

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

**Využití mikroelektromechanických systémů v
senzorech plynů.**

**vedoucí práce: Ing. Tomáš Džugan
autor: Jakub Jirovec**

2012

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2011/2012

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

Jméno a příjmení: **Jakub JIROVEC**
Osobní číslo: **E11B0426P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektronika a telekomunikace**
Název tématu: **Využití mikroelektromechanických systémů v senzorech plynů**
Zadávací katedra: **Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací**


Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Prostudujte technologické postupy používané v MEMS.
2. Proveďte výčet elektrotechnických aplikací, ve kterých se využívají MEMS. Zvláště se zaměřte na využití v senzorech plynů.
3. Popište mechanismy, na kterých jsou založeny detektory plynů využívající MEMS.


Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího
Rozsah pracovní zprávy: 20 - 30 stran
Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická
Seznam odborné literatury:

1. Mottl, K.: Mikrotechnika - od myšlenky k produktu, Praha, 1999, ČVUT. - II. díl, s. 163-179.
2. Maixner, H.; Jones, R.: Sensors: a comprehensive survey. Volume 8, Micro- and nanosensor technology. Trends in sensor markets.
3. Elektronické informační zdroje

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Tomáš Džugan**
Katedra technologií a měření
Konzultant bakalářské práce: **Ing. Tomáš Džugan**
Katedra technologií a měření
Datum zadání bakalářské práce: **17. října 2011**
Termín odevzdání bakalářské práce: **3. června 2012**


Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan




Doc. Dr. Ing. Vjačeslav Georgiev
vedoucí katedry

V Plzni dne 17. října 2011

Anotace

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na popis mikroelektromechanických systémů (MEMS) a jejich využití. Jsou zde rozebírány základní principy funkce těchto systémů. V práci je také stručná historie MEMS a popis základních technologií používaných k výrobě MEMS. Další část této bakalářské práce je soustředěna na senzory (především pro detekci plynů), jejich rozdělení a principy.

Klíčová slova

Mikroelektromechanické systémy, mikrotechnologie, mikrosystémy, senzory plynů, HEXSIL, HARPSS, LIGA

Abstract

This submitted bachelor's dissertation is focused on description of micro-electro-mechanical systems (MEMS) and their utilization. In this bachelor's thesis are debated basic principles of functions of these systems. There is also mentioned brief history MEMS and description of basic technologies which are used during the production of MEMS. Next part of this bachelor's dissertation is concentrated on sensors (mainly for gas detection), their division and principles.

Key words

Micro-electro-mechanical systems, microtechnology, microsystems, sensor gas, HEXSIL, HARPSS, LIGA

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

V Plzni dne 6.6.2012

Jméno příjmení

Jakub Jirovec

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Tomášovi Džuganovi za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

| | |
|---|-----------|
| ÚVOD | 7 |
| 1 MIKROSYSTÉM | 9 |
| 1.1 DEFINICE MIKROSYSTÉMU | 9 |
| 1.2 MIKROSYSTÉMY V ELEKTRONICE | 9 |
| 2 HISTORIE MIKROSYSTEMŮ | 10 |
| 3 MIKROELEKTROMECHANICKÉ SYSTÉMY (MEMS) | 11 |
| 3.1 TECHNOLOGIE PRO REALIZACI..... | 12 |
| 3.1.1 Objemové mikroobrábění | 12 |
| 3.1.2 Povrchové mikroobrábění | 13 |
| 3.1.3 Mikroobrábění struktur s velkým poměrem geometrických rozměrů | 14 |
| 4 MATERIÁLY POUŽÍVANÉ PRO MIKROSYSTÉMY | 16 |
| 4.1 KŘEMÍK | 17 |
| 4.2 KERAMIKA..... | 17 |
| 4.3 POLYMERY | 17 |
| 4.4 KOVY..... | 17 |
| 5 VYUŽITÍ MEMS V PRŮMYSLU | 18 |
| 5.1 MIKROSENZOROVÉ SYSTÉMY..... | 18 |
| 5.2 MIKROAKČNÍ ČLENY (MIKROAKTUÁTORY) | 20 |
| 5.3 RADIOFREKVENČNÍ KOMPONENTY..... | 21 |
| 6 SENZORY VYUŽÍVAJÍCÍ MEMS | 22 |
| 6.1 SENZORY VYUŽÍVAJÍCÍ OPTICKÉHO PRINCIPU | 24 |
| 6.2 SENZORY VYUŽÍVAJÍCÍ KAPACITNÍHO PRINCIPU..... | 26 |
| 6.3 SENZORY VYUŽÍVAJÍCÍ REZONANČNÍHO PRINCIPU | 27 |
| 7 ZÁVĚR | 29 |
| 8 POUŽITÁ LITERATURA | 30 |

Seznam symbolů a zkratk

| | |
|---------------------|---|
| MEMS | Micro-Electro-Mechanical Systems. Mikroelektromechanický systém. |
| HEXSIL | HEXagonal honeycomb polySILicon |
| HARPS | High Aspect Ratio combined with Poly and Single-Crystal Silicon |
| LIGA | Litographie Galvanoformung Abformung |
| CMOS | Complementary Metal–Oxide–Semiconductor. Doplnující se kov-oxid-polovodič |
| SCREAM | Single Crystal Reactive Etch and Metallization. |
| DRIE | Deep reactive-ion etching. Hlubkově reaktivní iontové leptání. |
| ABS | Anti-Block Brake System. Protiblokovací systém. |
| LED | Light-Emitting Diode. Dioda emitující světlo. |
| VCSEL | Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers. |
| IR | Infrared. Infračervené záření. |
| CCD | Charge-Coupled Device Zařízení s vázanými náboji. |
| C | Kapacita [C]. |
| ε | Účinná dielektrická permitivita $\left[\frac{F}{m}\right]$. |
| A | Oblast překrytí elektrod $[m^2]$. |
| Δf | Frekvenční zdvih [Hz]. |
| $\Delta\varepsilon$ | Změna permitivity $\left[\frac{F}{m}\right]$. |
| Δt | Vzdálenost elektrod [m]. |
| f_0 | Rezonanční frekvence [Hz]. |
| v_a | Akustická rychlost $\left[\frac{m^3}{s}\right]$. |
| λ | Vlnová délka [m]. |
| E | Efektivní Youngův modul [Pa]. |
| ρ | Hustota $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$. |
| w | Polovina vlnové délky [m]. |
| GND | Společná zem. |

Úvod

V této bakalářské práci jsou popisovány mikrosystémy, především jejich použití v elektronice. Je zde také uvedena stručná historie mikrosystémů.

Jádrem práce je vysvětlení principu funkce mikroelektromechanických systémů (MEMS) v senzorech plynů a uvedení jejich stručného přehledu (včetně jednoduchého rozdělení na jednotlivé generace). Je uveden obecný pohled na senzor, jeho struktura, princip, možnosti vstupních a výstupních veličin a principy převodu.

Jsou zde rozebírány také technologie, kterými se komponenty pro MEMS senzory vytváří. U jednotlivých technologií jsou stručně popsány jejich výhody a možnosti použití, pro lepší přiblížení jsou zde uvedeny ilustrační obrázky. K této problematice patří pochopitelně i materiály, ze kterých se jednotlivé komponenty vyrábějí, proto jsou některé z těchto materiálů v práci stručně charakterizovány.

Detailněji jsou v práci popisovány MEMS senzory plynů na principu změny kapacity, rezonančním principu a senzory na optickém principu. U MEMS senzorů založených na optickém principu jsou blíže rozebrány senzory využívající IR záření a senzory využívající změn povrchového napětí. U senzorů na principu změny kapacity jsou popisovány mechanické děje vedoucí ke změně kapacity, včetně vysvětlení podstaty této změny a uvedení podmínek, které je nutno dodržet pro správnou funkci tohoto senzoru. U senzorů na rezonančním principu jsou popisovány děje elektro-akustické přeměny v piezoelektrických materiálech.

V samotném závěru bakalářské práce je zamyšlení nad budoucím vývojem mikrosystémů, jejich uplatnění v jednotlivých průmyslových odvětvích a možném nástupci těchto technologií.

1 Mikrosystém

1.1 Definice mikrosystému

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

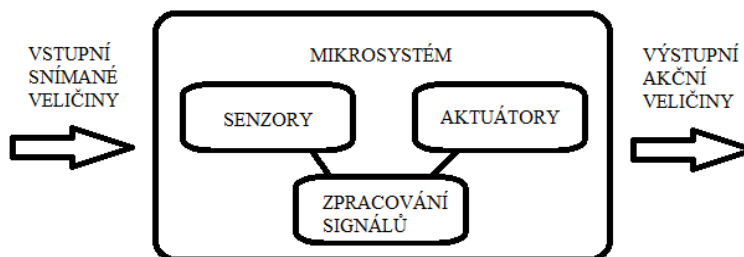
1.2 Mikrosystémy v elektronice

S rozvojem elektroniky se začalo s využíváním některých polovodičových struktur v mezioborových aplikacích. Vzniklé mezioborové produkty sdružovaly různé typy veličin (mechanické, tepelné, optické, magnetické, chemické a elektrické) v jeden celek. Poznatky ze všech oborů se začaly uplatňovat v nových technologiích, používaných při zpracování polovodičových materiálů. Vzniklý mezioborový systém se začal nazývat mikrosystém. Pro mikrosystém je charakteristické spojení elektrických, mechanických, optických nebo dalších signálových domén na jednom čipu. Mikrosystém je obecně tvořen třemi bloky (senzory, procesory a aktuátory). Různé mikrosystémy lze využít v mnoha oblastech našeho života. Pojem mikrosystém je v různých částech světa chápán odlišně.

