Užití MEMS v průmyslu

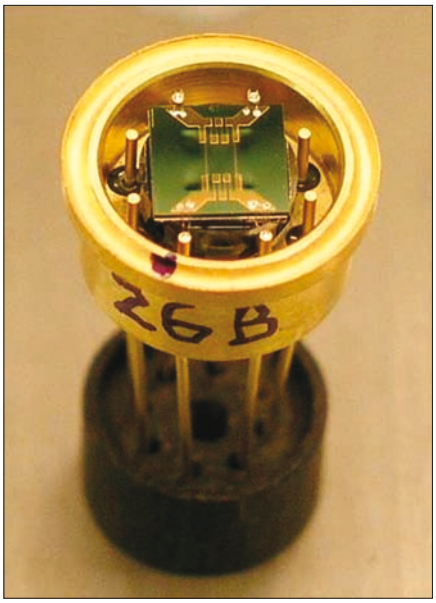
Miroslav Husák

Článek předkládá informaci o principech a parametrech vybraných příkladů použití MEMS. Příklady jsou zaměřeny na senzorové systémy, aktuátorové systémy a radiofrekvenční (RF) komponenty. V článku jsou představeny typické struktury MEMS pro zajištění senzorových a aktuátorových funkcí. V úvodu jsou úvahy o globálních trendech ovlivňujících vznik mikrosystémových produktů a jejich využití v různých oborech, zejména v průmyslu.

The paper gives information about selected principles of MEMs applications. The applications are targeted to sensor systems, actuator systems as well as radiofrequency components. Typical MEMS structures are shown in the paper, providing sensor as well as actuator functions. Considerations are added to the introduction focusing on general effects influencing the microsystem product design, as well as on applications in different areas, especially in the industry.

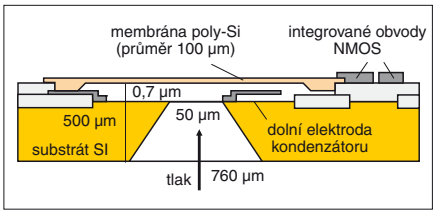
1. Úvod

O mikrosystémech a MEMS (*Micro-Electro-Mechanical System*) se začalo hovořit v 90. letech 20. století jako o nastupující klíčové technice 21. století. Velké úsilí bylo věnováno technickému vývoji a novým přístupům spojeným se systémovým inženýrstvím pro vývoj nových aplikací. Mnohé z nich, které byly dříve rozpracovány jenom v teoretické rovině, byly nyní uvedeny do praxe a na



Obr. 1. Piezoodporový mikrosenzor tlaku realizovaný ve Fyzikálním ústavu AV ČR

jejich základě začaly vznikat nové, kvalitativně odlišné systémy. Jednou z hlavních předností mikrosystémové techniky je možnost mikrominiaturizace, využití materiálů používaných na výrobu integrovaných elektronických obvodů (např. křemíku), které však právě v těchto aplikacích vykazují vlastnosti běžných materiálů: např. křemík v mikrostrukturách má vlastnosti oceli. Mikrosystémová technika vedla ke zlepšování vlastností dosavadních systémů, např. k přípravě diamantových vrstev na povrchu implantátů pro snížení opotřebení. Elektronicky řízené skalpely nebo biochemické laboratoře vytvářené na čipu umožnily dosáhnout velkého pokroku v medicíně. Bez mikrosystémové techniky by nebyl možný rozvoj funkcí kardiostimulátorů, které v současné době představují inteligentní systémy obsahující senzory, aktuátory, řídicí elektroniku a inteligentní rozhodovací software. Velké množství mikrosystémů je i v moderních automobilech (airbagy, ABS, řídicí a monitorovací systémy, navigační systémy atd.). Bez mikrosystémových technnologií by se nerozvíjel kosmický výzkum, letectví, bezpečnostní systémy nebo ochrana životního prostředí.

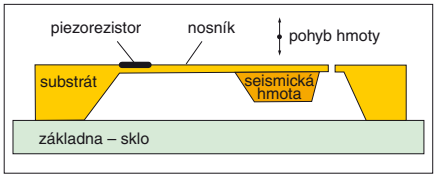


Obr. 2. Jednočipový kapacitní senzor tlaku s integrovanými vyhodnocovacími elektronickými obvody

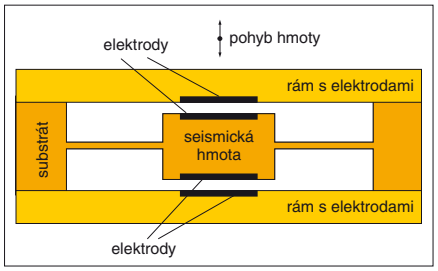
V mikrosystémech jsou často začleněny i zcela nesourodé součásti. Vychází se z předpokladu, že v mikrosvětě se jednotlivé součásti systému výrazně vzájemně ovlivňují, na rozdíl od makrosvěta, kde vlastnosti jednotlivých součástí lze považovat za oddělené, a přitom dohromady vytvářejí funkční makrosystém.

