



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

UŽITÍ CAD SYSTÉMŮ PRO NÁVRH MEMS

CAD SYSTEMS FOR MEMS DESIGN

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

JAROSLAV LAZAR

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. MARTIN HARTL, Ph.D.

BRNO 2009

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav konstruování

Akademický rok: 2008/2009

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Jaroslav Lazar

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Užití CAD systémů pro návrh MEMS

v anglickém jazyce:

CAD systems for MEMS design

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Cílem bakalářské práce je podat přehled současného stavu poznání v oblasti užití CAD systémů pro návrh mikroelektromechanických (MEMS) systémů doplněný vymezením trendů budoucího vývoje.

Cíle bakalářské práce:

Bakalářská práce musí obsahovat:

1. Definici základních pojmů.
2. Přehled a rozbor existující literatury v dané oblasti.
3. Analýzu a zhodnocení získaných poznatků.
4. Vymezení trendů budoucího vývoje.
5. Souhrnnou bibliografii.

Forma bakalářské práce: průvodní zpráva.

Účel zadání: pro VaV a tvůrčí činnost ÚK

Typ BP: Rešeršní

Seznam odborné literatury:

Mohamed Gad-el-Hak The MEMS Handbook, CRC Press, 2001, ISBN 0-8493-0077-0

Vedoucí bakalářské práce: prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2008/2009.

V Brně, dne 23.10.2008

L.S.

prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.
Ředitel ústavu

doc. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Práce se zabývá CAD návrhovými nástroji pro MEMS. První část je věnována popisu a definování pojmu MEMS a jeho základních částí. Další úsek se zabývá popisem jednotlivých metod pro výrobu MEMSů. Poslední část popisuje vybrané CAD návrhové nástroje, jejich moduly a funkce. V závěru jsou jednotlivé systémy srovnány, zhodnoceny a určena vhodnost jejich použití. Dále je zde uveden význam a výhody MEMSů.

ABSTRACT

This thesis deals with CAD design tools for MEMS. First part describes and defines MEMS and its basic components. This is followed by a description of methods used to manufacture MEMS. The last part deals with particular CAD design tools, their modules and functions. Mentioned systems are then compared, reviewed and appropriate usage for each of them is suggested. Then the importance and advantages of MEMS are discussed.

KLÍČOVÁ SLOVA

MEMS, mikroelektromechanické systémy, CAD návrhové nástroje

KEYWORDS

MEMS, microelectromechanical systems, CAD design tools

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

LAZAR, J. *Užití CAD systémů pro návrh MEMS*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 34 s. Vedoucí bakalářské práce prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně s pomocí vedoucího prof. Ing. Martina Hartla, Ph.D. a v seznamu uvedl všechny použité literární i jiné zdroje.

.....
Datum

.....
Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto prof. Ing. Martinu Hartlovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady při vypracování této práce.

OBSAH

Úvod	
1 Definice základních pojmů	13
1.1 Definice MEMS	13
1.2 Typické struktury MEMS	13
1.2.1 Nosníky	13
1.2.2 Membrány	14
1.2.3 Hřebenové struktury	14
1.2.4 Mikrokanálky	15
1.2.5 Ozubená kola	15
2 Přehled a rozbor existující literatury v dané oblasti	16
2.1 Technologie pro realizaci MEMS	16
2.1.1 Povrchové mikroobrábění - <i>surface micromachining</i>	16
2.1.2 Objemové mikroobrábění - <i>bulk micromachining</i>	16
2.1.3 LIGA – röntgentiefen lithographie, galvanoformung und abformung	17
2.1.4 Fotolitografie - <i>photolithography</i>	18
2.1.5 Leptání	18
2.1.6 Obrábění excimerovým laserem	19
2.2 Návrhové nástroje	20
2.2.1 CoventorWare	20
2.2.2 MEMulator	22
2.2.3 IntelliCAD	22
2.2.4 IntelliSuite	23
2.2.5 MEMS Pro v 6.0	24
2.2.6 MEMSolver	25
2.2.7 AutoCAD	25
2.2.8 SolidWorks	25
2.2.9 ANSYS	26
2.2.10 FEMPRO	26
3 Analýza a zhodnocení získaných poznatků	27
4 Vymezení trendů budoucího vývoje	28
4.1 Oblasti využití MEMS	28
4.2 Trendy budoucího vývoje	28
5 Seznam použitých zdrojů	30
6 Seznam použitých zkratk, symbolů a veličin	32
7 Seznam obrázků a grafů	33
8 Seznam tabulek	34

ÚVOD

Vývoj MEMSů začal miniaturizací již ve třináctém století, kdy měli hodináři snahu zmenšit jejich stroje do minimálních rozměrů. Další významné události nastaly v 17. století objevením mikroskopu a roku 1947 vynálezem prvního polovodičového tranzistoru, ale až ve druhé polovině dvacátého století dal Richard Feynman podnět k rozvoji MEMSů. V roce 1967 Harvey Nathanson vynalezl první technologickou operaci pro jejich výrobu - povrchové mikroobrábění, 1970 byl představen první tlakový senzor a akcelerometr, který byl 1974 poprvé komerčně využit. V osmdesátých a devadesátých letech nastal veliký rozvoj jak výrobních technologií, tak samotných MEMSů. Stávaly se menší, méně energeticky náročné a méně nákladné. V dnešní době je jejich vývoj již na vysoké úrovni a začíná se prolínat s vývojem nanosystémů. MEMSy jako jsou senzory, gyroskopy, kapacitory a aktuátory se stávají běžnou součástí všech zařízení, ať už se jedná o automobilový, letecký, chemický, farmaceutický či biomedicínský průmysl a jejich význam do budoucna stále roste.

1 DEFINICE ZÁKLADNÍCH POJMŮ

1

1.1 Definice MEMS

1.1

V dnešní literatuře se vyskytuje velké množství definic vyjadřujících význam slova MEMS, neexistuje však žádná, která by tento pojem jednoznačně popisovala nebo byla ustáleně používána. Níže jsou uvedeny vybrané definice:

Mikrosystém je obvykle popisován jako propojení elektrických, mechanických, optických nebo dalších signálových domén na jednom čipu, popř. multičipovém hybridu. [1]

MEMS je zařízení mikroskopických rozměrů sestávající se z mechanických součástí, které jsou společně s řídicím integrovaným obvodem umístěné do jediného pouzdra. MEMS zařízení není integrované. [2]

Malá mechanická zařízení, která jsou zkonstruována na polovodičovém čipu a mají velikost v řádu mikrometrů. Převážně se užívají pro výrobu tlakových, teplotních, chemických a vibračních senzorů. [3]

Terminologie pro systémy, které vkládají mechanická zařízení jako tekutinové senzory, zrcadla, aktuátory, tlakové a teplotní snímače a snímače kmitů na polovodičové čipy. MEMS spojuje mnoho disciplín včetně fyziky, bioinformatiky, biochemie, optiky, elektrotechniky a elektroniky. [4]

MEMS je zkratka pro mikroelektromechanické systémy a charakterizuje velmi malé zařízení s rozšířenou funkcí ve srovnání se zařízeními mikroelektronickými. Mechanické struktury jsou užívány pro vzájemné ovlivňování s okolním prostředím umožňující snímání nebo působení. Termín MEMS je často používán v kombinaci s předponami nebo různými vsuvkami k tomu, aby přesněji popisoval funkci daného systému, např. RF-MEMS – vysokofrekvenční mikroelektromechanické systémy nebo MOEMS – mikrooptickoelektromechanické systémy. [5]

MEMS jsou zařízení, které jsou charakteristické velikostí mezi 1mm a 1 μm, kombinují elektrické a mechanické komponenty a jsou vyráběny metodami na výrobu integrovaných obvodů. [6]

Na základě těchto a dalších vymezení lze MEMS definovat takto:

MEMS je akronym pro mikroelektromechanický systém a to je takové zařízení, které spojuje mechanické části mikroskopických rozměrů s řídicím integrovaným elektrickým obvodem na jednom polovodičovém čipu. Mechanickou částí se rozumí nosníky, membrány, hřebenové struktury a jiné.

1.2 Typické struktury MEMS

1.2

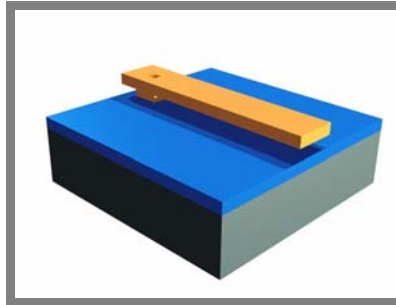
Každý MEMS se skládá z jednoho či více různě uspořádaných základních stavebních prvků. Mezi tyto prvky patří nosníky, membrány, můstky, destičky, kanálky, kryty, ozubená kola a další.