V Evropě je mikrosystém chápán jako miniaturní inteligentní systém, který vykonává 3 základní úkony (snímá informace, zpracovává signál a vykonává akční funkce na výstupu). Mikrosystém může být realizován jako integrovaný na jednom čipu, nebo jako multičipový hybrid.

V USA je mikrosystém 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.

V Japonsku je mikrosystém chápán jako mikropřístroj, který vykonává specifickou funkci. [1,2]



Obr. 1 Typické součásti mikrosystému [2]

2 Historie mikrosystémů

Mikrosystémy jsou považovány za nejdůležitější technologii 21. století. Základ mikrosystémů byl položen objevem polovodičového tranzistoru v roce 1947. Elektronika je nejrychleji se rozvíjející technický obor. Vlastní impuls k miniaturizaci dal americký fyzik a nositel Nobelovy ceny Richard Feynman, který nabídl 1000 dolarů tomu kdo sestaví elektromotor, který se vejde do krychle o straně 0,4 mm. Dále na svých přednáškách prezentoval vizi miniaturizace. Poté se začala postupně převádět teorie v praxi. V roce 1987 se v USA na konferenci se zaměřením na mikrodynamiku poprvé objevil termín MEMS (Micro-Electro-Mechanical System), který pojmenoval novou oblast mikrozařízení. V dalších letech přinesl výzkum v této oblasti mnoho nových poznatků, které vedly nejen ke zmenšování součástek, ale také ke zvyšování kvality, výkonu, snižování výrobních nákladů a spotřeby. Postupně tyto součástky začaly ve velké míře nahrazovat součástky velké s mnohdy horšími parametry. A ukázalo se tak, že se vývoj vydal správním směrem. Bez mikrosystémů by se nemohlo rozvíjet, a ani by nevzniklo mnoho odvětví, jako jsou např. letectví, kosmický program, bezpečnostní systémy a ochrana životního prostředí. Dnes jsou mikrosystémy součástí běžných zařízení, se kterými se setkáváme každý den. V dnešní době vývoj stále pokračuje, a v miniaturizaci začíná miktotechnologii nahrazovat nanotechnologie.

3 Mikroelektromechanické Systémy (MEMS)

Zkratka MEMS pochází z USA. MEMS je výrobní technologie pomocí níž se realizují integrované zařízení nebo systémy kombinující elektrické a mechanické součásti. Systémy mohou nabývat velikostí od jednotek mikrometrů do několika milimetrů.

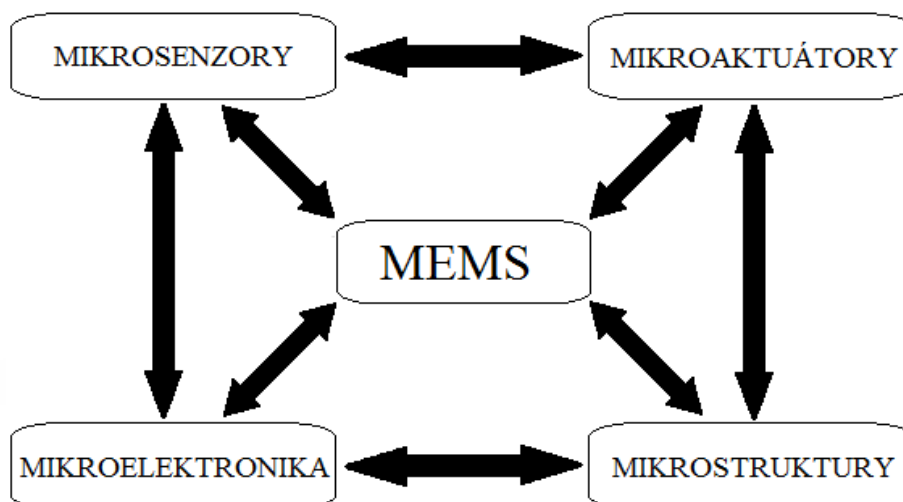
MEMS mají 4 základní části: mikrostruktury, mikrosenzory, mikroelektronika a mikroaktuátory. Ty mohou být obsaženy na jednom čipu, nebo jako multičipový hybrid. [1,2]

Mikrostruktury - v této části se nachází pohyblivé mechanické části

Mikrosenzory - pomocí mikrosenzorů jsou snímány měřené fyzikální, chemické nebo biologické veličiny. Ty jsou zpracovány na elektrický signál, který se dále zpracovává.

Mikroelektronika - tato část je řídicí částí celého systému. Jsou zde obsaženy řídicí obvody a dochází zde ke zpracování signálu.

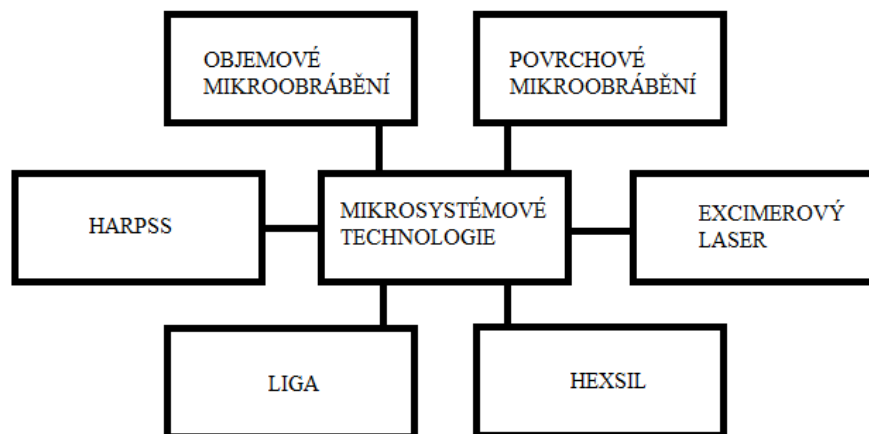
Mikroaktuátory - slouží ke komunikaci systému s okolním prostředím (řízení fyzikálních a biochemických veličin)



Obr. 2 Schematické rozdělení komponent MEMS [1]

3.1 Technologie pro realizaci

Pomocí mikrosystémových technologií mohou vznikat prostorové mikrostruktury. Takto vzniklé mikrostruktury se dají použít mnoha způsoby: jako mikrosenzory, mikroaktuátory nebo jako jednotlivé mikrosoučástky (cívky, relé a spínače). Kompatibilní technologie umožňuje integrovat různé mikrostruktury na jeden čip. Existuje velké množství technologií pro výrobu mikrostruktur. Ty nabývají rozměrů od jednotek do tisíců mikrometrů. Nejpoužívanějšími technologiemi jsou objemové a povrchové mikroobrábění. [2]



Obr. 3 Mikrosystémové technologie pro realizaci MEMS [2]

3.1.1 Objemové mikroobrábění

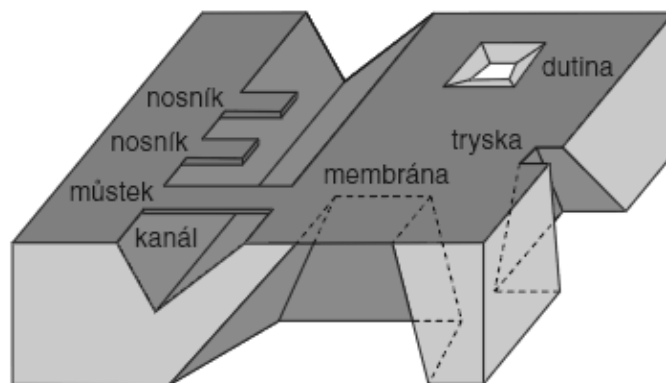
Je to mikrosystémová technologie, která výslednou strukturu tvaruje z objemu základního materiálu. K tomu se ovšem nepoužívá žádný obráběcí nástroj. Při této technologii dochází selektivnímu odebrání částí substrátu (Si, GaAs, sklo atd.). Typickými procesy jsou izotropní a anizotropní mokré leptání, leptání se závislostí na koncentraci příměsí s použitím roztoku KOH nebo suché leptání.