Všechny tyto aspekty formují komplexní síť vzájemných závislostí mezi technickými a technologickými vlivy, požadavky uživatelů a dalšími ovlivňujícími činiteli. Vytváří se tak systém na jedné straně s „tlakem" technického vývoje a na druhé straně s „tahem" požadavků trhu a společnosti. Pro úspěšný návrh a realizaci mikrosystémových produktů jsou nutné vyvážené přístupy ohledně materiálů a technologií a naproti tomu potřeb průmyslu nebo společnosti.

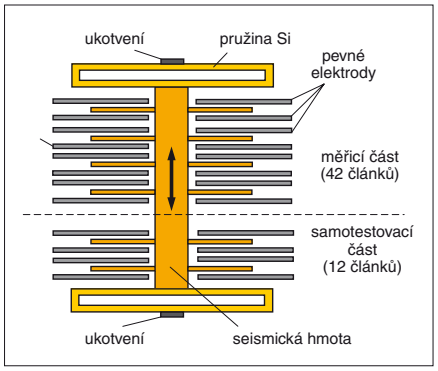
Pro navrhování a realizaci mikrosystémových součástí se využívají fyzikální vlastnosti materiálů a materiálových struktur a známé fyzikální, popř. biochemické principy. Se



Obr. 3. Akcelerometr s piezorezistory



Obr. 4. Kapacitní akcelerometr



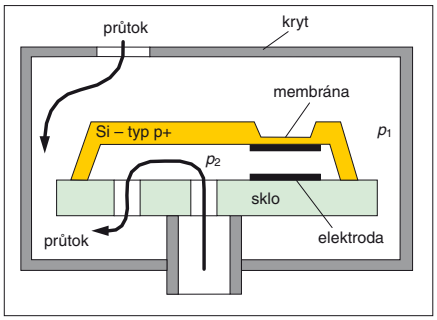
Obr. 5. Jednoosý akcelerometr s hřebenovým uspořádáním

zmenšujícími se rozměry se u submikrosystémových struktur začínají využívat vlastnosti z oblasti nanotechnologií, a vznikají tak systémy NEMS (*Nano-Electro-Mechanical Systems*).

2. Mikrosenzorové systémy

Piezoodporové mikrosenzory tlaku s křemíkovou membránou jsou v průmyslu velmi rozšířené. Měřený tlak se převádí na mecha-

nické namáhání piezorezistorů vytvořených v pružné membráně. Technologie MEMS (povrchové, popř. objemové mikroobrábění substrátu) umožňují vyrobit senzor z monolitického křemíku nebo např. se skleněnou podložkou. Tento typ senzorů tlaku má lineární převodní charakteristiku a je teplotně závislý. Při jeho návrhu se optimalizuje rozmístění piezorezistorů na pružné membráně a geometrický tvar piezorezistorů ([2], *obr. 1*).



Obr. 6. Kapacitní senzor průtoku

Kapacitní mikrosenzory tlaku používají též pružnou membránu, ale změnu tlaku převádějí na změnu kapacity. Vzdálenost elektrod se pohybuje řádově v jednotkách mikrometrů, plocha v jednotkách až desítkách čtverečných milimetrů, kapacita v jednotkách až desítkách pikofaradů. Senzory vynikají velkou citlivostí, velmi malou teplotní závislostí, nevykazují žádnou hysterezi, jejich převodní charakteristika je nelineární a lze je použít pro teploty až +300 °C. Na *obr. 2* [1] je uveden příklad uspořádání jednočipového kapacitního senzoru. Na čipu jsou obvykle dva kondenzátory se stejnými vlastnostmi, jeden referenční ke kompenzaci vlivu parazitních vlivů (např. teploty) a druhý měřicí.

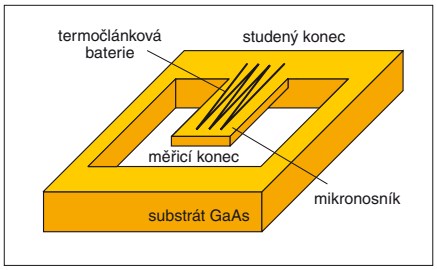
Na *obr. 3* je piezoodporový mikroakcelerometr. Jeho základní součásti jsou seismická hmota a pružný nosník, vyrobené z monokrystalického křemíku mikrosystémovou technologií. K měření zrychlení se využívají piezorezistory vytvořené v křemíkovém pružném mikronosníku. Akcelerometry a mikroakcelerometry nabývají nejenom v průmyslu stále většího významu.

Kapacitní akcelerometry využívají změnu kapacity v důsledku výchylky seismické hmoty (*obr. 4*). Tento typ akcelerometru má v porovnání s piezoodporovým větší citlivost i stabilitu. Lze ho realizovat na čipu společně s elektronickými obvody CMOS [1]. Velmi rozšířené je hřebenové uspořádání kapacitního akcelerometru. Technologie MEMS umožňují realizovat paralelní spojení desítek až stovek diferenciálních kondenzátorů hřebenového systému, které jsou využívány např. v akcelerometrech ADXL firmy Analog Devices. Na *obr. 5* je senzorová část akcelerometru ADXL 150, která se skládá z části pro měření akcelerace a z kapacitních elektrod pro autotest, používaných pro řízení elektrostatických sil k vyrovnávání stability systému. Rozměr čipu akcelerometru včetně integrovaných elektronických obvodů je 1,94 × × 1,94 mm [3].

