, automobilovém průmyslu, automatizačních procesech, ale i v dalších průmyslových odvětvích. Firma Sensirion zaručuje úspěch a kvalitu díky své jedinečné pokrokové CMOSens® Technologií, která představuje okolo 30 patentů. Technologie využívá integrace senzorových prvků a řídící elementů na jeden společný čip. Produkty této technologie jsou typické nízkými výrobními náklady a vyznačují se vysokou spolehlivostí. Společnost garantuje kompletní zákaznickou podporu a servis.

- **Hlavní sídlo firmy :** Švýcarsko
- **Kontakt :** info@sensirion.com
- **Internet :** www.sensirion.com
- **Produkty :** senzorová technika

7.2 Siargo

Společnost Siargo sídlí v USA. Její produkty tvoří především hmotnostní průtokoměry, které využívají prvky technologie MEMS. Tyto průtokoměry nachází uplatnění především v medicíně a potravinářství ale i v jiných odvětvích průmyslu. Oproti klasickým typům průtokoměrů, využívají Siargo průtokoměry více senzorů (multisenzory) pro zlepšení vlastností při měření. Siargo vyrábí průtokoměry s vysokou spolehlivostí, širokým dynamickým rozsahem a nízkou spotřebou energie. Zákaznická podpora je v k dispozici 24 hodin denně. Firma nabízí i možnost výroby specifických průtokoměrů dle požadavků zákazníka.

- **Hlavní sídlo firmy :** USA
- **Kontakt :** Info@Siargo.com
- **Internet :** www.siargo.com
- **Produkty :** Hmotnostní průtokoměry

7.3 STMicroelectronics

STMicroelectronics je 5. největší společností na světě v oblasti produkce polovodičových prvků. Přímý této společnosti se ročně pohybují přes 10 miliard amerických dolarů. Na trhu nabízí velmi široké portfolio výrobků.Celá společnost je velmi rozšířená a angažuje se ve 36 státech světa. Pracuje pro ní přes 50 tisíc zaměstnanců v 16 vývojových a výzkumných centrech a 15 výrobních továrnách. Hlavní sídlo pro Evropu je v Ženevě ve Švýcarsku. Společnost vznikla v roce 1987 spojením firem SGS Microelettronica z Itálie a Thomson Semiconducteurs z Francie. V oblasti MEMS se společnost začala angažovat v roce 2001, kdy začala vyrábět zařízení pro průmyslové aplikace. V současnosti společnost produkuje velké množství MEMS zařízení jako např. senzory pro snímání pohybu, zrychlení, sklonu, teploty nebo i chvění. Produkty této společnosti nacházejí uplatnění snad ve všech odvětvích průmyslu.

- **Hlavní sídlo firmy:** Švýcarsko
- **Kontakt :** 222 336 111 (Praha)
- **Internet :** www.st.com
- **Produkty :** mikrosnímače, mikrokontrolery

7.4 ISSYS

Integrované snímací systémy ISSYS (integrated sensing systems) mají počátky v roce 1995 na Michiganské univerzitě, kde se dr. Nader Najafi, dr. Ken Wise a dr. Khalil Najafi rozhodli využít výhody MEMS a začít tuhle technologii používat pro produkty používané při snímacích aplikací v lékařství a vědě. Společnost investovala milióny dolarů a spoustu času do vývoje a v současnosti produkuje milióny MEMS zařízení ročně a neustále rozšiřuje své možnosti a kapacity. Společnost je otevřena pro spolupráci s jinými společnostmi a díky tomu se angažuje i v novějších průmyslových odvětví (palivové články, chemické paliva). Produkty této společnosti se vyznačují vysokou přesností, miniaturními rozměry, biokompatibilitou a vysokou odolností (např. odolnost vůči korozi).

- **Hlavní sídlo firmy :** USA
- **Kontakt :** tel. 734-547-9896
- **Internet :** www.mems-issys.com
- **Produkty :** senzory v lékařství, průtokoměry atd.

7.5 Fraunhofer

Německá firma vyrábějící sériově mikroelektronické součástky, které co do velikosti dosahují rozměrů jen zlomku milimetru. Součástky se používají v mikrosystémech, které se uplatňují v různorodých aplikací a odvětví, jako je např. medicína, životní prostředí, dopravní technika, komunikační systémy automobilový průmysl a strojírenství. Při výrobě se používají nejmodernější technologie. Firma se nezabývá pouze výrobou, ale také se zabývá výzkumnou činnosti, zaměřenou na vývoj nových součástek a nových technologických procesů pro jejich výrobu. Firma je držitelem řadou certifikátu kvality.