Takto lze vyrobit například senzory tlaku, senzory průtoku nebo čtecí a zapisovací hlavy. Dají se tak vyrobit i komponenty MEMS (nosníky, membrány nebo destičky). [2]

Speciální technologie:

SCREAM - kombinuje izotropní a anizotropní suché leptání pro výrobu zavěšených struktur

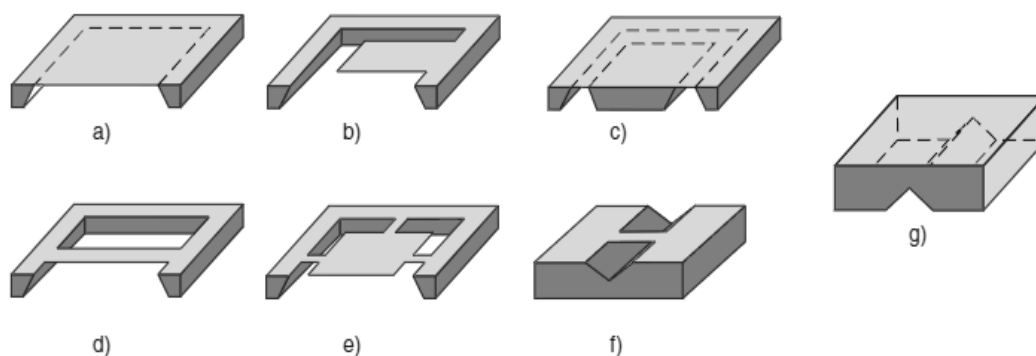
Post - CMOS - využívá suché leptání pro výrobu zavěšených mikrostruktur ve spojení s integrovanými obvody CMOS



Obr. 4 Mikrostruktury realizované objemovým mikrobráběním [2]

3.1.2 Povrchové mikrobrábění

Pomocí technologie výroby MEMS vytváříme pohyblivé struktury na povrchu substrátu. Výhodami této technologie jsou velmi malé rozměry a jednoduchá integrace. Takto lze vyrábět složité struktury senzorů a aktuátorů (akcelerometry, gyroskopy, radiofrekvenční spínače atd.). Při této technologii dochází k postupnému nanášení tenkých vrstev na substrát. Poté jsou části materiálu odleptány. Takto vznikají struktury (membrány, mikronosníky, mikromůstky a kanálové mikrostruktury). Integrace MEMS a elektrických obvodů vede k vyšší spolehlivosti, funkčnosti, použití jednoho pouzdra, zmenšení velikosti a zlepšení využitelnosti. [2]



Obr. 5 Mikrostruktury realizované povrchovým mikrobráběním: a) uzavřená membrána, b) mikronosník, c) membrána se seismickou hmotou, d) mikromůstek, e) zavěšená membrána, f) mikrokanálek, g) kryt [2]

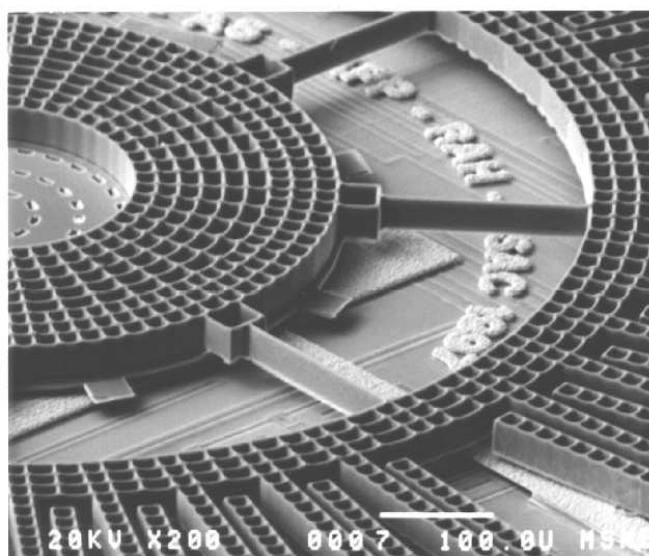
3.1.3 Mikroobrábění struktur s velkým poměrem geometrických rozměrů

Spadají sem struktury s velkým poměrem horizontálních a vertikálních rozměrů. Ty se pomocí předchozích technologií nedají realizovat, proto byly vyvinuty speciální technologie (HEXSIL, HARPSS nebo LIGA). Také lze použít anizotropní suché leptání s polymerovou směrovou pasivací, kde dochází k cyklické pasivaci stěn a leptání (výroba průchodek objemu materiálu). Takto se vyrábí tekutinové mikrosystémy (mikropumpy). [2]

HEXSIL (HEXagonal honeycomb polySILicon)

Touto technologií se vyrábí struktury s velkým poměrem hloubka-šířka. Použité technologické procesy jsou DRIE (Deep reactive ion etching), leptání fluorovodíkem.

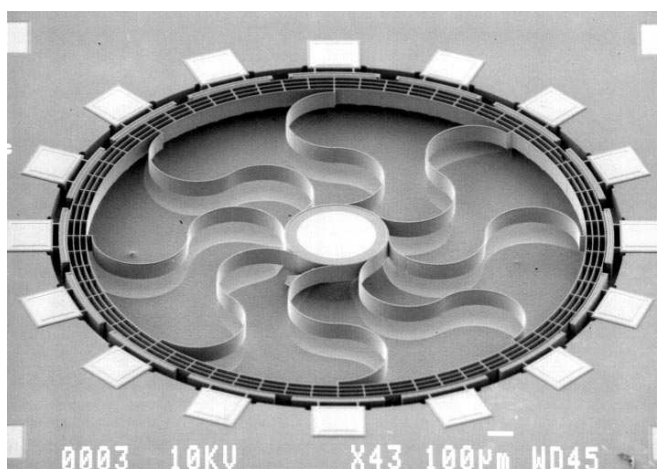
DRIE (hloubkově reaktivní iontové leptání) - je to vysoce anizotropní leptání sloužící k vytvoření hlubokých strmých otvorů a rýh v desce s poměrem stran 20:1. [2,14]



Obr. 6 Úhlový mikroaktuátor vyrobený technologií HEXSIL [2]

HARPSS (High Aspect Ratio combined with Poly and Single-Crystal Silicon)

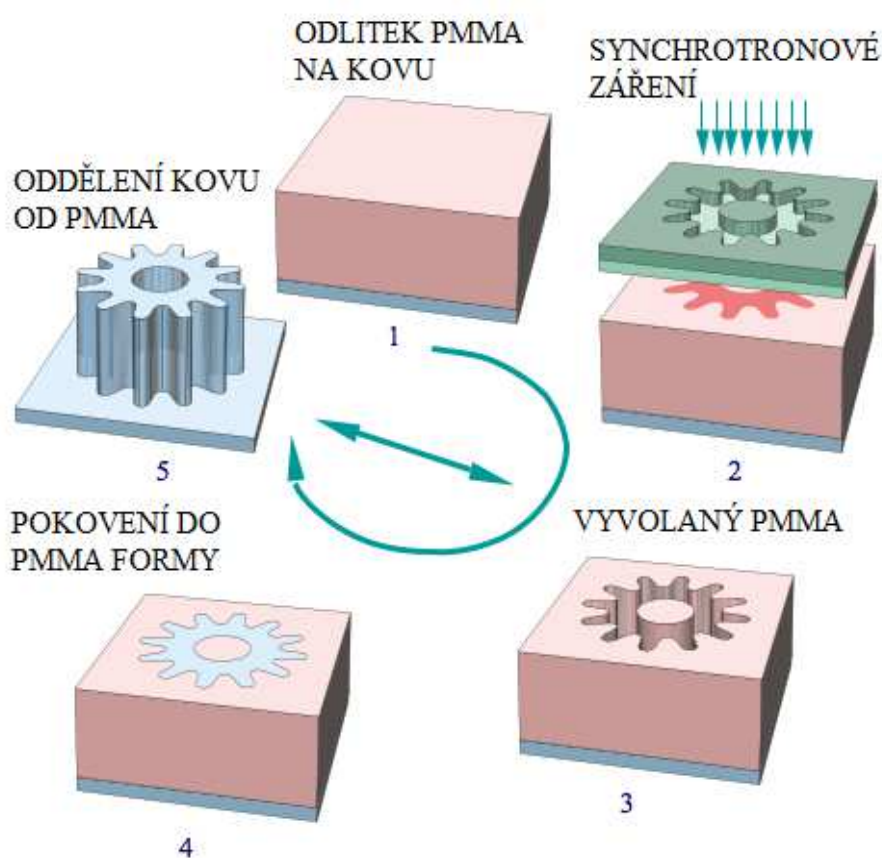
Pomocí této technologie se realizují elektricky izolované polykrystalické a monokrystalické mikrostruktury s kapacitní vzduchovou mezerou. Ta může měřit až desítky mikrometrů. Vyrábí se tak inertní senzory a RF rezonátory. [2,14]



Obr. 7 Mikrogroskop vyrobený technologií HARPSS [2]

LIGA (Litographie Galvanoformung Abformung)

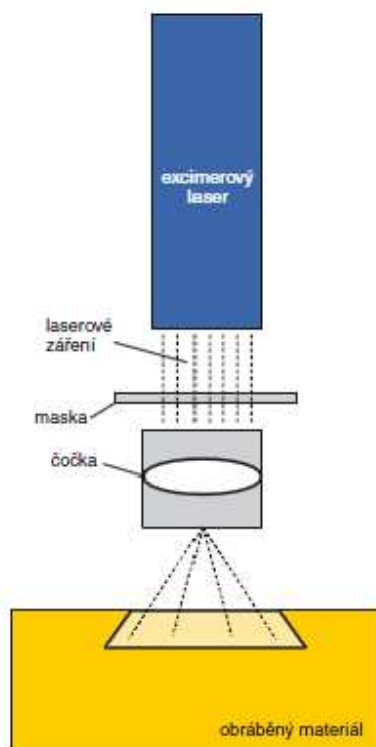
Technologie byla vyvinuta v roce 1986 v německém jaderném výzkumném centru. Slouží k prostorovému tvarování kovů, plastů, skla a keramiky. Takto lze vyrobit struktury jemných tvarů. Při výrobě se využívá litografie, elektrolytické pokovování a lisování. Využívá se speciálního rentgenového záření (synchrotronové záření), které s využitím speciální masky ozáří polymethylmethakrylát (PMMA). Hloubka průniku záření do PMMA je velmi velká. Touto technologií se dají realizovat struktury s výškou až 1000 μm . Hrany vyvolaného materiálu jsou pak hladké a dokonale svíslé. Používané kovy jsou nikel (Ni) nebo permalloy (NiFe). [13]



Obr. 8 Postup výrobní technologie LIGA [13]