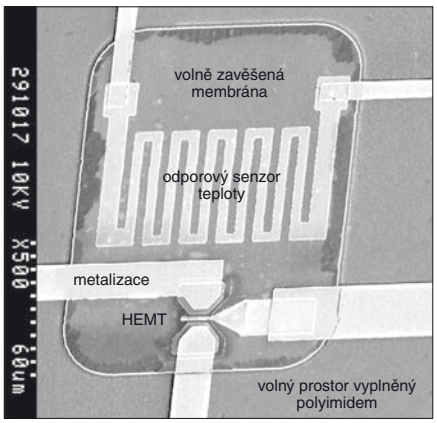
Mikroprůtokoměry založené na tepelných principech vyrobené s využitím mikrosystémových technologií MEMS velmi často pro zajištění tepelné izolace používají mikronosníky, mikromůstky nebo mikromembrány z materiálu velmi malé tloušťky [4]. Tyto struktury bývají v prostoru zavěšeny pouze na okrajích tenkými úchyty.

Prostorové mikroanemometry, umožňující měřit průtok plynů nebo kapalin v prostoru, lze také realizovat technologiemi MEMS [5]. Senzorové prvky mají rozměr 500 × 5 × × 2 μm, plocha čipu je 3,5 × 3 × 0,5 mm. Tepelné prvky jsou vyhřívány na teplotu 200 °C, časová konstanta měření je 120 μs (ohřev) a 330 μs (ochlazování).

Kapacitní mikroprůtokoměry využívají rozdíl tlaku mezi vstupem a výstupem proudícího média převedený na změnu kapacity.



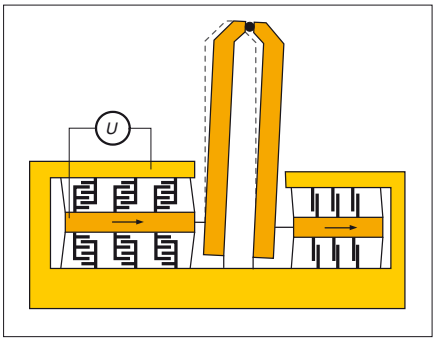
Obr. 7. Integrovaná termočlánková baterie GaAs s mikronosníkem



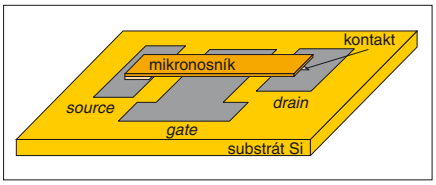
Obr. 8. Mikrofotografie ostrůvkové struktury aktivního mikrosenzoru mikrovlnného záření

Průřez průtokového kanálku je 60 × 3,5 μm, rozměry membrány 2 × 2 mm a její tloušťka 2,9 μm, vzdálenost elektrod je 3,5 μm. Rozsah měření je $1{,}6 \cdot 10^{-8}$ ml·s^{-1} až $1{,}6 \cdot 10^{-2}$ ml·s^{-1} (*obr. 6*, [6]).

Termoelektrické baterie využívají tepelně izolované membrány nebo nosníky. Jednotlivé články jsou ve tvaru tenkých kovových pásků o tloušťce přibližně 30 μm. Monolitické termočlánkové baterie se vzhledem k velké tepelné vodivosti křemíku realizují na membráně malé tloušťky (5 až 10 μm) s velkým teplotním odporem pro omezení tepelného toku mezi měřicími a porovnávacími spoji. Pro výrobu termoelektrických článků se využívá spojení materiálů Bi-Sb, Si (typ p)-Al, Si (typ n)-Au, Si (typ p)-Au. Používají se i další materiály, např. GaAs a AlGaAs, které vykazují velký tepelný odpor, velkou tepelnou



Obr. 9. Elektrostaticky řízený mikromanipulátor



Obr. 10. Elektrostaticky řízené relé MEMS

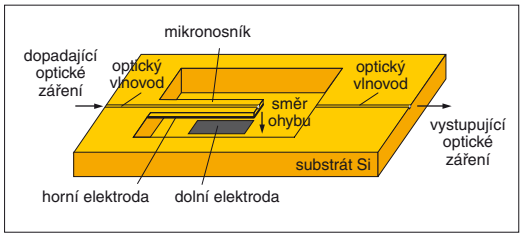
kapacitu a velký Seebeckův koeficient. Provedení typické baterie na tepelněizolačním nosníku je na *obr. 7* [1]. Termoelektrické baterie lze využít jako citlivé (infračervené) mikrosenzory teploty.

Mikrosenzory mikrovlnného záření (tepelné konvertory) lze využít k měření mikrovlnného záření. Princip jejich fungování je založen na převodu mikrovlnného záření na teplo v aktivních GaAs tepelných konvertorech tvořených systémem tepelně izolovaných mikrostruktur a GaAs tranzistorem HEMT (*High Electron Mobility Transistor*). Mikrosnosník, membránu nebo můstkové uspořádání lze použít pro vytvoření tepelně izolované soustavy [7]. Nejlepší tepelněizolační parametry lze získat použitím tzv. ostrůvkové struktury se zavěšenou membránou, na které jsou tranzistor HEMT i odporový senzor teploty. Ostrůvková struktura na *obr. 8* je vytvořena z vrstev GaAs/ /$Al_{0,3}Ga_{0,7}As$ s celkovou tloušťkou 1 μm, teplotní časová konstanta je 0,8 ms, rozměry tranzistoru HEMT jsou 10 × 0,5 μm [8].