- **Hlavní sídlo firmy :** Německo
- **Kontakt :** info@isit.fraunhofer.de
- **Internet :** www.isit.fraunhofer.de/en/
- **Produkty :** mikroelektronické součástky (např. snímače zrychlení)

7.6 Leister

Leister Process Technologies je firma, která má více než 60 let zkušeností s vývojem, produkcí a celosvětovou distribucí technických zařízení. Firma se člení na různá oddělení, kde se zabývají konkrétními záležitostmi pro výrobu a produkci. Jedním takovým oddělením je Axetris, kde se zabývají návrhem a výrobou komponentů pomocí technologie MEMS. Do sortimentu Exetris patří průtokoměry, zdroje infračerveného záření, laserové detektory plynu a mikrooptická zařízení. Při výrobě integrovaných modulů se využívá návrhu a simulace.

- **Hlavní sídlo firmy :** Švýcarsko
- **Kontakt :** Info@Siargo.com
- **Internet :** www.leister.com/axetris/
- **Produkty :** průtokoměr, detektory plynu, mikrooptická zařízení

7.7 Silex Microsystems

Silex Microsystems je technologicky velmi vyspělá firma. Vyrábí a nabízí širokou škálu MEMS produktů. Jde především o mikrosenzory a mikroaktuátory, které jsou základem mikrosystémů uplatňujících se při snímání např. průtoku, rychlosti, směru, polohy, teploty apod. Využití pak nacházejí v oborech jako je lékařství, biotechnologie, telekomunikace, spotřební elektronika a automobilový průmysl. Společnost prodává své produkty přes své distributory v Japonsku, Číně a Izraeli.

- **Hlavní sídlo firmy :** Švédsko
- **Kontakt :** info@silexmicrosystems.com
- **Internet :** www.silex.se
- **Produkty :** mikrosenzory a mikroaktuátory

ZÁVĚR

Ve své závěrečné práci jsem se snažil přiblížit poznatky o technologii Mikroelektomechanických systémů (MEMS). Na začátku práce jsem shrnul do kapitoly historický vývoj této technologie. Dále jsem podrobně rozebral technologické procesy, používané při vniku struktur, které nacházejí uplatnění v zařízeních MEMS. S tím souvisí i další kapitola, kde jsou uvedené příklady nejčastěji používaných materiálu, které jsou opracovávány uvedenými obráběcími metodami. V závěru teoretické části jsem se zaměřil na využiti technologie MEMS v oblasti měření průtoku a analýzy chemických látek. V kapitole jsem uvedl principy mikroprůtokoměrů a zařízení, které jsou schopny provádět chemické analýzy různých vzorků. V rámci možností jsem se snažil všechny kapitoly a podkapitoly teoretické části doplnit vhodnými příkladnými obrázky.

V praktické části jsou uvedeny konkrétní zařízení vhodné pro měření průtoku nebo chemickou analýzu vzorku. Jsou to zařízení, která využívají pro svou funkci struktury MEMS. Zpracoval jsem jejich parametry,vlastnosti a možnosti využití. Pro představu jsem zařízení doplnil i o snímky. Problémy se vyskytly při zjišťování cen těchto zařízení. Výrobní společnosti ceny neuvádějí a složité je cenu dohledat i přes menší distributory těchto zařízení. Cenové srovnání jsem z praktické části úplně vypustil. Poslední kapitolu praktické části tvoří přehled některých výrobců v oblasti mikrosystému a mikrotechnologie.

Závěrem bych chtěl dodat, že tahle práce rozebírá zmíněnou technologii MEMS jen okrajově. MEMS je technologie obrovských možností. Stále se objevují nová odvětví, kde technologie MEMS nachází uplatnění. V roce 2008 dosáhl světový trh systémů MEMS hodnoty 72 miliard amerických dolarů. V letošním roce se předpokládá hodnota dokonce až 95 miliard. Je tedy patrné, že vliv této technologie stále roste.

CONSLUSION

In my thesis I try to explain Micro-Electro-Mechanical Systems (MEMS). First chapter summarizes the historical development of this technology. Followed by detailed explanation of the technological processes used to create structures for MEMS. The third chapter describes example materials that are machined by forementioned methods. At the end of the theoretical section, I have focused on the specific uses of MEMS to a) measure flow rates, b) analyze chemicals. This includes basic principles and methods. I have tried to complement all chapters and sub-chapters with appropriate figures.