1.2.1 Nosníky

1.2.1

Vzhledem k velikostem MEMSů není možné sestavit a používat valivá ložiska. Mazání je velice obtížné, jelikož molekuly maziva jsou mnohdy větší než mezera mezi povrchy součástí, a proto se musí využívat alternativní způsoby. Jedním z řešení jsou nosníky (Obr. 1-1), pomocí kterých jsou pohyblivé části systému

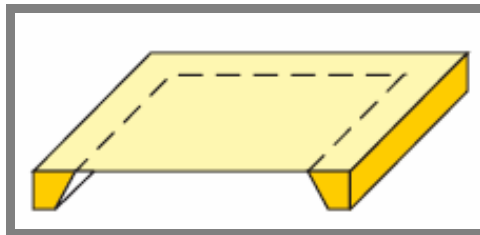
zavěšeny, aby se zamezilo tření mezi povrchy, jelikož materiály z nichž se MEMS vyrábí, se rychle odírají. Nosníky jsou základní složkou téměř každého MEMS, bývají vetknuty v jednom nebo ve dvou bodech a kromě funkce pružin se používají jako senzory, snímače, transportní mechanismy a spínače. Vyrábějí se nejčastěji technologií objemového mikrobrábění. [1]



Obr. 1-1 Nosník [7]

1.2.2 Membrány

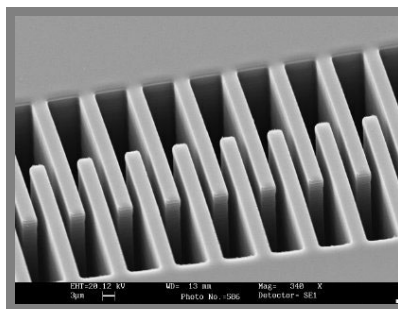
Membrány (Obr. 1-2) jsou tvořeny velice tenkou deskou, která je po obvodě vetknutá. Konají převážně funkci tlakových senzorů a jsou vyráběny technologií objemového mikrobrábění. [1]



Obr. 1-2 Membrána [1]

1.2.3 Hřebenové struktury

Základní části senzorů, kapacitorů, rezonátorů a aktuátorů. Jedna část struktury bývá pevně upnuta na podkladovou desku, druhá je pohyblivá a na místě drží pomocí nosníků, které umožňují pohyb v jednom či více směrech. K rozpohybování či zaznamenání pohybu hřebenové struktury (Obr. 1-3) se využívá principu piezoelektrického jevu a Coulombovské interakce mezi jednotlivými destičkami. K jejich výrobě se nejčastěji používá technologie LIGA. [1]



Obr. 1-3 Hřebenová struktura [8]

1.2.4 Mikrokanálky

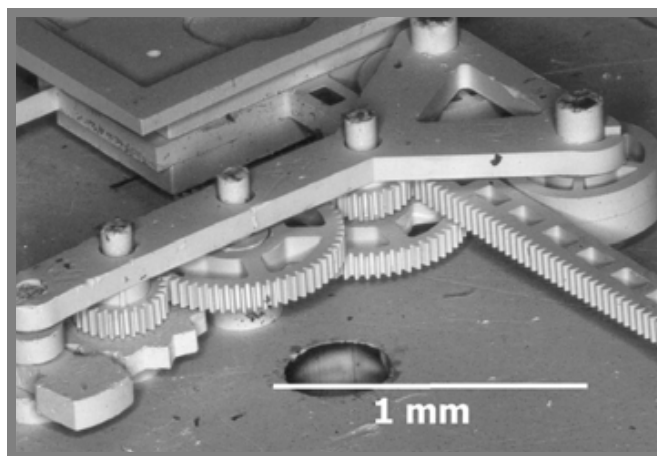
1.2.4

Velice důležitá součást tiskových hlav inkoustových tiskáren, senzorů chemických látek a dávkovačů medikamentů. K vystřikování kapiček inkoustu, či jiné tekutiny, se využívá zvýšení tlaku v systému, čehož můžeme dosáhnout zúžením části trubice pomocí piezoelektrického jevu, nebo zahřáním tekutiny. K usměrnění letu kapiček se používají speciální trysky umístěné na konci trubice. [1]

1.2.5 Ozubená kola

1.2.5

Kola s čelním ozubením se v MEMSech používají pro přenos složitějších pohybů. Nemají přesný evolventní profil, mají poměrně velkou vůli a rychle se opotřebovávají. Nejčastějším způsobem výroby je LIGA. [1]



Obr. 1-4 Ozubená kola vyrobená technologií LIGA [6]

2 PŘEHLED A ROZBOR EXISTUJÍCÍ LITERATURY V DANÉ OBLASTI

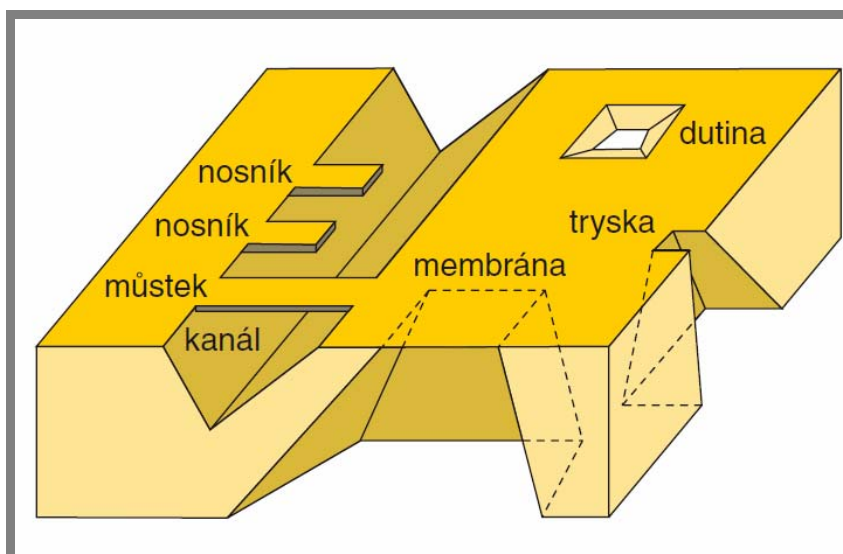
2.1 Technologie pro realizaci MEMS

2.1.1 Povrchové mikroobrábění - *surface micromachining*

Povrchové mikroobrábění se nejčastěji používá k vytvoření pohyblivých struktur na povrchu křemíkového či jiného substrátu. Mezi jeho hlavní výhody patří jednoduchá integrace obroběných základních struktur na jednom čipu společně s elektrickým obvodem. Povrchovým mikroobráběním lze realizovat velice složité tvary MEMSů, jako jsou například hřebenové struktury v gyroskopech a akcelerometrech. Funkční tvary se zhotovují z tenkých vrstev nanesených na povrchu substrátu pomocí různých postupů. Mezi tyto postupy patří postupná depozice, suché leptání a mokré odleptání „obětního materiálu“ pro uvolnění funkčních struktur. Povrchové mikroobrábění se využívá pro výrobu mnoha MEMSů, jako například mikropinzet, křemíkových mikromotorků, gyroskopů, akcelerometrů apod. Pomocí povrchového obrábění lze vytvořit mikrostruktury mnoha typů, jde především o membrány, mikronosníky, mikromůstky, kanálkové mikrostruktury a již zmíněné hřebenové struktury. [1]