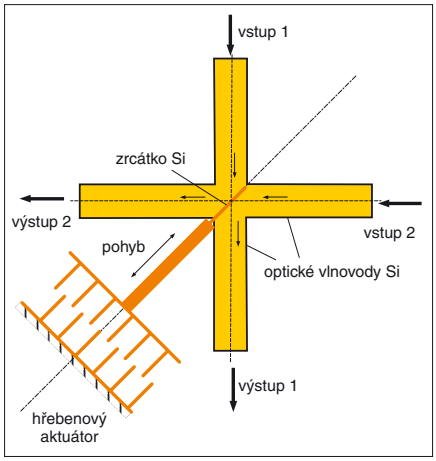
3. Mikroakční členy (mikroaktuátory)

Technologie MEMS umožňují realizovat deformovatelné členy mikroaktuátorů, např. mikronosníky, membrány, mikromůstky nebo torzní struktury. Deformovatelné členy se využívají ke konstrukci různých typů mikromotorů, mikropohonů, mikromanipulátorů, mikropump, mikropřepínačů a optických spínačů nebo prvků RF, např. laditelných filtrů, kondenzátorů nebo cívek.

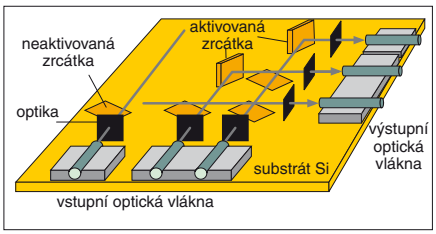
Mikromanipulátor určený pro manipulaci s mikroobjekty (např. biologickými) s rozměry 5 až 200 μm je na *obr. 9* [9]. Struktura dovoluje vytvořit silové zpětné vazby v reálném čase pomocí kondenzátorové struktury na pravé straně systému. Elektrostaticky řízený mechanismus ovládaný kondenzátorovými systémy s elektrodami má rozměry 110 × 10 × × 50 μm, mezera mezi elektrodami je 5 μm, objekty o rozměrech 0 až 50 μm vyžadují napájecí napětí 0 až 110 V. Struktura je vyrobena leptáním materiálu SOI.



Obr. 11. Spínač MEMS s integrovaným optickým vlnovodem



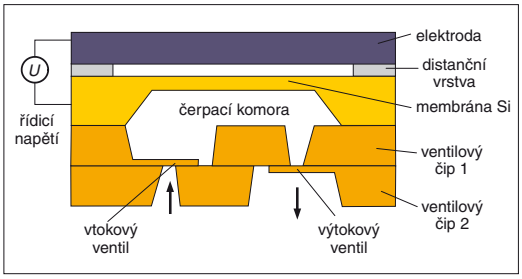
Obr. 12. Optický přepínač MEMS 2 × 2 s horizontálním pohybem zrcátka



Obr. 13. Matice optických přepínačů MEMS s mikrozrcátky

Mikropřepínače vytvořené technologiemi MEMS jsou využitelné např. jako relé nebo RF přepínače. K řízení spínání kontaktů se využívají různé principy (elektrostatický, magnetický, piezoelektrický a další). Nejvíce používaný elektrostatický přepínač má malé elektrody, relativně krátkou dobou sepnutí, dobrou dosažitelnou sílu sepnutí a strmou přepínací křivku (malá setrvačnost systému). Typická hodnota generované přítlačné síly je řádově 50 až 200 μN, životnost spínačů je 10^8 až $6{\cdot}10^{10}$ cyklů sepnutí, spínací napětí je 30 až 60 V. Relativně vysoké napětí vyžaduje v mnoha případech použití tzv. *step-up* měničů napětí. Přepínače MEMS se uplatní v mobilních telefonech, v telekomunikacích, radarových a satelitních systémech, automobilovém průmyslu, oscilátorech a zesilovačích. Tyto přepínače mají výrazně lepší vlastnosti v porovnání s přepínači typu *solid-state* pro výkonové aplikace s velmi malými a středními výkony [1]. Struktura elektrostaticky řízeného přepínače MEMS je na *obr. 10*. Kontakty jsou ze zlata, napájecí napětí je 30 až 300 V v závislosti na konstrukci, hodnota odporu ve vypnutém stavu je 10^{12} Ω a v sepnutém stavu $5{\cdot}10^{-1}$ až 10^{-2} Ω. Délka mikronosníku je 50 μm, šířka 10 μm a tloušťka 1 μm. Mezi nosníkem a řídicí elektrodou je mezera 5 μm. Spínací příkon relé je 1 μW a časová konstanta 2,6 μs [1].

Mikrovlnné přepínače MEMS se využívají k přepínání signálů v oblasti mikrovln. Pro kmitočty do 20 GHz je vhodný čtyřcestný sériový přepínač [10] složený z jednotlivých sériových spínačů. Celkový útlum spínače v rozepnutém stavu je pro maximální požadovaný kmitočet přibližně 50 dB, ztráty v sepnutém stavu nepřesáhnou 0,2 dB. U sériových přepínačů lze dosáhnout kapacity v rozepnutém stavu 2 až 5 fF a velkého útlumu v rozepnutém stavu až do kmitočtu 50 GHz.