The practical section lists particular devices suitable for use as flowmeters and chemical analyzers. These devices derive their functionality from MEMS structures. I have compiled their parameters, properties and use cases. My descriptions include photographs. I had trouble finding prices for these devices. Manufacturers generally don't list the prices and it's complicated to get this information from the distributors too. I have omitted the price comparison from my thesis almost completely. The last chapter comprises the list of some manufacturers who deal with micro-systems and micro-technology.

I'd like to add that my paper covers the MEMS technology only partially. It's a technology of great possibilities. New emerging branches keep appearing. In the year 2008, the world MEMS market reached 72 billion US dollars. The estimate for this year is up to 95 billion. It is clear that the influence of MEMS is rising.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

[1] HUSÁK, Miroslav . Mikrosenzory a mikroaktuátory. Praha : ACADEMIA, 2008. 544 s. ISBN 978-80-200-1478-8.

[2] HUSÁK, Miroslav. MEMS a mikrosystémové technologie. *Automa* [on-line]. 2008, roč. 14, č. 11 [cit. 2009-03-15], s. 7-11. Dostupný z: <http://www. odbornecasopisy.cz/res/pdf/38122.pdf>.

[3] GAD-EL-HAK, Mohamed. *The MEMS handbook.* CRC Press, 2002. 1331 s. ISBN 0-8493-0077-0

[4] *Litografie* [on-line]. 2003 [cit. 2009-02-20]. Dostupný z: <http://atmilab.upol.cz/vys/lit.html>.

[5] CHLACHULA, Petr Materiály pro mikro a nanosystémy. In Materiály pro mikro a nanosystémy, jejich tribologické vlastnosti a dostupnost [online]. Brno : [s.n.], 2008 [cit.2010-06-01]. Dostupné z WWW: <http://dl.uk.fme.vutbr.cz/zobraz_soubor.php?id=613>.

[6] Coandův jev [online]. 2009 [cit. 2010-06-01]. Fyzmatik píše. Dostupné z WWW: <http://fyzmatik.pise.cz/118326-coanduv-jev.html>.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Al	Hiník
Apod.	A podobně
cm^3/min	Centimetrů čtverečných za minutu
CMOS	Complementary Metal–Oxide–Semiconductor
HARPSS	Aspect Ratiocombined with Poly and Single-Crystal Silicon
hPa	hektoPascal
LIGA	Litographie Galvanoformung Abformung
m/s	Metry za sekundu
MEMS	Mikroelektromechanické systémy
ml/s	Mililitry za sekundu
ms	Milisekunda
MST	Mikrosystémová technologie
Např.	Například
nl/m	Nanolitry za sekundu
RF	Rádiová frekvence
SiO2	Oxid křemičitý
µl/min	Mikrolitry za minutu
µm	Mikrometr

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Schématické rozdělení komponent MEMS 14
Obr. 2 Povrchového mikroobrábění 16
Obr. 3 Geometrické motivy realizované objemovým mikroobráběním 17
Obr. 4 Hřebenový aktuátor realizovaný technologií SCREAM: 17
Obr. 5 Hřebenový aktuátor realizovaný technologií post-CMOS 18
Obr. 6 Fotolitografie – a)negativní fotorezist, b) pozitivní fotorezist 19
Obr. 7 Postup výrobní technologie LIGA 20
Obr. 8 Obrábění eximerovým laserem 21
Obr. 9 Mikrogyroskop vyrobený technologií HARPSS 22
Obr. 10 Mikrosoučástka vyrobená technologií HEXSIL 22
Obr. 11 Mikrotermoanemometr s tepelnou izolací 27
Obr. 12 Kapacitní průtokový senzor 28
Obr. 13 Průtokoměr s rezonančním můstkem 28
Obr. 14 Rezonanční průtokoměr s rezonanční membránou 29
Obr. 15 Průtokoměr s deformací nosníku 30
Obr. 16 průtokoměr s piezoodporovými tlakovými senzory a úzkým kanálem 31
Obr. 17 Fluidický oscilátor 31
Obr. 18 LOC firmy Agilent 32
Obr. 19 Plynový chromatograf 33
Obr. 20 Hmotnostní spektrometr 34
Obr. 21 O ptický mikrospektrometr 35
Obr. 22 Pr ůtokoměr SLQ-HC60 37
Obr. 23 Průtokoměr ALS1600 38
Obr. 24 Průtokoměr MF-50 39
Obr. 25 Plynový průtokoměr MFM 2020 40
Obr. 26 Minilaboratoř LOCAD-PTS 40