2.1.2 Objemové mikroobrábění - *bulk micromachining*

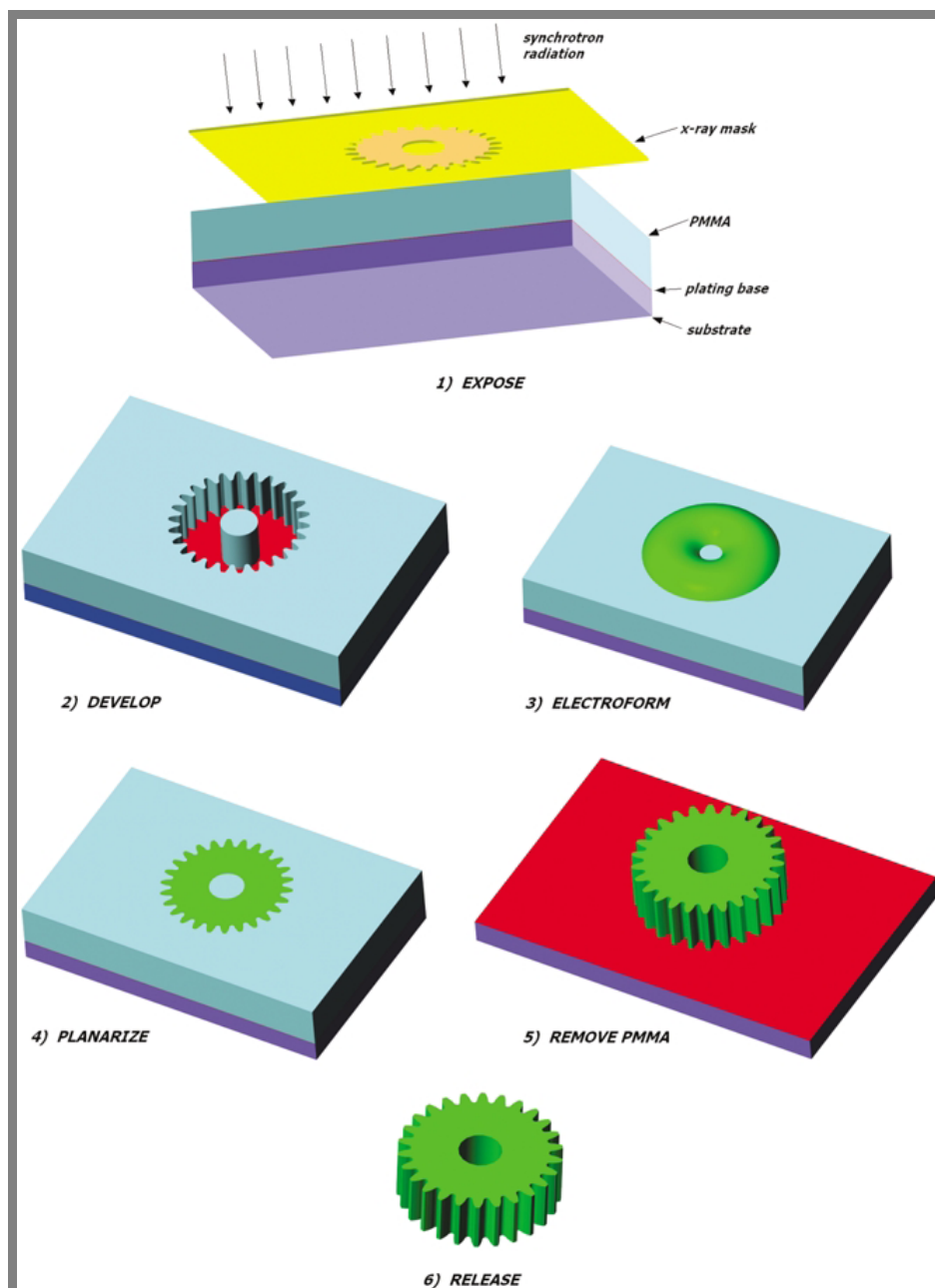
Pojem objemové mikroobrábění může být zavádějící a mylně vzbuzovat dojem, že se jedná o obrábění materiálu na nějakém mikroobráběcím stroji. Jde však o různé technologické operace, které selektivně odstraňují určené části substrátu a vytváří tím různé základní struktury MEMS jako nosníky, membrány a destičky (Obr. 1-3), které se používají pro výrobu různých typů senzorů nebo aktuátorů. Mezi typické technologické procesy lze zařadit např. izotropní a anizotropní mokré leptání, suché leptání nebo leptání se závislostí na koncentraci příměsí s využitím roztoku KOH. [1]



Obr. 2-1 Struktury realizované objemovým mikroobráběním [1]

2.1.3 LIGA – röntgentiefen lithographie, galvanoformung und abformung

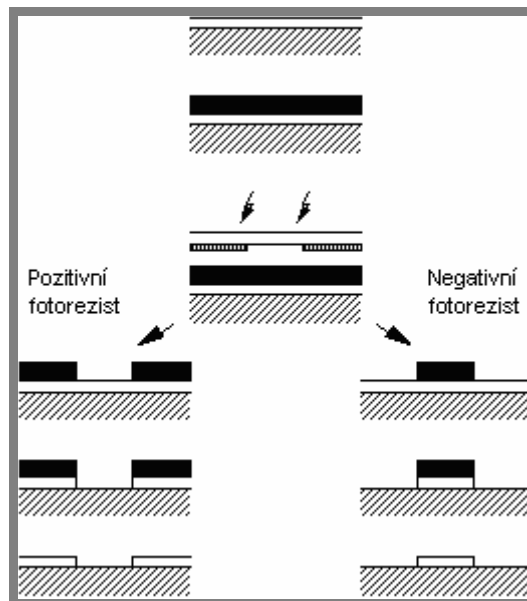
Technologie rentgenové litografie, galvanického pokovování a odlévání (Obr. 1-3) umožňuje prostorové mikrotvarování jak kovů, plastů, keramiky, tak i skla. Lze jí vytvořit mikrostruktury velmi jemných tvarů a využívá se při výrobě MEMSů stále častěji. Tato technologie dává možnost realizovat struktury s výškou až 1 000 μm [1] a velkým geometrickým rozlišením. Elektrolytické pokovení je možné kombinovat také s jinými technologickými procesy.



Obr. 2-2 Postup výrobní technologie LIGA [6]

2.1.4 Fotolitografie - *photolithography*

Fotolitografie (Obr. 1-3) je metoda chemicko-fyzikálního zpracování povrchu, používaná především při vytváření polovodičových struktur. Využívá se nejčastěji tam, kde je potřeba zpracovat jen určitou část povrchu a nepoškodit zbytek součásti. Metoda začíná vytvořením vhodného povrchu a jeho případné úpravě leptáním, broušením, oxidací apod., podle struktury povrchu, která je potřebná. Na něj je nanесena tenká vrstva tzv. fotorezistu, což je chemická substance, která má citlivost na světlo. Světlo v místě dopadu vytvoří nový typ vazby, nebo naopak vazby rozruší, to záleží na typu fotorezistu a podle toho se rozlišuje fotolitografie pozitivní a negativní. U pozitivního typu fotorezistu se povrch ozáří v místech, která mají být odstraněna. Ozáření je zpravidla provedeno z plošného zdroje přes stínící masku, ale může být rovněž použito rastrovací zařízení s bodovým zdrojem. Na ozářený fotorezist je nanесena vrstva leptadla, které působí jen na ozářená místa, která mají rozrušené vazby polymerových řetězců, neozářená ponechá beze změny. Naopak u negativního fotorezistu se ozařuje materiál, který má na povrchu zůstat, ten se v místě ozáření vytvrdí a zesílňuje, zbytek se pomocí leptadla odstraní. Po vyleptání pozitivního fotorezistu zůstává původní povrch pokrytý v patřičných 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 nanесení nové vrstvy materiálu na vyleptaná místa. Posledním krokem je zpravidla odstranění ozářeného fotorezistu a omytí původního povrchu. [9]



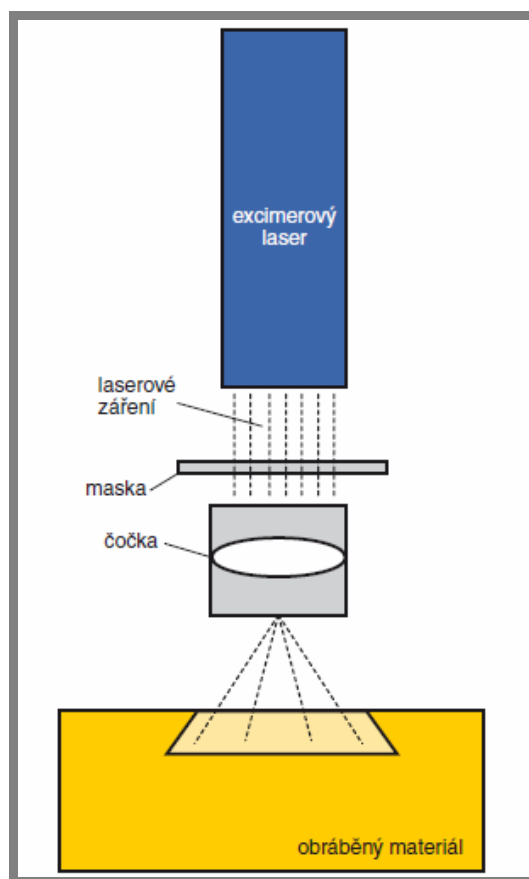
Obr. 2-3 Postup fotolitografie [10]

2.1.5 Leptání

Leptání je technologický proces, při kterém jsou odstraňovány části krycích či podkladových vrstev. Leptání se dělí na dva základní druhy – suché a mokré. Mokré leptání je založeno na ponoření součásti do roztoku, kde se požadovaná část materiálu změní na tekutou sloučeninu a je odplavena. Při suchém dochází k leptání použitím plazmatu nebo iontového paprsku. [6]

2.1.6 Obrábění excimerovým laserem

Technologie mikroobrábění excimerovým laserem (Obr. 2-4) je založena na odstraňování materiálu laserovým paprskem pracujícím v impulzním 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. [1]



Obr. 2-4 Obrábění excimerovým laserem [1]

2.2 Návrhové nástroje

Na dnešním trhu se vyskytuje velké množství CAD nástrojů určených pro návrh MEMSů (Tab. 2-1). Vybrané z nich jsou uvedeny a popsány v této kapitole.