Obr. 14. Elektrostaticky řízená membránová mikropumpa

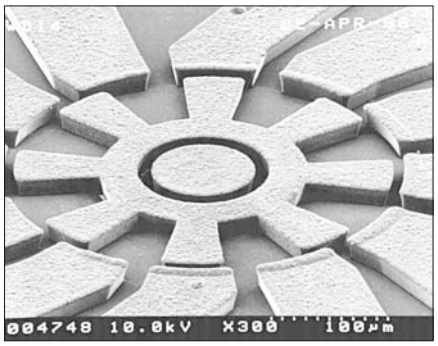
Optické přepínače MEMS se používají k modulaci optického paprsku a jeho přepínání z jednoho nebo více zdrojů do jednoho nebo více přijímačů. Přepínače zajišťují velkou izolaci, mají malou vlastní spotřebu a mohou pracovat v bistabilním režimu [1]. Na *obr. 11* je optický vlnovod umístěný na vetknutém nosníku. Elektrostatickým vychýlením optického vlnovodu se přeruší cesta optického záření. Mikronosník s rozměry 600 × 50 × 5 μm je vychylován napětím 50 V, dosažená izolace je 85 dB [1].

Optický mikrosystémový přepínač 2 × 2 s horizontálním pohybem zrcátka je na *obr. 12*. Optické zrcátko ve tvaru pokovené planžety z Si je ovládáno hřebenovým elektrostatickým aktuátorem v horizontální rovině tak, aby v jedné poloze byl vstup a výstup optického toku v jednom směru a při „zasunutí" zrcátka se směr optického toku změnil [11].

Matice optických mikropřepínačů jako příklad řešení přepínání optického signálu mezi vstupními a výstupními optickými vlákny je na *obr. 13*. Elektrostaticky bistabilně řízená optická mikrozrcátka maticově přepínají signály mezi vstupy a výstupy [1].

Membránové mikropumpy realizované technologiemi MEMS jsou určeny k dávkování velmi malých množství tekutin. Technické vlastnosti jsou dány principem činnosti (piezoelektrický, tepelný, magnetický apod.) [1]. Na *obr. 14* je elektrostaticky ovládaná mikropumpa složená ze čtyř křemíkových čipů realizovaných objemovým mikroobráběním. V horní části je aktuátorová část tvořená membránou a elektrodou, v dolní části jsou vstupní a výstupní ventily. Membrána se prohýbá přiložením napětí mezi membránu a elektrodu, nasávání a výtlak jsou řízeny vtokovým a výtokovým ventilem. Typické vnější rozměry mikropumpy jsou 7 × 7 × 2 mm s průřezem otvorů ventilů 0,16 mm^2. Membrána má plochu 16 mm^2 a tloušťku 50 μm. Vzdálenost mezi membránou a elektrodou je 6 μm. Při napětí 170 V a frekvenci pumpování 25 Hz je mikropumpa schopna dodat množství tekutiny v objemu 70 $\mu l{\cdot}min^{-1}$ a může pracovat s frekvencí do 100 Hz. Jeden cyklus dodává přesně stanovené objemové množství 10 až 50 nl; lze proto velmi přesně měřit dodané množství tekutiny.

Lineární aktuátory elektrostaticky řízené s hřebenovými elektrodami (*comb-drive*) jsou typickým příkladem lineárního pohonu s elektrostatickým řízením. Nejpoužívanější je hřebenová struktura, která se skládá ze dvou sestav kondenzátorů, z nichž každá obsahuje několik paralelně zapojených kondenzátorů. Tato struktura je oblíbená pro svou modularitu a konstrukční přizpůsobivost.

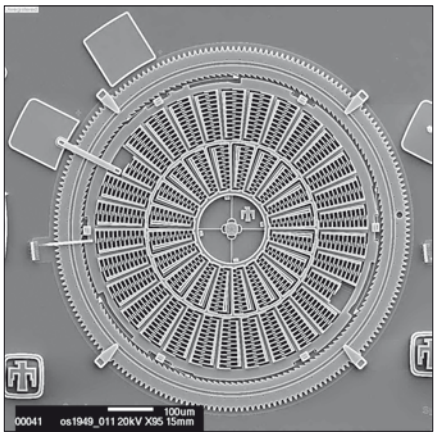


Obr. 15. Rotační elektrostatický motor s proměnnou kapacitou

Existuje mnoho variant geometrického uspořádání aktuátorů s hřebenovými strukturami kondenzátorů. Vedle základních uspořádání aktuátorů s hřebenovými strukturami s paralelní konfigurací jsou používány šikmé, kruhové (spirálové), vroubkované a tzv. T-konfigurace [1]. Struktury lze realizovat i prostorově se silou 0,2 mN při napájení 60 V.