Mikroobrábění excimerovým laserem

Při této technologii se materiál odstraňuje pomocí laserového paprsku, který pracuje v pulzním režimu. To slouží k velmi přesnému odebrání materiálu. Tak se dá řídit odstraňování materiálu (hloubka a tvar materiálu). Pro vytváření prostorových struktur se používá speciální optika. Excimerový laser lze využít pro obrábění organických materiálů, plastů a polymerů. [2]



Obr. 9 Mikroobrábění excimerovým laserem [2]

4 Materiály používané pro mikrosystémy

Existuje mnoho různých materiálů lišících se svými vlastnostmi. Základními vlastnostmi je tvrdost, pružnost, tvárnost, houževnatost, tepelná vodivost. Materiály používané v MEMS potřebují vykazovat dobré vlastnosti. U materiálů zvažujeme chemické složení, mechanické vlastnosti a strukturu. MEMS jsou navrženy tak, aby vykonávaly určené funkce v malém časovém rozsahu. Toto se musí zohlednit u použitého materiálu. Negativní vlivy jsou velké brzdící síly (soudržnost a tření). Materiály MEMS musí vykazovat dobré mechanické a tribologické vlastnosti. Z uvedených materiálů pomocí technologií pro realizaci MEMS vznikají požadované mikrostruktury. Nejpoužívanější materiály jsou uvedeny níže. [4]

4.1 Křemík

Křemík je nejvíce používaný materiál v integrovaných obvodech používaných ve spotřební elektronice. Snadná dostupnost a dobrá elektrická funkčnost zapříčiňují, že je to nejvíce používaný materiál v MEMS. Křemík má vynikající fyzikální vlastnosti (tvrdost, pevnost v tahu a dobrá elektrická vodivost). Samotný křemík nemá dobré tribologické vlastnosti, proto se jeho povrch chemicky nebo topograficky upravuje. Technikou pro použití křemíku v MEMS je nanášení vrstev na materiál, které se pak litograficky odstraňují, aby vznikly požadované tvary. [4]

4.2 Keramika

Keramika je křehký materiál a nejlépe se uplatňuje ve velmi mechanicky namáhaných systémech. Významné vlastnosti keramických materiálů jsou: dlouhá životnost, ořezuvzdornost a odolnost vůči vysoké teplotě. [4]

Al_2O_3 - chemicky odolný, vysoká odolnost proti opotřebení, nízká tepelná vodivost a roztažnost, obtížné zpracování a drahá výroba

SiC - nízký koeficient tření, vysoká ořezuvzdornost a odolnost proti vysokým teplotám

4.3 Polymery

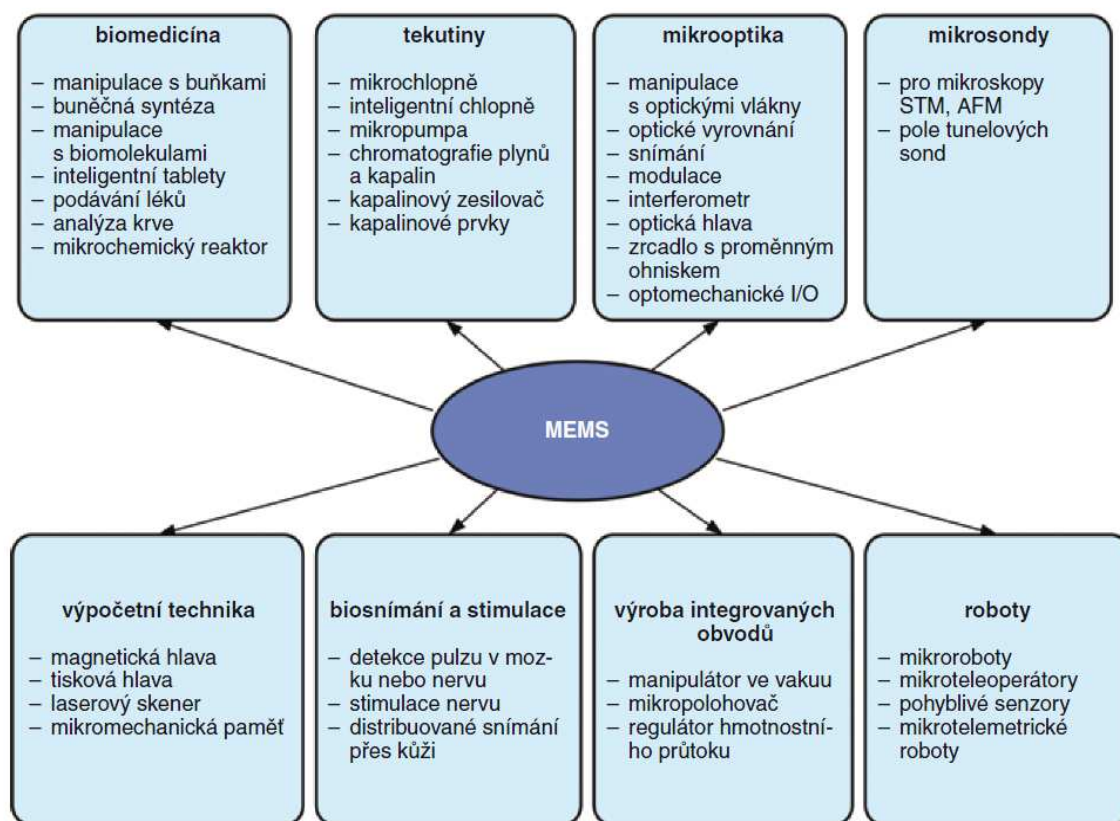
Zařízení MEMS se mohou vyrobit z polymerů pomocí procesů, jako jsou výlisek, reliéfní tisk nebo litografie. Mezi polymery patří různé plasty s rozdílnou kvalitou. Používané plasty jsou PVC, PP, PE, PS a další. Základními vlastnostmi je nízká tvrdost, teplotní stabilita, nízká cena. Polymery se využívají jako izolační materiál, zapouzdření a obaly mikrosystému, pro výrobu mikrostruktur a v technologickém procesu LIGA. [4]

4.4 Kovy

Kovy mají velkou míru spolehlivosti a stálý koeficient tření. Používané kovy jsou zlato, stříbro, platina, wolfram, hliník a měď. Hlavní použití kovů je nanášení aktivních vrstev (elektrody). Kovy lze použít i k vytvoření mikrostruktur, ale vzhledem k složité výrobě se mikrostruktury z kovu nepoužívají. [4]

5 Využití MEMS v průmyslu

Předností mikrosystémů je možnost miniaturizace, využití materiálů z integrovaných obvodů. Vlivem mikrosystémové techniky dochází ke zlepšení vlastností dosavadních systémů. Mikromechanické součástky jsou menší, přesnější a rychlejší než makroskopické součástky. Díky mikrosystémům došlo k velkému pokroku v medicíně, kde umožnily vznik mnoha systémů např. řízené skalpely, kardiostimulátory a biochemické laboratoře vytvořené na jednom čipu. Mikrosystémy mají, uplatnění i v mnoha jiných odvětvích, jako jsou automobily (airbagy, ABS, navigační systémy), kosmický výzkum, bezpečnostní systémy a ochrana životního prostředí. [3]



Obr. 10 Nejčastější oblasti využití MEMS [2]

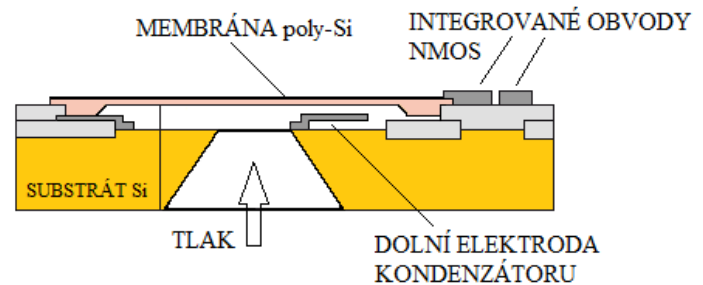
5.1 Mikrosenzorové systémy

Do této skupiny patří například senzory tlaku, akcelerometry, senzory mikrovlnného záření, průtokoměry a senzory plynu. Mikro a makro senzory mají srovnatelné vlastnosti. Liší se pouze použitím, mikrosenzory lze umístit na místa, kde makrosenzory nelze použít. Různé mikrosystémy lze integrovat na jeden čip. To zvyšuje jejich využitelnost. [3]

Senzory tlaku

Senzory tlaku jsou dvojího druhu (piezodporové a kapacitní). Piezodporové senzory s membránou z křemíku jsou hodně rozšířené. Vyrábějí se pomocí povrchového nebo objemového mikroobrábění. Měřený tlak se převádí na mechanické namáhání piezodporů, které jsou v pružné membráně. Mají lineární převodní charakteristiku.