Tab. 2-1 Návrhové nástroje

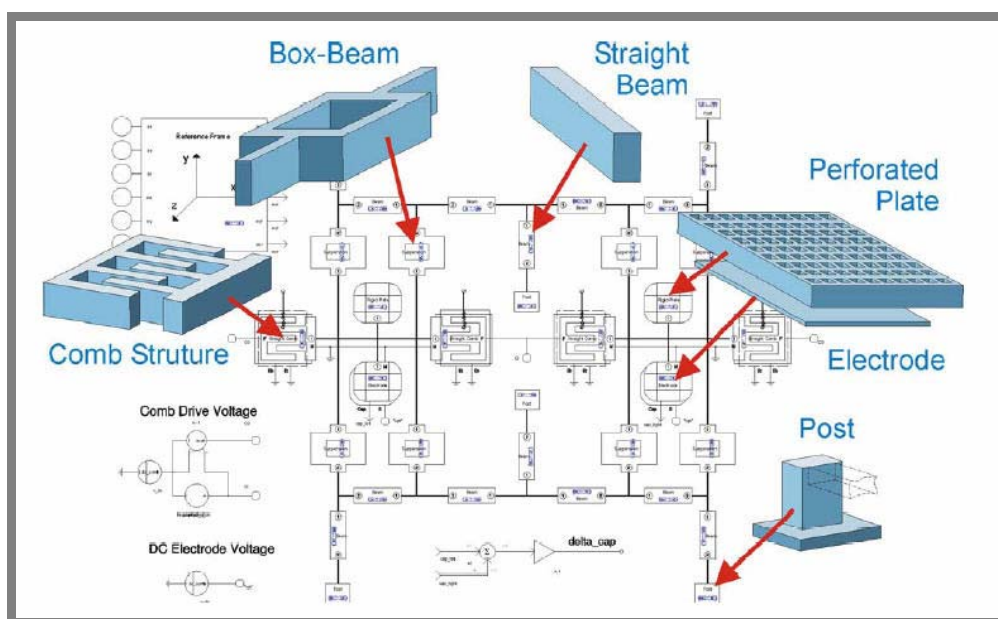
CAD nástroje	2D náčrtek	3D model	simulace chování	simulace výroby
CoventorWare	ano	ano	ano	
MEMulator				ano
IntelliCAD	ano	ano	ano	ano
IntelliSuite	ano	ano	ano	ano
MEMS Pro	ano	ano	ano	ano
MEMSolver	ano	ano	ano	ano
SolidWorks	ano	ano	ano	
AutoCAD	ano			
ANSYS		ano	ano	
FEMPRO	ano	ano	ano	

2.2.1 CoventorWare

Je komplexní systém pro navrhování, simulaci, výrobu a analýzu MEMSů od společnosti Coventor.

Architekt

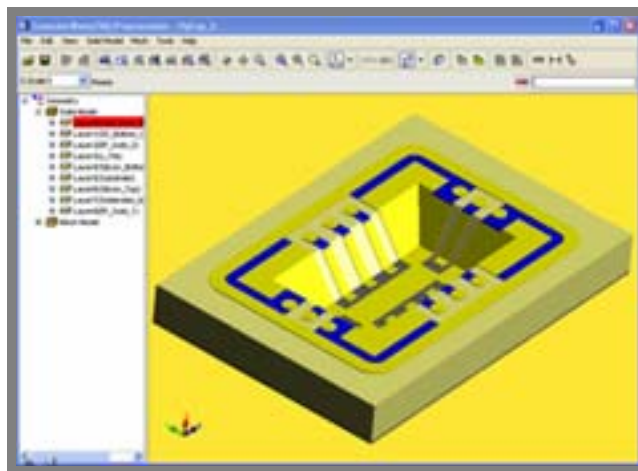
V tomto modulu lze vytvořit schematický model MEMSů (Obr. 2-5). Model se vytvoří pomocí grafických značek a symbolů nahrazující jednotlivé členy a spojnic mezi nimi. Je k tomu možno využít rozsáhlou knihovnu elementů, která je součástí programu nebo si vytvořit elementy vlastní. Dále modul simuluje chování součástí i celého systému a to jen na základě blokového schématu, případně optimalizuje návrh systému užitím vyspělých technik jako je Monte Carlo analýza. [11], [16]



Obr. 2-5 Blokové schéma vytvořené v modulu Architekt [11]

Designer

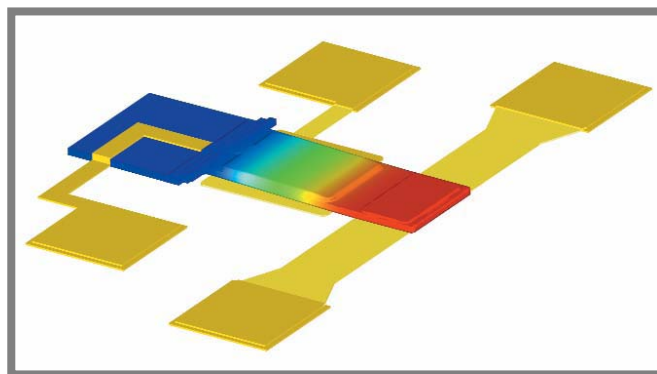
Modul Designer slouží k vytváření 2D nákrešů, 3D modelů (Obr. 2-6) a navrhování postupů výroby. 3D modely je možno vytvářet automaticky generováním z nákrešů, nebo samostatně. Modely i nákrešy se dají exportovat do různých simulačních programů jako je ANSYS a Analyzer, nebo CAD programů jako AutoCAD a ProEngineer. Designer obsahuje širokou materiálovou databázi s jejich vlastnosti potřebnými pro výrobu a procesový editor ve kterém se navrhuje celý postup výroby. Designer také automaticky generuje síť elementárních prvků na modelech pro pozdější simulace pomocí metody konečných prvků v modulu Analyzer. [12]



Obr. 2-6 3D model MEMS vytvořený v modulu Designer [12]

Analyzer

Modul Analyzer je vytvořen pro simulaci a analyzování systému a jeho částí navržených v předešlých modulech. Vykonává komplexní analýzu MEMS a to elektrostatickou, mechanickou, piezoelektrickou i termální. Skládá se z mnoha podprogramů, které se zabývají určitým typem analyzování. Například MemCap je část programu zabývající se elektrostatickými výpočty. Užívá k simulacím napěťové podmínky, kapacitní odpor a ztrátové napětí. MemMech se zaměřuje na mechanické výpočty a analyzuje strukturální, tlakové a kontaktní termomechanické vlastnosti. CoSolveEm kombinuje výsledky obou předchozích podprogramů. K simulacím Analyzer využívá metodu konečných prvků, hraničních prvků a konečných objemů. Výsledky je možno zobrazit ve jak v textové podobě, tak i ve 2D řezech nebo 3D modelech (Obr. 2-7). [13], [16]