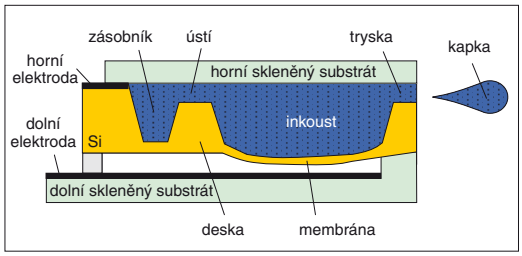
Hřebenové struktury jsou používány v mnoha úlohách, v mikroposuvných (nanoposuvných) systémech s posuvem $3{,}61 \cdot 10^{-2}$ μm·V^{-2}, silou 46,9 pN·V^{-2} a pracovním napětím 0 až 15 V. Struktury se využívají v optických přepínačích [1] se silou 0,2 mN při napětí 50 V a s posuvem 10 μm. Struktury s opačnou funkcí se využívají pro oscilátorové obvody, v gyroskopech a akcelerometrech.

Rotační elektrostatické mikromotory s proměnnou kapacitou se skládají z rotoru s póly, které s póly umístěnými na obvodu

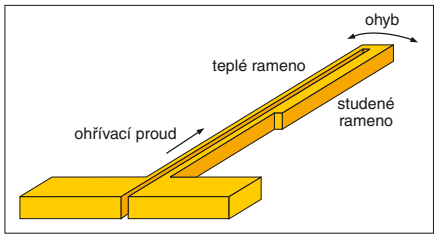


Obr. 16. Rohatkový rotační mikromotor MEMS

statoru tvoří kondenzátory s proměnnou kapacitou [1]. Rotor je uzemněný a na elektrody statoru jsou připojeny budicí napěťové impulzy s danou fází nutnou pro rozběhnutí motoru (*obr. 15*). Existuje mnoho různých konstrukčních konfigurací mikromotoru. Mezera mezi rotorem a statorem je 1 až 3 μm, budicí napětí je 30 až 120 V a jeho velikost závisí ve mezeře mezi statorem a rotorem. Větší verze mikromotoru dosahuje otáček 3 800 min^{-1} ve vzduchu a 4 400 min^{-1} ve vakuu při budicím napětí 300 až 600 V [1].



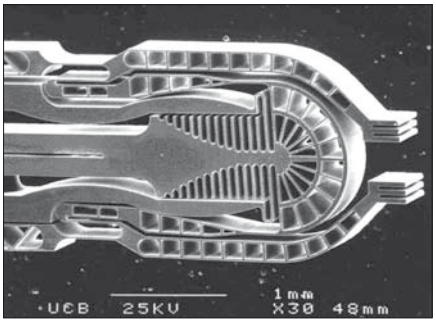
Obr. 17. Elektrostatický generátor kapky (ink-jet)



Obr. 18. Tepelně řízený mikroaktuátor s homogenní nosníkovou strukturou

Rohatkový rotační mikromotor využívá kruhové uspořádání hřebenových struktur pohonného elektrostatického mechanismu. Přiložené napětí přitáhne elektrody, přičemž rotorové elektrody pootočí rotorem. Po odpojení napětí se vrátí rotorové elektrody zpět do původní polohy (*obr. 16*, [12]). Systém je realizován mikrosystémovou technologií povrchového mikroobrábění na křemíkovém substrátu.

Tiskové hlavy (*ink-jet*) typu MEMS využívají různé fyzikální principy činnosti (piezoelektrický, tepelný, magnetický, akustický apod.). Na *obr. 17* je příklad jedné trysky (přesněji elektrostatického generátoru kapky) určené pro tiskové hlavy *ink-jet*. Její činnost je řízena napětím mezi dolní elektrodou a horní elektrodou spojenou s membránou. Výkonová spotřeba generátoru s jednou tryskou je 0,525 mW, řídicí napětí 26 V s frekvencí až 18 kHz. Lze vytvořit čip MEMS s mnoha tryskami pro tisk s velkým rozliše-



Obr. 19. Tepelně řízený mikromanipulátor (mikropinzeta)

ním. Struktura má dlouhou životnost (více než čtyři miliardy kapek z jedné trysky) [1].

Tepelně řízené mikromanipulátory MEMS využívají princip teplotní roztažnosti pevných látek nebo expanze plynů při hoření. Technologiemi MEMS realizují tepelně řízené manipulátory, mikrozrcátkové matice, mikroventily, tiskové hlavy *ink-jet*, mikropumpy nebo turbínkové mikromotory. Na *obr. 18* je příklad homogenního nosníkového tepelně řízeného mikroaktuátoru, kde nosník funguje jako ohřívací prvek (prochází jím elektrický proud) a zároveň vytváří ohybový moment využitím rozdílného průřezu materiálu v různých částech smyčky. Části s menším průřezem mají větší elektrický odpor, způsobující větší ohřev této části, která se více prodlouží [1].

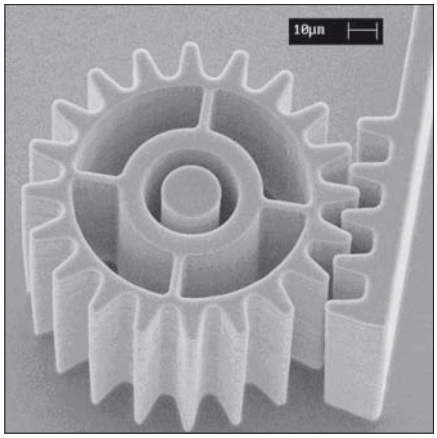
Uvedený princip se využívá např. pro realizaci mikropinzet a mikroúchytů jako součástí různých typů mikromanipulátorů. Na *obr. 19* [13] je fotografie mikropinzety se složitou strukturou, převádějící ohyb na lineární pohyb vedoucí k sevření úchytových částí systému. Nevýhodou je malé vychýlení, proto je nutné realizovat mechanicky zpřevodovaný systém mikropinzety.