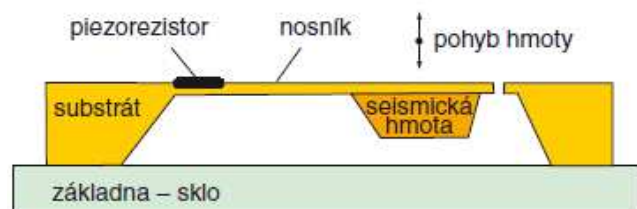
Kapacitní mikrosenzory mají také membránu, ale tlak se měří změnou kapacity. Senzory mají velkou citlivost a malou tepelnou závislost. Mají nelineární převodní charakteristiku. [3]



Obr. 11 Kapacitní senzor tlaku [2]

Akcelerometry

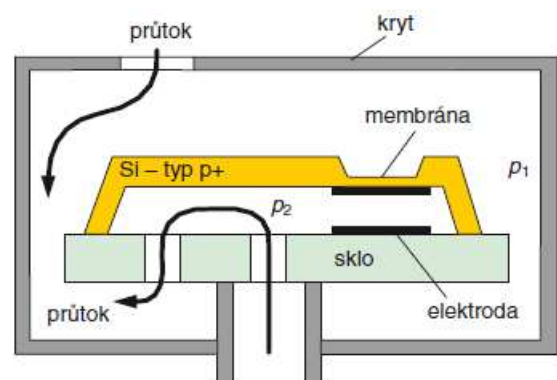
Mikroakcelerometry jsou také dvojího druhu. Piezodporové mikroakcelerometry jsou tvořeny seismickou hmotou a mikronosníkem, vytvořeny z monokrystalického křemíku. Zrychlení se měří pomocí piezodporů, které jsou umístěny v pružném mikronosníku. Kapacitní mikroakcelerometry měří zrychlení pomocí výchylky seismické hmoty. Mohou se realizovat s elektrickými obvody CMOS na jednom čipu. Mají větší citlivost a stabilitu než piezodporové. Mikroakcelerometry mají v průmyslu stále větší význam.[3]



Obr. 12 Akcelerometr s piezorezisty [2]

Průtokoměry

Mikroprůtokoměry měří průtok plynu nebo kapaliny v prostoru. Mikroprůtokoměry jsou realizovány mikromůstkami, mikronosníky nebo membránou. Ty jsou uchyceny pouze na krajích. [3]



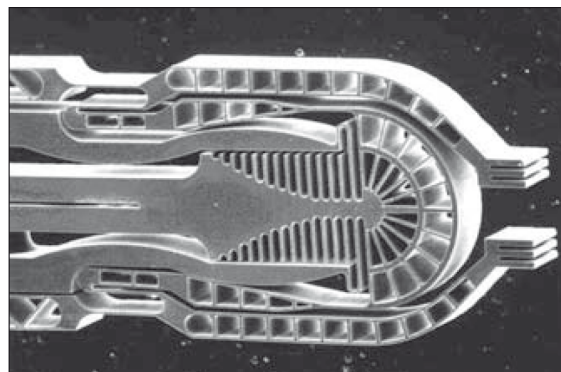
Obr. 13 Kapacitní senzor průtoku [2]

5.2 Mikroakční členy (Mikroaktuátory)

Technologií MEMS se realizují deformovatelné členy. Ty slouží k výrobě např.: mikromanipulátorů, mikromotorů, optických spínačů, mikropump, mikropřepínačů, RF prvků a mikropohonů. [3]

Manipulátory

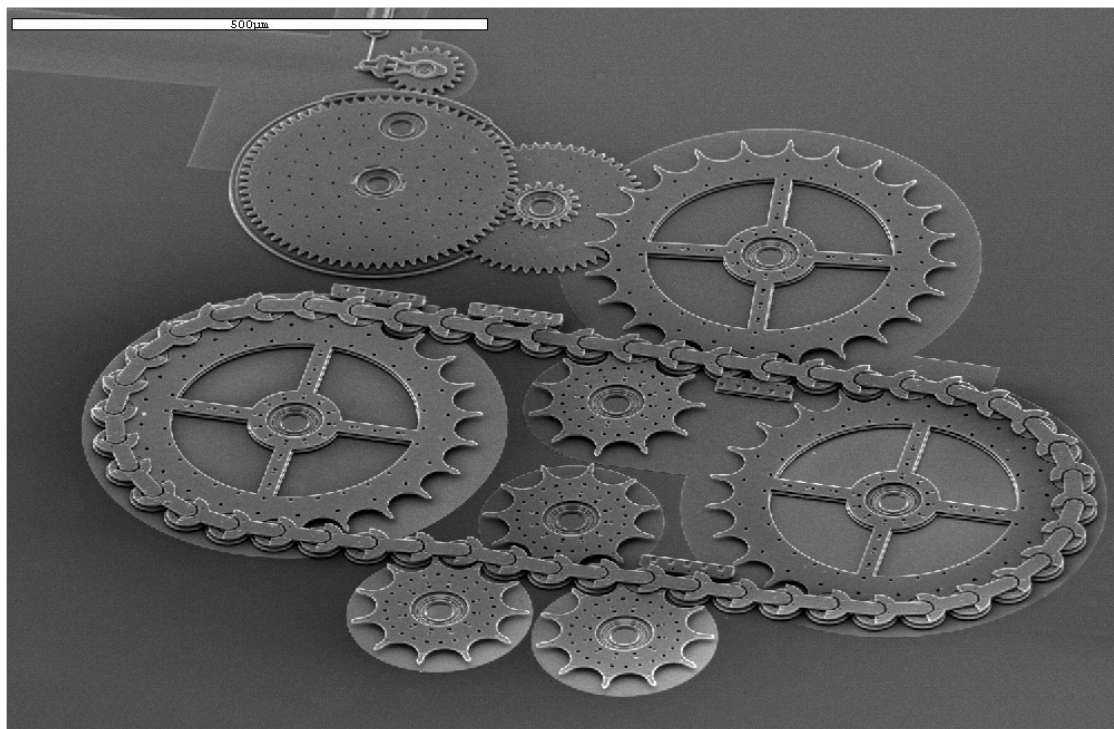
Mikromanipulátory jsou tepelně a elektrostaticky řízené. Tepelně řízené jsou realizovány na principu tepelné roztažnosti pevných látek nebo expanzi plynů při hoření. Elektrostaticky řízené se realizují pomocí kondenzátorové struktury. [3]



Obr. 14 Tepelně řízený mikroaktuátor [2]

Motory

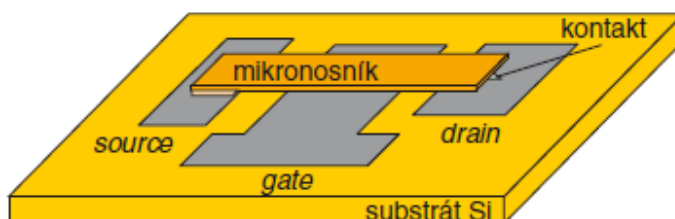
Mikromotor se skládá z rotoru a statoru. Existuje mnoho konstrukčních konfigurací. Například Rotační elektrostatický s proměnnou kapacitou. Na rotoru i statoru jsou póly, které tvoří proměnnou kapacitu. Rotor je uzemněný a na stator je přivedené budící napětí. Nebo Rohatkový rotační mikromotor, který má kruhově uspořádanou hřebenovou strukturu elektrostatického pohonu. [3]



Obr. 15 Křemíkový mikrořetězový pohon [16]

Přepínače

Mikropřepínače se používají jako relé nebo RF přepínače. Ke spínání kontaktů se využívá principu (elektrostatického, magnetického, piezoelektrického atd.). Nejvíce využívaný je elektrostatický, který má nejlepší vlastnosti (malé elektrody, malá doba sepnutí, malá setrvačnost systému a dobrá síla sepnutí). Mikropřepínače se využívají v telekomunikacích, zesilovačích, oscilátorech, automobilovém průmyslu, radarových a satelitních systémech. [3]

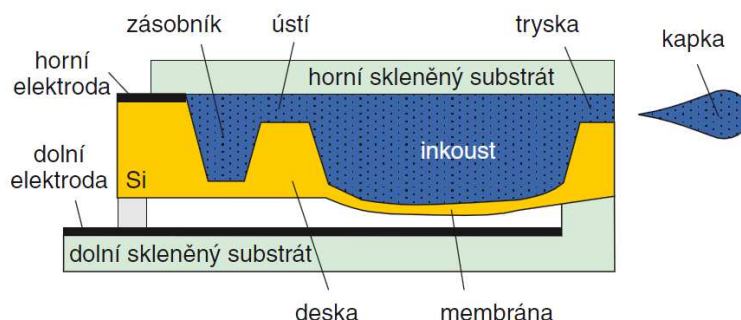


Obr. 16 Elektrostaticky řízené relé [2]

Tiskové hlavy

První inkoustové hlavy se objevily v roce 1998. Inkoustové hlavy mají životnost až 4 miliardy kapek. Využívají mnoha fyzikálních principů (piezoelektrický, tepelný, magnetický a akustický). Na obrázku je znázorněn elektrostatický generátor kapek určený pro inkoustové hlavy.