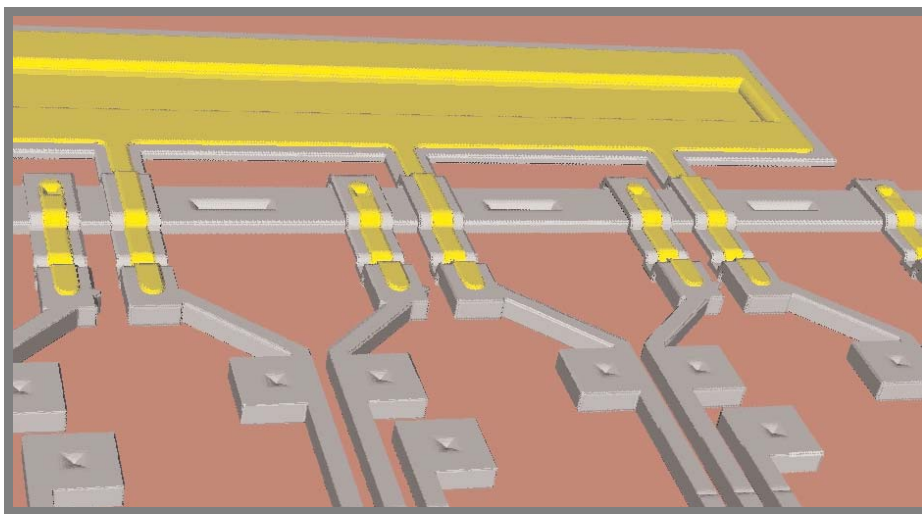
Obr. 2-7 Analýza MEMS v modulu Analyzer [13]

Integrator

Poslední modul umožňuje extrahování modelů nebo jejich částí navržených v předešlých modulech do simulačních programů jako je Matlab-Simulink nebo Cadence Virtuoso a vytváření modelů do knihovny Architektu. [16]

2.2.2 MEMulator

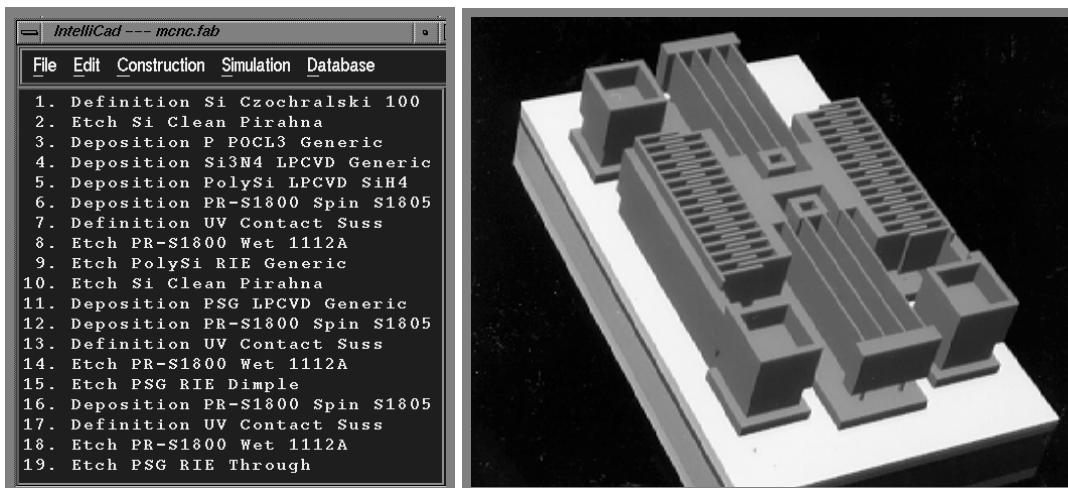
MEMulator je stejně jako CoventorWare softwarový produkt od společnosti Coventor. Simuluje technologii výroby jednotlivých základních složek i celých MEMSů. MEMulator vytvoří pomocí 2D řezů a popsání výrobní technologie poměrně detailní a realisticky vypadající model výrobku (Obr. 2-8). Napomáhá tím odhalit defekty, které mohou vzniknout při výrobě nebo vinou špatného návrhu bez nutnosti fyzické výroby prototypu. [14]



Obr. 2-8 Model MEMS [14]

2.2.3 IntelliCAD

Byl vyvinut kvůli předpovídanému rozvoji MEMSů, potřebě vytvářet nové systémy a postupy výroby. Stal se jedním z vedoucích produktů při převratném rozmachu nových CAD systémů pro MEMSy a poskytuje konstruktérům možnost modelovat celá zařízení a simulovat jejich výrobu a chování aniž by museli jakýkoli model nebo jeho prototyp skutečně vyrobit. IntelliCAD má rozsáhlé databáze výrobních procesů, nákrešů i materiálů a umožňuje uživateli snadno doplnit informace do kterékoli z nich. Uživatel vytvoří součástku pomocí nákresu vlastního, či vybraného z knihovny. Z databáze obráběcích procesů vybere ten, který chce použít a zadá všechny potřebné parametry včetně materiálu. Program automaticky vytvoří 3D model. K simulaci využívá metodu konečných a hraničních prvků, nebo jejich kombinaci. Povrchové i objemové sítě pro tuto simulaci si program také umí vytvořit automaticky, ale uživatel ji může podle potřeby pozměnit. IntelliCAD provádí termomechanickou, elektrostatickou a spojenou termo-elektromechanickou analýzu a výsledky zobrazuje textově, nebo graficky (Obr. 2-9). [15]



Obr. 2-9 Prostředí a model MEMS vytvořený v programu IntelliCAD [15]

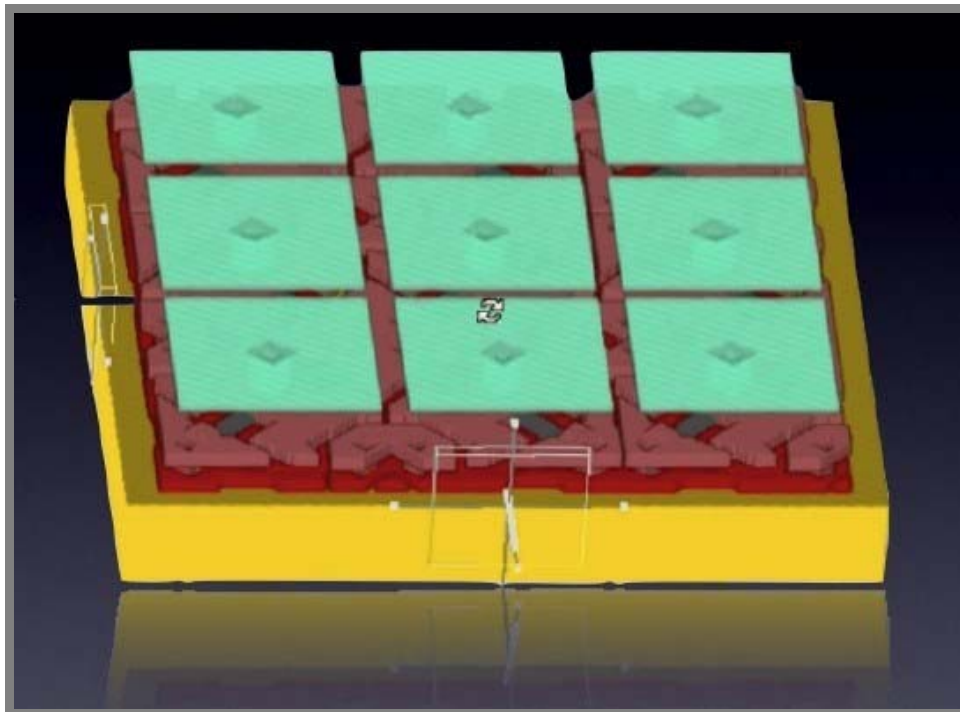
2.2.4 IntelliSuite

2.2.4

Návrhový soubor programů umožňující vývoj produktu od konceptu po uvedení na trh. Oproti jiným návrhovým produktům má IntelliSuite značně větší množství modulů s čímž souvisí těžší ovládání, ale i lepší propracovanost a podrobnost každého návrhu (Obr. 2-10).