Převodový mechanismus o průměru přibližně 100 μm realizovaný technologií objemového mikroobrábění je na *obr. 20* [1]. Technologie MEMS jsou významné pro vytváření integrovaných převodových mechanismů, mikropřevodovek, pružin apod.

Zubová čerpadla typu MEMS se používají pro čerpání kapalin s velkou viskozitou a k vyvinutí velkého tlaku; typické rozměry křemíkového zubového čerpadla jsou např.: vnitřní průměr 596 μm a vnější průměr 1 192 μm. Otáčení zubových kol zajišťuje vhodný typ mikromotoru. Rozměry celého kompaktního systému společně s mikromotorem jsou 10 × 10 × 30 mm.

Křemíkové řetězové pohony realizované jako MEMS lze zařadit mezi pohonné mechanismy. Například jednořadový pouzdrový řetěz složený z padesáti křemíkových článků o rozteči 50 μm má celkovou délku napřímeného řetězu 2,5 mm. Předpokládá se jeho využití u pohonu uzávěrek mikrokamer, mechanického časování nebo dekódování [14].

Křemíkové pružiny typu MEMS jsou nezbytné pro správnou činnost mikrosystémových struktur s pohyblivými součástmi, jako jsou akcelerometry a elektrostatické lineární nebo kruhové mikromotory. Pružiny jsou vyrobeny stej-



Obr. 20. Převodový mechanismus

nou technologií jako ostatní součásti, mohou mít různý tvar, určený funkcí systému.

4. Radiofrekvenční komponenty realizované jako MEMS

Součásti MEMS v mikrovlnných obvodech zmenšují ztráty v signálové cestě ve velmi širokém frekvenčním rozsahu. Technologie MEMS umožňují realizovat různé typy RF prvků, jako např. laditelné kondenzátory, cívky, filtry apod. s vynikajícími mechanickými i elektrickými vlastnostmi, velkou linearitou a dalšími parametry.

Laditelné kondenzátory realizované jako MEMS jsou charakterizovány vynikajícími mechanickými vlastnostmi, velkou linearitou a ladicím rozsahem větším než 6,5 :1. Také laditelné filtry, rezonátory na čipu a další RF součásti lze vyrobit technologiemi MEMS.

Literatura:

[1] HUSÁK, M.: *Mikrosenzory a mikroaktuátory.* Academia, 2008.

[2] KULHA, P. – HUSAK, M. – VYBORNY, Z. a kol.: *Microsensors Based on Tensometric Layers Sputtered on Silicon Substrates.* In: Proc. of conf. MIPRO 2006 (CD-ROM), Opatija, Hrvatska, 2006.

[3] WU, M. C.: *Case Study I: Capacitive Accelerometers, Chapter 19 of Senturia Literatures in Course Website.* Dostupné na <http://www.ee.ucla.edu/~wu/ee250b/Case_Study_1_Accelerometer.pdf>, 2006, cit. 25. 11. 2008.

[4] ĎAĎO, S. – BEJČEK, L. – PLATIL, A.: *Měření průtoku a výšky hladiny.* BEN, Praha, 2005.

[5] ELWENAPOEK, M. – WIEGERINK, R.: *Mechanical Microsensor.* Springer Verlag, 2001.

[6] GARDNER, J. W. – VARADAN, V. K. – AWADELKARIM, O. O.: *Microsensors MEMS and Smart Devices.* Wiley and Sons, Inc., 2002.

[7] HAŠČÍK, S. – LALINSKÝ, T. – KUZMÍK, J. a kol.: *The fabrication of thin GaAs cantilever beams for power sensor microsystem using RIE.* Vacuum, 1996, 47, s. 1215.

[8] JAKOVENKO, J. – HUSAK, M. – LALINSKY, T.: *Design and simulation of micromechanical thermal converter for RF power sensor microsystem.* Microelectronics Reliability, Elsevier, 2004, vol. 44, pp. 141–148, ISSN 0026-2714.

[9] BEYELER, F. – NEILD, A. – OBERTI, S. a kol.: *Monolithically Fabricated Microgripper with integrated force sensor for manipulating microobjects and biological cells aligned in an ustrasonic field.* Journal of Microelectromechanical Systems, February 2007, vol. 16, pp. 7–15, ISSN 1057-7157.

[10] REBEIZ, G. M. – MULDAVIN, J. B.: *RF MEMS Switches and Switch Circuits.* IEEE microwave magazine, 2001.

[11] WU, M. C.: *Trends in Optical MEMS Current.* In: OFC 2005 Tutorial, University of California, Berkeley, EECS Department & Berkeley Sensor and Actuator Center (BSAC), 2004.

[12] *MicroElectroMechanical Systems (MEMS).* Sandia National Laboratories. Dostupné na <http://mems.sandia.gov>, cit. 25. 11. 2008.

[13] *Microtweezers.* MEMS Precision Instruments. Dostupné na <http://www.memspi.com>, cit. 25. 11. 2008.