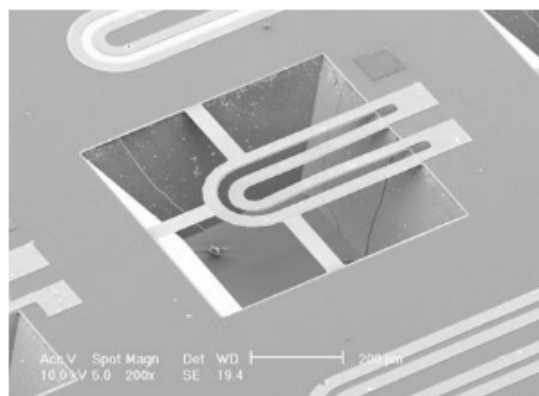
Generátor je řízen přivedením napětí na dolní elektrodu. [3]



Obr. 17 Tisková hlava [2]

5.3 Radiofrekvenční komponenty

Zařízení MEMS v mikrovlnných obvodech snižují ztráty signálu v širokém frekvenčním pásmu. Technologií MEMS lze vyrobit různé RF prvky jako laditelné kondenzátory, filtry a rezonátory na čipu. To vše má vynikající mechanické a elektrické vlastnosti a velkou linearitu. [3]



Obr. 18 Laditelná cívka RF MEMS [15]

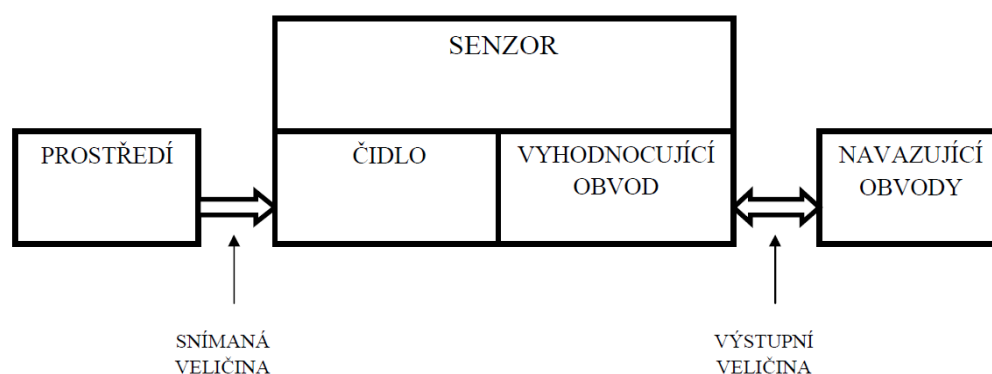
6 Sensory využívající MEMS

Senzory plynů

Senzory plynů se používají k detekování znečištění vzduchu, v alkohol testerech, kontrole kvality a stáří potravin, detekci těkavých a toxických látek. [5]

Senzor

Senzor je zařízení, které snímá pomocí čidla určenou fyzikální, chemickou nebo biologickou veličinu. Tato veličina je poté převedena pomocí detekujícího obvodu na požadovanou výstupní veličinu, zpravidla to bývá elektrický signál. Ten je pak dále zpracováván v navazujících obvodech. [5]



Obr. 19 Obecné znázornění senzoru

Existují tři generace senzorů:

První generace senzorů

Tato generace využívá elektromechanického, elektrochemického nebo mechanického principu. Patří sem odporové, kontaktní nebo kapacitní senzory.

Druhá generace senzorů

Tato generace využívá jevů, jako jsou piezoelektrický, magnetostrikční, fotoelektrický nebo nárazová ionizace. Patří sem polovodičové (inteligentní) senzory.

Třetí generace senzorů

Tato generace využívá neelektrických veličin (světelného záření). Při výrobě se používají principy optoelektrické a integrované optiky.

Rozdělení senzorů

Senzory rozdělujeme podle:

- Vstupní veličiny**
- geometrických veličin (měření polohy, posunutí, atd.)
 - mechanických veličin (měření rychlosti, akcelerace, síly, tlaku, průtoku, mechanického napětí, atd.)
 - teplotních veličin (teplota, tepelný tok, atd.)
 - elektrických a magnetických veličin
 - intenzity vyzařování (elektromagnetické, radiační veličiny ve viditelném, infračerveném a jiném spektru, zvukové, atd.)
 - chemických veličin (koncentrace iontů nebo plynů, pH, iontově selektivní analýza atd.)

Výstupní veličiny - elektrický signál

- optické veličiny (změna barvy, jasu)
- mechanické veličiny (posunutí ukazatele)

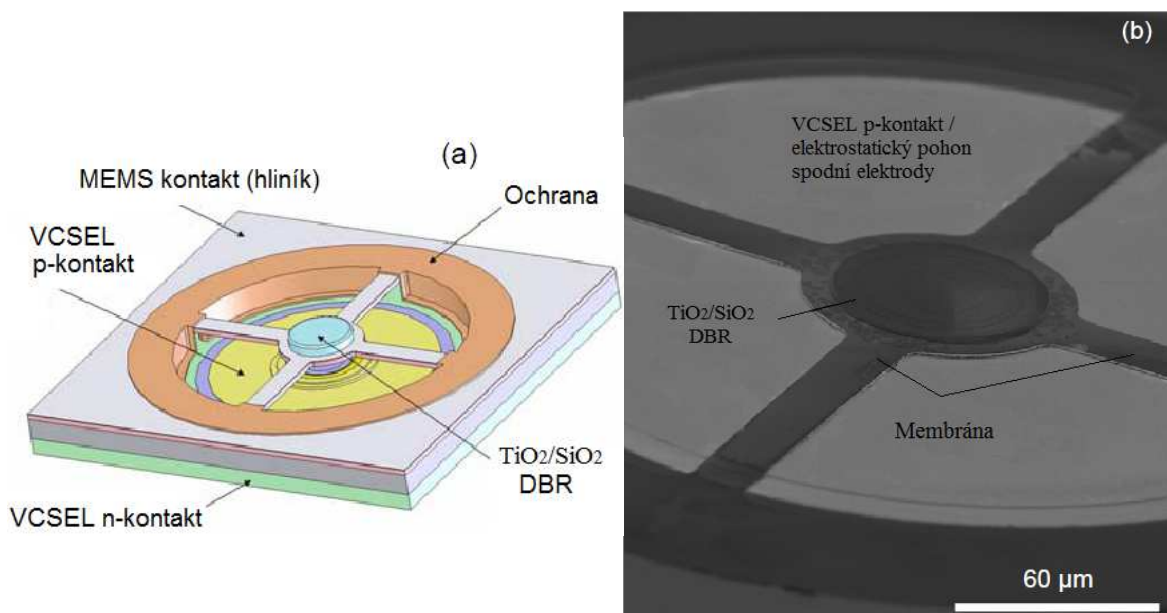
Principu převodu - fyzikálním převodem (mechanicko-elektrický atd.)

- chemickým převodem (absorpce, redukce, oxidace atd.)
- biochemickým převodem (enzymy, protilátky atd.)

6.1 Sensory využívající optického principu

Senzor využívající IR záření

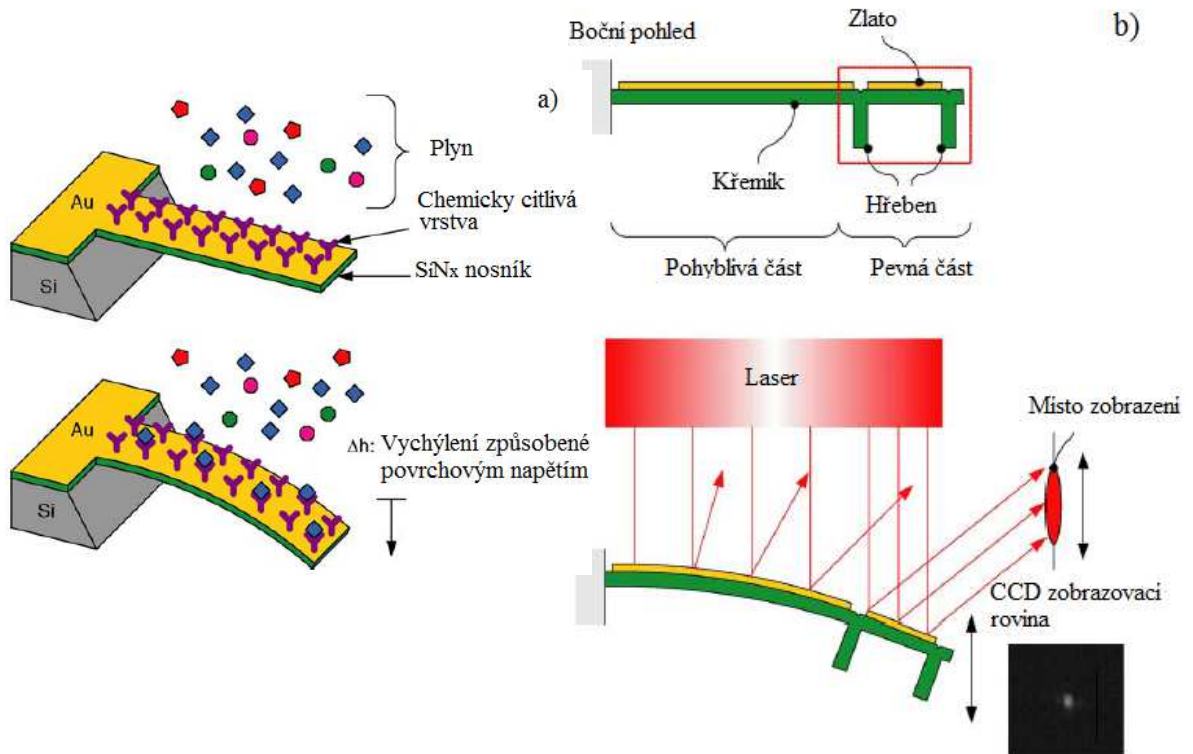
Princip spočívá v tom, že částice plynu jsou ozářeny infračerveným zářením. Uzavřený objem plynu absorbuje energii z optického zdroje. Tím se vytvářejí periodické tlakové vlny. Ty jsou zachyceny pomocí mikrofону. Díky rozdílné absorpci každého plynu, tím i rozdílné tlakové vlny, jsme schopni detekovat plyn i jeho koncentraci. Jako zdroj záření se používají LED diody nebo laserové diody. Nejpoužívanější laserovou diodou je VCSEL (povrchově vyzařující laser). Pro detekci se pak využívají fotodiody, PIN diody a fototranzistory. Při velmi přesném ladění vlnové délky je zapotřebí chlazení laseru VCSEL, proto se používá společně s technologií MEMS. Laser se naladí pouze nahrubo, poté se k jemnému naladění použije membrána vytvořená technologií MEMS. Používá se například pro detekci O_2 , N_2O , CO_x , CH_4 , NF HCl atd. Infračervené senzory jsou velmi přesné, citlivé a spolehlivé. Dříve tyto senzory byly velké a drahé. Technologie miniaturizace nám umožňují umístit všechny optické komponenty na jeden čip. V dostupných informacích jsem našel několik senzorů: SensorChip-CO2-4P, SRH-05 a SJH-5, které se v současné době v praxi používají. [6,8,11]