Návrh začíná vytvořením výkresů jednotlivých vrstev MEMS v programu IntelliMask, což je software na 2D nákresy. Každý nákres je na samostatné vrstvě a ty jsou ukládány do jednotlivých souborů. Dalším krokem je určení každého kroku výrobního procesu v IntelliFab. K plochám vytvořeným v nákresech se přiřadí materiál vybraný z databáze a určí se, jaké plochy v jednotlivých vrstvách ponechat a jaké odebrat. Materiály a jejich vlastnosti se do knihovny vkládají a upravují v programu MEMaterial. Po přiřazení vlastností všem plochám IntelliFab automaticky vygeneruje 3D model vyráběného systému, který je možné zobrazit v různých pohledech a příčných řezech. Generování 3D modelu lze provést i v programu 3-D Builder, který navíc vytváří síť konečných prvků pro simulační software. Síť se může vytvářet globálně na celou součást, nebo lokálně po úsecích, podle předpokládaného zatížení. Mimoto lze přidávat síly, momenty a teplotní zatížení na různé části povrchu struktury. Mezi generátory sítí a modelů určených pro simulaci patří i System Model Extractor. Ten pomocí speciálního algoritmu redukuje počet uzlů sítě potřebných pro výpočet na minimální, při kterém je dosaženo dostačujícího výsledku a zkracuje tím čas potřebný pro analýzu. Moduly Thermomechanical, PiezoMEMS, ElectroMagnetics a MicroFluidics provádějí analýzu chování při mechanickém, elektromagnetickém, elektrostatickém i kombinovaném zatížení a výsledky zobrazují v textové podobě, grafech i v pohyblivých simulacích. Dalšími nástroji jsou AnisE, RECIPE 3D a IntelliEtch, které simulují proces výroby, například AnisE mokré anizotropní leptání a RECIPE 3D izotropní, RIE, a suché leptání. Simulací procesu výroby se zjistí ideální podmínky pro výrobu určité součásti jako je čas, teplota a parametry leptadel, případně chyby v konstrukčním řešení systému. Modul SYNPLE je vytvořen k simulaci chování navrženého MEMS zapojeného do elektrického obvodu spolu s polovodičovými prvky. Zapojení se provede pomocí blokových schémat jednotlivých komponent,

keré můžeme postupně vytvářet samostatně nebo vkládat z knihovny. Poslední modul EDA Linker slouží k propojení programového balíku IntelliSuite s programy na tvorbu elektrických obvodů a polovodičových součástí jako je Cadence, Mentor, Synopsys nebo Tanner. [16], [17]



Obr. 2-10 MEMS vytvořený programem IntelliSuite [18]

2.2.5 MEMS Pro v 6.0

Je flexibilní a komplexní CAD software pro návrh a analýzu MEMSů a integrovaných obvodů. Nabízí možnost jednotného řešení celého procesu vývoje systému od návrhu, přes generování 3D modelu, až po simulaci jeho chování. Stejně jako ostatní komplexní programy se i MEMS Pro rozděluje do částí, které se zabývají jednotlivými kroky návrhu, například nástroje na modelování, editory nákrešů, kontrolní a výrobní moduly.

Návrh součásti začíná nákresem 2D struktury v modulu L-Edit Pro, který je klasickým programem pro vytváření 2D nákrešů jako AutoCAD, jen se zaměřením na MEMS. Obsahuje knihovnu základních komponent, která může být kontinuálně doplňována a upravována. Návrh pokračuje v modulu 3D Solid Modeler, který vytváří 3D modely z předešlých nákrešů za pomoci uživatelem nadefinovaných postupů výroby. Modul podporuje jak objemové, tak povrchová mikroobrábění a umožňuje zobrazení zpracovaného modelu. Následuje simulace MEMSů v simulátoru MEMS Pro nebo jiném simulačním programu. Důležitým modulem je MEMS Modeler, ten zajišťuje vytvoření modelu chování komponenty z výsledků předešlé analýzy. Posledním modulem je T-Spice Pro, který umožňuje simulaci chování navrhovaného MEMS již společně s elektronickými komponentami.

MEMS Pro obsahuje ještě řadu menších modulů, které zajišťují plynulé vazby mezi hlavními moduly, kontrolují správnost návrhu, vytváří blokové schéma nebo zajišťují zpětný proces návrhu. [16], [19]

2.2.6 MEMSolver

2.2.6

Další z nástrojů pro navrhování a analyzování MEMSů. Software je rozdělený do pěti částí – mechanismů, snímání, působení, procesu výroby a analýzy. Každá z těchto částí se dále rozvětňuje na podrobné, ale poměrně základní dělení. Modul mechanismů se dělí na další tři části, zabývá se v nich výpočty maximálního tlaku, vychýlení, kmitání a tlumení nejběžnějších struktur, jakými jsou membrány a nosníky. V druhé části se počítá např. citlivost či maximální odchylka měřitelná buď piezoelektrickým nebo kapacitním snímáním. Část působení je rozdělena na elektrostatické a tepelné činitele a u nich se počítají výchylky, působící síla nebo elektrické napětí potřebné k určitému pohybu MEMSu. Čtvrtá část se zabývá procesem výroby, jsou zde zahrnuty základní postupy jako je litografie, oxidace, nanášení mikrofilmů či mokré leptání a lze zde zjistit časy potřebné k těmto procedurám. Poslední část obsahuje knihovnu materiálů s jejich vlastnostmi a převaděč jednotek. Všechny výsledky získané v tomto programu se mohou zobrazit v textové podobě či grafech. [20]

2.2.7 AutoCAD

2.2.7

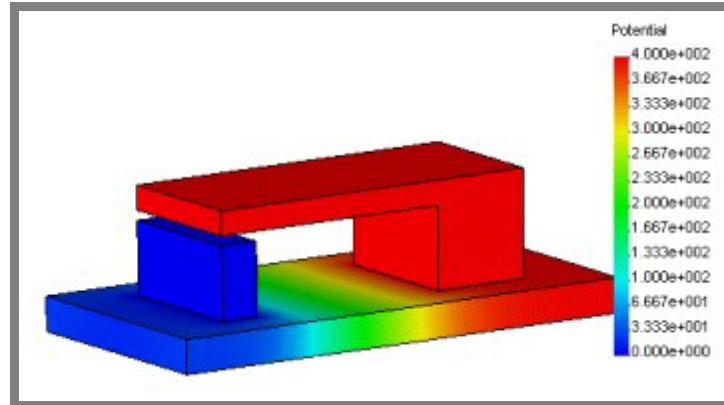
V oblasti MEMS slouží tento software k vytváření 2D náčrtesů. Kreslí se v něm příčné řezy součástí, které se převádí do jiných programů k dalšímu zpracování do 3D modelu nebo jako předloha pro jednotlivé kroky výroby. Ke kreslení jsou k dispozici základní geometrické obrazce jako čtverec, kružnice či polygon či funkce zrcadlení, ekvidistanta apod. Jednou nakreslené návrhy nebo jejich části lze ukládat do tzv. bloků a později jednoduše vkládat.

2.2.8 SolidWorks

2.2.8

I přesto že SolidWorks není profesionální nástroj pro navrhování MEMSů a nepokrývá celý postup vývoje, je využíván k vytváření 2D náčrtesů, 3D modelů a simulaci chování částí systému (Obr. 2-11). Návrh součástí začíná náčrtem v části programu nazvaném Skica. Náčrt se tvoří pomocí základních geometrických prvků jako kružnice, čtverec nebo čára. Po přepnutí do modulu Prvky se z náčrtu vytvoří 3D model tažením či rotováním a je možno jej upravovat dalšími nástroji jako například zkosení, skořepina a kruhové pole. Hotovému 3D modelu se dá přiřadit materiál s vlastnostmi potřebnými pro pozdější simulaci. Tu zajišťují moduly COSMOS přímo v programu, nebo jiný program určený k simulaci po vyexportování navržené součásti. Modul SolidWorks Simulation řeší lineární tlak, napětí, teploty a celou řadu dalších problémů, SolidWorks Motion chování styčných ploch a SolidWorks Flow Simulation se zabývá dynamikou kapalin.[21] Po zkontrolování funkčnosti součástí jsou v softwaru SolidWorks vytvořeny příčné řezy určené pro jednotlivé kroky výrobního procesu.

Nevýhody programu SolidWorks jsou, že je určen k vytváření makroskopických součástí a proto nemá žádnou knihovnu součástí ani databázi materiálů pro MEMS. Simulace není přesná z hlediska různého chování makroskopických a mikroskopických systémů. Emulace výroby zde není uskutečnitelná. [22]



Obr. 2-11 Nosník v simulačním modulu SolidWorksu [23]

2.2.9 ANSYS

ANSYS je jedním z nejrozšířenějších a nejvíce propracovaných systémů pro simulaci a analýzu jak součástí, tak celých systémů. Tento programový balík, který je založený na metodě konečných prvků je určen pro řešení všech kategorií, co se simulace týče. Proces začíná importováním nebo vytvořením simulované součásti. Modely importované z jiných CAD systémů se dají zjednodušit o pro simulaci nepodstatné detaily v modulu ANSYS DesignModeler. ANSYS poté automaticky vytvoří síť konečných prvků, k čemuž využívá elementy od čtyřstěnných po šestistěnné. Dále se přiřadí materiál z obsáhlé knihovny, typy vazeb a zatížení působící na součást. Vlastní simulace jako statická lineární, pevnostní termální, termální či napětí-ově-deformační provádí ANSYS v jeho jednotlivých modulech, mezi které patří Multiphysics, Structural Mechanics, Fluid Dynamics, Electromagnetics atd. ANSYS umožňuje vyhodnocené výsledky zobrazit v mnoha podobách, například pomocí grafů, v textové podobě, na 3D modelu nebo videu. [17]