[14] *World's smallest microchain drive fabricated at Sandia.* Tisková zpráva Sandia National laboratories. Dostupné na <http://www.sandia.gov/media/NewsRel/NR2002/chain.htm>, cit. 25. 11. 2008.

[15] GUCKEL, H.: *MEMS-University of Wisconsin in Madison.* Dostupné na <http://www.engr.wisc.edu/news/history/pdfs/feb012002mems.pdf>, cit. 25. 11. 2008.

prof. Ing. Miroslav Husák, CSc.,
FEL ČVUT v Praze
(husak@fel.cvut.cz)

krátké zprávy

Comsol Multiphysics 3.5 je rychlejší a má výkonnější rozhraní

Softwarový nástroj *Comsol Multiphysics*® od švédské společnosti Comsol® umožňuje modelovat fyzikální procesy popsané parciálními diferenciálními rovnicemi (PDE) s následným řešením metodou konečných prvků (MKP, FEM). Program obsahuje specializované moduly s definovanými PDE a uživatelskými dialogy pro zadávání vlastností materiálů i okrajových podmínek. Nová verze Comsol Multiphysics 3.5 je rychlejší při řešení velkých úloh a nabízí výkonnější import z různých systémů CAD a součinnost s ECAD.

Hlavním přínosem verze Comsol Multiphysics 3.5 jsou vylepšené a optimalizované řešiče, podstatně urychlující řešení časově závislých úloh z oborů strukturální mechanika, elektromagnetismus, akustika a proudění tekutin. V oblasti FEM nabízí Comsol Multiphysics 3.5 nové možnosti při generování sítě prvků v mezní vrstvě.

Významně je vylepšen *CAD Import Module*, který nyní využívá geometrické jádro Parasolid v každém kroku importu geometrie, z čehož plynou mnohé výhody. Obousměrné rozhraní *on-line* se systémem CAD SolidWorks podporovaly již starší verze tohoto modulu. Nyní je toto propojení vylepšeno a navíc je přidáno stejné propojení s programem Autodesk Inventor. Výsledkem je větší produktivita práce při tvorbě geometrického modelu a možnost využívat systémy s distribuovanou pamětí, např. výpočetní klustery na bázi linuxu i windows. Vylepšení dále doznaly *Chemical Engineering Module*, nadstavbový *AC/DC Module*, *Structural Mechanics Module*, *MEMS Module* a *Heat Transfer Module*. Podrobné informace o všech zmíněných nástrojích lze získat u zástupce společnosti Comsol pro ČR a Slovensko, firmy Humusoft s. r. o. (http://www.humusoft.cz). *(kb)*

Společnost Beckhoff obdržela ocenění Windows Embedded Partner Excellence Award 2008

Společnost Beckhoff, dodavatel průmyslových PC a dalších automatizačních prostředků, obdržela od společnosti Microsoft ocenění Windows Embedded Partner Excellence Award za tvůrčí a inovační přístup k aplikacím využívajícím operační systémy Windows Embedded. Cena byla oficiálně předána na evropské konferenci firmy Microsoft 7. října 2008 v Monaku.

Společnost Beckhoff, v České republice zastupovaná firmou Dyger, má v oblasti operačních systémů pro vestavné a průmyslové počítače bohaté zkušenosti. Její software TwinCAT umožňuje vytvářet řídicí systémy schopné práce v reálném čase, založené na operačních systémech Windows XP Embedded a Windows CE. Ty potom mohou být součástí klasických průmyslových PC, kompaktních panelových PC i modulárních systémů řady CX určených k montáži na lištu DIN do rozváděče. *(Bk)*

Specifikace FDT doplněna o IO-Link Annex

Novým celosvětovým standardem pro komunikaci se snímači a akčními členy v oboru automatizace se stává rozhraní IO-Link. Je podporováno mnoha známými dodavateli řídicích systémů i výrobci snímačů a akčních členů nabízejícími patřičné řídicí moduly (*IO-Link masters*) a zařízení s tímto rozhraním. Protokol IO-Link lze přenášet mnoha již zavedenými sběrnicovými systémy, jako je např. Profibus, Interbus, Profinet, AS-Interface, EtherCAT atd. Skupina FDT Group nyní vydala IO-Link Annex, který popisuje, jakým způsobem komunikovat se zařízeními s rozhraním IO-Link při použití metody FDT. Dodavatelé systémů tak mohou do svých inženýrských nástrojů zabudovat funkce umožňující využívat v řídicích systémech integrovaných s použitím metody FDT/DTM i zařízení s rozhraním IO-Link.

[FDT Group Newsletter, October 2008.] *(sk)*

Software pro mobilní zařízení

Android je název softwarové platformy určené pro vývoj softwaru pro mobilní zařízení. Součástí platformy je komerční distribuce Linuxu, specifické softwarové záplaty, vývojové prostředí založené na Eclipse, vlastní software Android a předem připravené integrační nástroje. Android je kompatibilní s hardwarem určeným pro mobilní zařízení od nejvýznamnějších světových dodavatelů elektronických komponent, takže výrobci přenosných zařízení se mohou soustředit na vývoj vlastních aplikačních programů. K balíčku, dodávanému společností Wind River, náleží také profesionální služby, optimalizace aplikací a jejich testování. Společnost Wind River uvede tuto platformu na trh v prvním pololetí roku 2009. *(ed)*