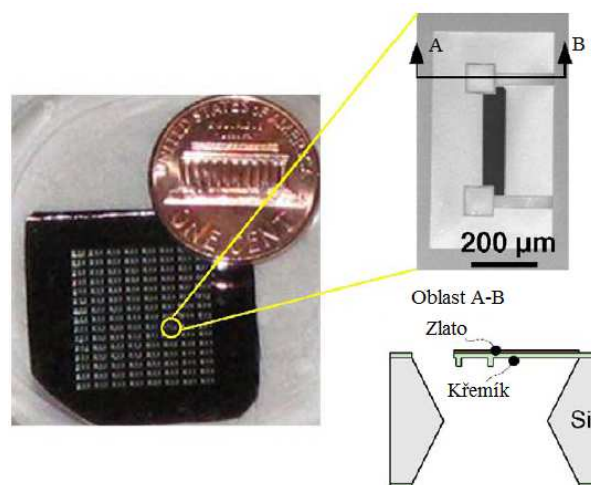
Obr. 20 a) Model laditelného VCSEL laseru, b) Detail laditelné membrány [6]

Senzor využívající změn povrchového napětí

Tento senzor je tvořen nosníkem, který je vytvořený technologií MEMS. Nosník je tvořený s křemíkem, který je potažený tenkou vrstvou zlata. Dále je na povrch nanášena tenká chemicky citlivá vrstva. Ta při reakci chemicky citlivé vrstvy s plynem dochází ke změně povrchového napětí v nosníku. To má za následek vychýlení nosníku. Výchylka je zaznamenána pomocí laseru a CCD. Laserem se osvítí nosník a sledují se odražené paprsky, které se zobrazí na CCD snímáči. [9]



Obr. 21 a) Zobrazení reakce chemicky citlivé vrstvy s plynem, b) Zobrazení výchylky pomocí laseru [9]



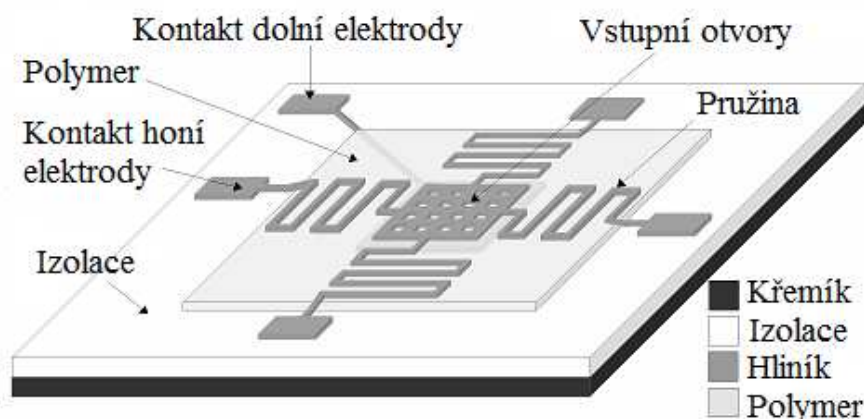
Obr. 22 Zobrazení výsledného čipu [9]

6.2 Senzory využívající kapacitního principu

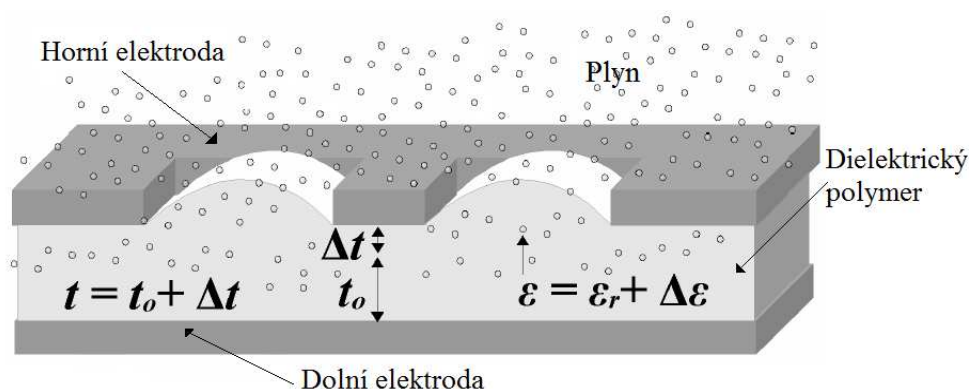
Principem je změna kapacity. Ta je poté převedena na elektrický signál. Čidlo je tvořeno dvěma překrývajícími se vrstvami kovu. Horní elektroda musí být porézní, aby se plyn mohl dostat k chemicky citlivému dielektrickému polymeru. Toho je dosaženo leptáním. Kontakty elektrod jsou umístěny na destičce tvořené křemíkem. Horní elektroda je kontaktem spojena pomocí pružin. To umožňuje pružnou reakci na změnu objemu polymeru. Elektrody jsou tvořeny hliníkem. Chemicky citlivý dielektrický polymer při kontaktu s plynem změní permitivitu a zvětší svůj objem, díky čemuž dochází k oddalování elektrod. Změna permitivity $\Delta\varepsilon$ musí být minimální vůči změně vzdálenosti elektrod Δt . Δt musí být dominantní, aby fungoval princip oddalování elektrod. Kdyby byly stejné, tak by se efekt změny kapacity vyrušil. To je patrné ze vztahu (1).

Vztah pro výpočet kapacity:
$$C = \frac{\varepsilon \cdot A}{t} \quad (1)$$

Kde C je kapacita, ε je účinná dielektrická permitivita a A je oblast překrytí elektrod. Běžné změny kapacity jsou v řádech pF. [7,10]



Obr. 23 Kapacitní senzor plynů 1 [7]



Obr. 24 Kapacitní senzor plynů 2 [7]

6.3 Sensory využívající rezonančního principu

Tento senzor využívá elektro-akustické přeměny v piezoelektrických materiálech. Připojením elektrického napětí na elektrody dojde k deformování piezoelektrického materiálu a vytvoření akustických vln. Generování akustické vlny se šíří na povrchu nebo uvnitř piezoelektrického materiálu. Tento senzor je velice citlivý na změnu vlastností piezoelektrického krystalu (hlavně na změnu krystalu).

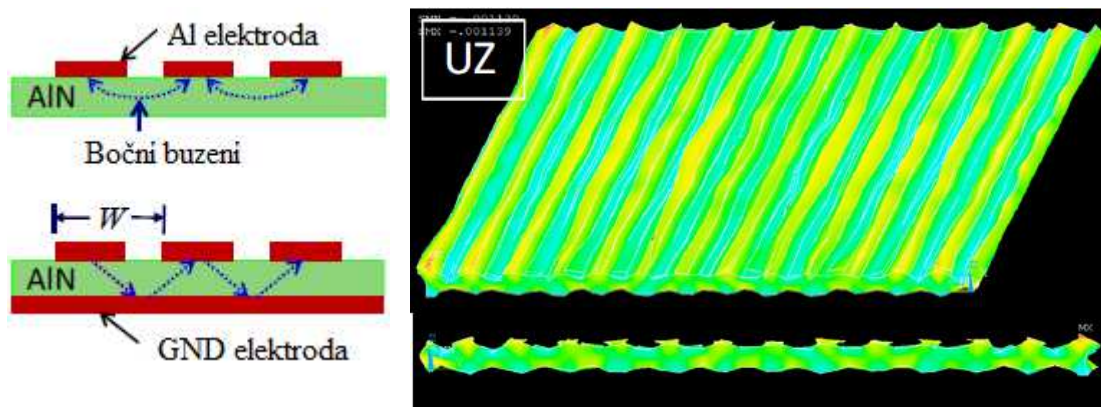
Senzor je tvořen horní, dolní elektrodou a piezoelektrickou vrstvou, na které je nanášena tenká vrstva chemicky citlivého materiálu. Tato chemická vrstva reaguje s okolním plynem. Při reakci dochází ke změně materiálových konstant vlivem absorpce procházejícího plynu, který způsobí změnu pružnosti materiálu E a také složení ρ . Dochází také k nanášení vrstev vzniklých chemickou reakcí při průchodu plynem, tím dochází i ke změně vzdálenosti elektrod W . Tyto změny se projeví na ovlivnění rezonanční frekvence senzoru f . Je jasné, že materiál musí být schopen pohlcený plyn zase uvolnit a vrátit se do původního stavu, musí jít o vratnou chemickou reakci. Je zřejmé, že dochází k fyzické detekci plynu.

Jako referenční rezonanční frekvence senzoru f_0 se bere frekvence, která je dána rozměry a materiálem senzoru bez okolního ovlivňování.

Vztah pro rezonanční frekvenci:

$$f_0 = \frac{v_a}{\lambda} = \frac{1}{\lambda} \sqrt{\frac{E}{\rho}} = \frac{1}{2W} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (2)$$

Kde v_a je akustická rychlost, λ vlnová délka, E je efektivní Youngův modul, W je polovina vlnové délky (vzdálenost elektrod) a ρ je hustota.