2.2.10 FEMPRO

FEMPRO je další systém založený na bázi metody konečných prvků pro simulaci lineární dynamiky, proudění kapalin, elektrostatiky, statického namáhání atd. 3D model můžeme importovat, nebo ho vytvořit v modulu Alibre Design, což je program na kreslení ve 3D. Před automatickým vytvořením sítě konečných prvků je nutné nejprve zadat parametry zatížení a okrajové podmínky. Vytvořenou síť je možno upravovat, nebo ji celou vytvořit postupně samostatně. Pro samotnou simulaci je využíváno velké množství modulů, ze kterých každý simuluje jeden druh analýzy, například SSAPO lze použít pro lineární statickou analýzu. Výstupy jsou zobrazeny v textové podobě, grafech, nebo na 3D modelech analyzovaných součástí. [17], [22]

3 ANALÝZA A ZHODNOCENÍ ZÍSKANÝCH POZNATKŮ

Nejvýznamnějšími a nejvíce rozšířenými technologiemi používanými pro výrobu MEMS jsou fotolitografie, LIGA, povrchové a objemové mikroobrábění. Základní popis a typické součásti vyráběné těmito metodami společně s výčtem jejich výhod jsou uvedeny ve druhé kapitole.

Další část práce je věnována návrhovým nástrojům, jejich rozdělení a funkci jednotlivých částí doplněnou o výhody a nevýhody. Mezi programy, které jsou určeny pouze pro návrh MEMSů patří CoventorWare, IntelliSuite, IntelliCAD a MEMS Pro. Tyto systémy jsou navrženy tak, aby vyhovovaly nejen zkušeným návrhářům, ale i začínajícím konstruktérům. Jejich výhodou je stejné pracovní prostředí a podobné ovládací prvky ve všech modulech programu, což činí návrh snadnější a rychleji proveditelný. Nevýhodami jsou relativně vysoké pořizovací náklady a horší dostupnost způsobená malým rozšířením těchto produktů.

Nejstarším nástrojem pro komplexní návrh a simulaci je IntelliCAD vyvinutý společností IntelliSense. V současné době je nahrazován novějším softwarem IntelliSuite dodávaným stejnou firmou. Jedná se o kvalitní a dobře propracovaný software s velkým množstvím užitečných knihoven a databází. Přílišné členění do modulů a nástrojů se však může zdát poněkud nepřehledné, činí navrhování složitějším a časově náročnějším. Proto je tento program určen pro zkušenější uživatele. Nejzdařilejším z těchto produktů se jeví návrhový systém CoventorWare od firmy Coventor. Software je rozdělený do čtyř plynule na sebe navazujících modulů, z nichž každý se zabývá určitou částí návrhu. Prostředí programu je přehledné a snadno ovladatelné. CoventorWare je doplněn programem MEMulator, který slouží jako simulátor výroby MEMSů. Posledním ze skupiny programů pro kompletní návrh je MEMS Pro. Je založen na stejném principu jako již zmíněné softwary, s tím rozdílem, že navíc simuluje chování MEMSu společně s elektronickými součástmi v elektrickém obvodu.

Další softwary uvedené v této kapitole již nejsou určeny přímo pro navrhování MEMSu, ale dají se k tomuto účelu využít. Patří mezi ně AutoCAD, ANSYS, SolidWorks aj. Výhodou těchto programů je větší rozšířenost a nižší pořizovací náklady, nevýhodou nutnost znalosti vícero systémových prostředí, převádění modelů z jednoho programu do druhého a s tím spojená vyšší časová náročnost.

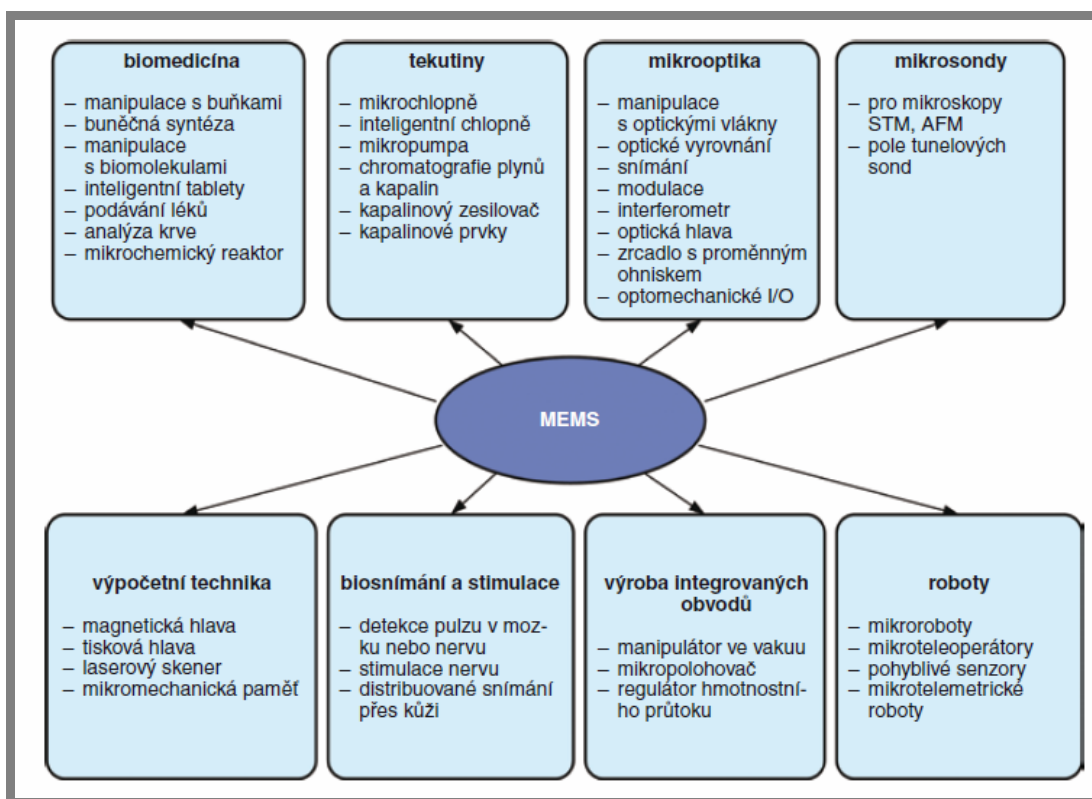
Podíl strojního inženýra na celkovém návrhu MEMS je velice významný. Mezi jeho úkoly patří navrhnout systém, který bude splňovat předem stanovené podmínky, bude mít požadované vlastnosti a design. Návrh je nutno zaznamenat a ověřit pomocí různých softwarů. Zkontrolovat vhodnost vybraného materiálu, simulovat chování systému za působení předpokládaných vnějších vlivů, určit ideální podmínky pro jeho funkčnost a systém vyrobit. Zbylé části návrhu jako integrace s elektrickým obvodem a polovodičovými částmi, programování řídicí jednotky či elektrostatické simulace se uskutečňují ve spolupráci s elektroinženýry a informačními techniky.

CAD nástroje pro návrh MEMSů jsou již v dnešní době na vysoké úrovni. Umožňují kompletní návrh systému, mají kvalitní a rozsáhlé databáze materiálů, stavebních elementů i základních MEMSů. Výsledky simulací založené na metodě konečných prvků poskytují informace jen mírně se lišící od reálných hodnot. Tímto dovolují vyvinout MEMS bez nutnosti výroby prototypu, což šetří čas i finanční prostředky.