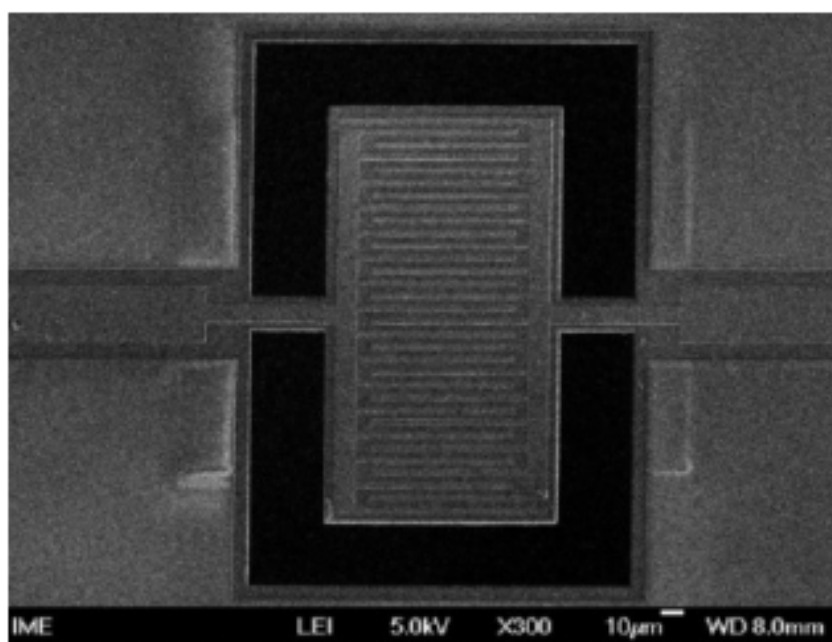
Obr. 25 Rezonanční senzor plynů 1 [17]

Z těchto obrázků je patrné, jakým způsobem je frekvence kmitů dána vzdáleností elektrod. Je to určeno samotnými rozměry vyrobeného senzoru (případně jejich změnou při průchodu měřené látky). Referenční frekvence f_0 se pohybuje kolem 770 MHz.

Pro vyhodnocení detekce plynu se využívá změny frekvence senzoru, která je popsána výše. Detekce plynu odpovídá frekvenčnímu zdvihu Δf .

Vztah pro frekvenční zdvih:
$$\Delta f = f - f_0 \quad (3)$$

Hlavní výhodou piezoelektrických senzorů oproti ostatním MEMS senzorům plynů je energetická efektivnost.



Obr. 26 Rezonanční senzor plynů 2 [17]

7 Závěr

Ve své bakalářské práci jsem přiblížil mikroelektromechanické systémy (MEMS). Zvláště pak jejich využití v senzorech plynů. Na začátku své práce jsem vysvětlil pojem mikrosystém a vznik označení MEMS. Dále poukazuji na historii mikrosystémů.

V další kapitole se zabývám systémy MEMS a hlavními technologiemi používajícími se při výrobě mikrostruktur. Ty slouží jako hlavní součásti systémů využívající MEMS. S tím úzce souvisí základní materiály, z nichž se mikrostruktury vytvářejí. U materiálů jsem uvedl jejich přednosti, základní vlastnosti a hlavní použití.

V následující kapitole popisuji systémy využívající MEMS. Ty jsem rozdělil do tří hlavních skupin (mikrosenzory, mikroaktuátory a RF komponenty). Z každé skupiny jsem vybral několik hlavních představitelů a blíže je popsal.

Hlavní část je věnována sensorům plynů, využívající technologii MEMS. Popisuji zde senzory využívající principu změny kapacity, optického principu a rezonančního principu. U principu změny kapacity poukazuji na mechanické děje, pomocí kterých dochází k detekování plynu. U optického principu popisují dva senzory, IR senzor a senzor využívající povrchového napětí. U rezonančního principu je popsán děj elektro-akustické přeměny v piezoelektrickém materiálu a chemicky citlivé vrstvy pomocí, kterých dochází k detekování plynu.

Přednosti sensorů využívající MEMS jsou menší náklady na provoz, menší velikost, schopnost umístění více sensorů na jeden čip a menší příkon. Z toho plyne stále větší uplatnění těchto sensorů v mnoha odvětvích. Miniaturizace součástek není v dnešní době stále u konce. Přes pokračující vývoj mikrosystémů postupně dochází k nástupu nanosystémů. Z toho lze předpokládat, že přístroje a senzory budou menší a výkonnější.

8 Použitá literatura

- [1] HUSÁK, M.: *Mikrosenzory a mikroaktuátory*, ACADEMIA Praha, 2008, ISBN 978-80-200-1478-8.
- [2] HUSÁK, M.: *MEMS a mikrosystémové technologie*. *Automa* [online]. 2008, č. 11 s. 7-11. [cit.2011-05-20]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/38122.pdf>.
- [3] HUSÁK, M.: *Užití MEMS v průmyslu*. *Automa* [online]. 2008, č. 12, s. 14-18. [cit.2011-05-20]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/38277.pdf>.
- [4] CHLACHULA, P.: *Materiály pro mikro a nanosystémy*. In *Materiály pro mikro a nanosystémy, jejich tribologické vlastnosti a dostupnost* [online]. Brno, 2008. [cit.2011-05-20]. Dostupné z: http://dl.uk.fme.vutbr.cz/zobraz_soubor.php?id=613.
- [5] HUBÁLEK, J., ADÁMEK, M.: *Mikrosenzory a mikroelektromechanické systémy*, [online]. Brno: VUT, 2004. [cit.2011-05-20]. Dostupné z: <http://www.umel.feec.vutbr.cz/BMMS/scripta.pdf>.
- [6] BOND, T., COLE, G., GODDARD, L., BEHYMER, E.: *Photonic MEMS for NIR in-situ*, [online]. Atlanta, GA, United States, 2007. [cit.2011-05-20]. Dostupné z: <https://e-reports-ext.llnl.gov/pdf/349679.pdf>.
- [7] PLUM, T.J., SAXENA, V., JESSING, J.R.: *Design of a MEMS Capacitive Chemical Sensor Based on Polymer Swelling* [online]. Boise State University, 2006 [cit.2011-05-20]. Dostupné z: http://ces.boisestate.edu/documents/WMED_MEMS_Sensor_Todd.pdf.
- [8] LI, L., THURSBY, G., STEWART, G., UTTAMCHANDANI, D.: *MEMS scanning mirror used as an laser external modulator for photoacoustic spectroscopy* [online]. Univ. of Strathclyde, Glasgow, UK, 2010, 117 - 118, [cit.2011-05-20]. ISBN: 978-1-4244-8926-8. Dostupné z: doi: 10.1109/OMEMS.2010.5672157.
- [9] SI-HYUNG L., RAORANE, D., SATYANARAYANA, S., MAJUMDAR, A.: *Nano-chemo-mechanical sensor array platform for high-throughput chemical analysis*, *Sensors and Actuators B*, [online]. Berkeley, 2006, 466–474, [cit.2011-05-20]. Dostupné z: doi: 10.1016/j.snb.2006.01.
- [10] SAXENA, V., PLUM, T.J., JESSING, J.R., JACOB BAKER, R.: *Design and fabrication of a MEMS capacitive chemical sensor system*, [online]. Boise State University, 2006, [cit.2011-05-20]. ISBN: 1-4244-0374-X. Dostupné z: doi: 10.1109/WMED.2006.1678286
- [11] BERNSTEIN, R.W., FERBER, A., JOHANSEN, I., MOE, S.T., ROGNE, H., WANG, D.T.: *Optical MEMS for infrared gas sensors*, [online]. Oslo, 2002, 137-138, [cit.2011-05-20]. ISBN: 0-7803-6257-8. Dostupné z: doi: 10.1109/OMEMS.2000.879663

- [12] COLE, G.D., BJORLIN, E.S., QI, CH., CHUNG-YEUNG, CH., SHAOMIN, W., C.S., MACDONALD, N.C., BOWERS, J.E.: *MEMS-tunable vertical-cavity SOAs*, [online]. Santa Barbara, 2005, 390 - 407, [cit.2011-05-20]. ISSN: 0018-9197. Dostupné z: doi: 10.1109/JQE.2004.841496
- [13] Fabricating MEMS and Nanotechnology [online]. MEMSnet: © 2012 [cit.2011-05-20]. Dostupné z: <http://www.memsnet.org/mems/fabrication.html>
- [14] The National academies press [online]. Microelectromechanical systems: Advanced Materials and Fabrications Methods: © 2012 [cit.2012-04-05]. Dostupné z: http://www.nap.edu/openbook.php?record_id=5977&page=24
- [15] TRILabs Canada's Leading ICT Consortium - RF MEMS [online]. TRILabs: © 2005-2012 [cit.2012-04-05]. Dostupné z: <http://www.trilabs.ca/trilabs/research/connectedmedia/microdevices/rfmems/>
- [16] New Release - Smallest microchain drive [online]. Sandia National Laboratories: © 2012 [cit.2012-04-05]. Dostupné z: <http://www.sandia.gov/media/NewsRel/NR2002/chain.htm>
- [17] KHINE, L., TSAI, J.M., HEIDARI, A., YONG-JIN, Y.: *Piezoelectric MEMS resonant gas sensor for defence applications*, [online]. Singapore, 2011, [cit.2012-04-05]. ISBN: 978-1-4244-9276-3. Dostupné z doi: 10.1109/DSR.2011.6026862