4 VYMEZENÍ TRENDŮ BUDOUCÍHO VÝVOJE

4.1 Oblasti využití MEMS

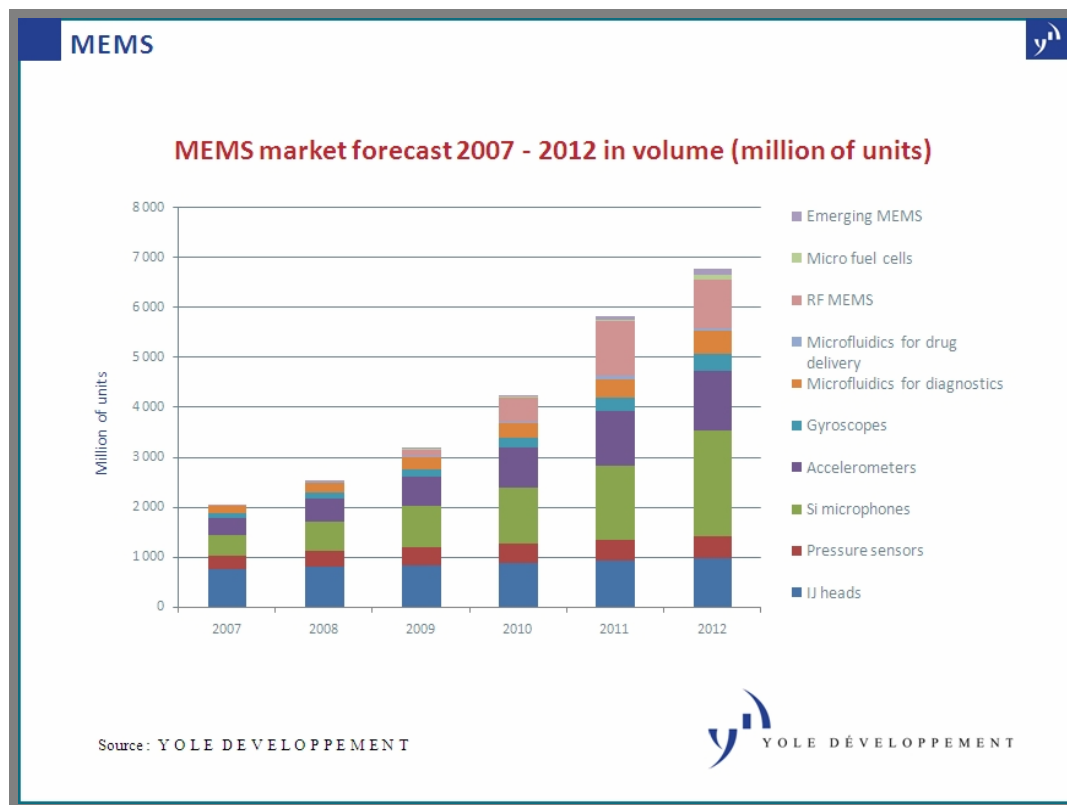
MEMS se rozšiřují do všech odvětví průmyslu (Obr. 4-1) a jejich význam stále poroste. Mezi jejich největší výhody patří velikost a možnost výroby i tisíce systémů na jedné desce. Dále integrace s elektrickými obvody a polovodičovými prvky na jednom čipu a nízká výrobní cena. Užívání MEMSů se v následujících třech letech téměř dvakrát zvýší (Obr. 4-2). Podle předpokladu nastane největší rozvoj u vysokofrekvenčních MEMSů, které se užívají v bezdrátových technologiích, křemíkových mikrofonů a reproduktorů do mobilních telefonů a akcelerometrů využívaných v automobilovém průmyslu. [26]



Obr. 4-1 Oblasti využití MEMS [1]

4.2 Trendy budoucího vývoje

Vývoj se bude ubírat směrem zdokonalování stávajících softwarů, rozšiřováním jejich knihoven materiálů, základních elementů a způsobů výroby. Také zlepšením simulačních modulů, aby se získané výsledky analýz co nejméně lišily od reálného chování MEMSů. Mezi nejvýznamnější trendy budoucího vývoje patří zkracování časových nároků a snižování finančních prostředků potřebných pro kompletní návrh MEMSů.



Obr. 4-2 Předpokládaný vývoj trhu s MEMS [26]

5 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] 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>>.
- [2] HARTL, Martin. *MEMS a NEMS* [on-line]. [cit. 2009-03-15]. Dostupný z: <https://www.vutbr.cz/elearning/file.php/79988/prednasky/prednaska13_6km.pdf>.
- [3] *MEMS Definition from PC Magazine Encyclopedia* [on-line]. 1994 [cit. 2009-03-15]. Dostupný z: <http://www.pcmag.com/encyclopedia_term/0,2542,t=MEMS&i=46791,00.asp>.
- [4] *MEMS - Glossary Definition* [on-line]. 1994 [cit. 2009-03-17]. Dostupný z: <<http://www.pctechguide.com/glossary/WordFind.php?wordInput=MEMS>>.
- [5] KAUFMANN, Jens. *Introduction of MEMS* [on-line]. 2007 [cit. 2009-03-20]. Dostupný z: <http://events.ccc.de/congress/2007/Fahrplan/attachments/985_IntroductionToMEMS.pdf>.
- [6] GAD-EL-HAK, Mohamed. *The MEMS handbook*. CRC Press, 2002. 1331 s. ISBN 0-8493-0077-0
- [7] *Removal of sacrificial material to leave mechanical structure* [on-line]. 2005 [cit. 2009-04-05]. Dostupný z: <<http://www.memstar.com/technology/release.asp>>.
- [8] *MEMS News Release : Micralyne Installs Volume High Aspect Ratio Etching System –Alcatel AMS 200 DRIE Silicon Etcher* [on-line]. 2008 [cit. 2009-03-05]. Dostupný z: <<http://www.micralyne.com/news/newsreleases/2004/alcatelDRIE.htm>>.
- [9] *Litografie* [on-line]. 2003 [cit. 2009-02-20]. Dostupný z: <<http://atmilab.upol.cz/vys/lit.html>>.
- [10] BANKS, Danny. *Introduction to microengineering : Photolithography* [on-line]. 1999 [cit. 2009-02-20]. Dostupný z: <<http://www.dbanks.demon.co.uk/ueng/plith.html>>.
- [11] *Very fast MEMS Gyro Simulations* [on-line]. 13.10.2008. [cit. 2009-03-10]. Dostupný z: <<http://coventor.com/memsahead/?p=19>>.
- [12] *Automatic generation of 3D solid models from 2D layouts assures repeatability, correctness, and manufacturability* [on-line]. [cit. 2009-03-25]. Dostupný z: <<http://coventor.com/mems/designer/2d3d.html>>.
- [13] *Analyzer : Analysis tool for MEMS development* [on-line]. 05/2005 [cit. 2009-03-25]. Dostupný z: <<http://coventor.com/pdfs/ANALYZER.pdf>>.
- [14] *MEMulator for MEMS and Semiconductor Processes* [on-line]. 2005 [cit. 2009-03-25]. Dostupný z: <<http://www.coventor.com/pdfs/MEMULATOR.pdf>>.
- [15] HE, Yie; MARCHETTI, James; MASEEH, Fariborz. *MEMS Computer-aided Design* [on-line]. [cit. 2009-03-26]. Dostupný z: <<http://www.intellisensesoftware.com/papers/MEMS%20Computer-aided%20Design.pdf>>.
- [16] BEEBY, Stephen. *MEMS Mechanical Sensors*. ARTECH HOUSE, INC, 2004. 282 s. ISBN 978-1-58053-873-2
- [17] *IntelliSuite — Industry Leading MEMS Software*. [on-line]. 2008 [cit. 2009-04-10]. Dostupný z: <<http://www.intellisensesoftware.com/intellisuite/Isuite-Overview.html>>.

- [18] *IntelliSuite v8.5* [on-line]. 2008 [cit. 2009-04-10]. Dostupný z: <http://www.intellisensesoftware.com/datasheets/IntelliSuite%208.5_good.pdf>
- [19] *MEMS Pro v6.0* [on-line]. 07/2007 [cit. 2009-03-28]. Dostupný z: <http://www.softmems.com/mems_pro.html>.
- [20] *MEMSolver – Product overview* [on-line]. 03/2009 [cit. 2009-03-26]. Dostupný z: <<http://www.memsolver.com/pages/overview.html>>.
- [21] *Řešení pro ověření návrhu* [on-line]. [cit. 2009-04-10]. Dostupný z: <<http://www.solidworks.cz/produkty/overeni-navrhu/>>.
- [22] *SolidWorks Simulation* [on-line]. [cit. 2009-04-10]. Dostupný z: <<http://www.solidworks.cz/produkty/overeni-navrhu/solidworks-simulation/>>.
- [23] *Solid Modeling and Analysis of MEMS Structures* [on-line]. 2001-2002 [cit. 2009-04-05]. Dostupný z: <http://www.electromagneticworks.com/pages/products/MEMS_Design_and_Analysis.pdf>.
- [24] FRÉMUND, L. Výpočtové systémy na bázi MKP určené pro konstruktéry, VUT-FSI., 2008, 36 s.
- [25] GONZÁLES, U.; MOUSSA, W. *Modeling and Simulating MEMS Devices Using Finite Element Analysis Structures* [on-line]. 2001 [cit. 2009-03-22]. Dostupný z: <http://www.algor.com/products/comp_advantage/FEMPRO/default.asp>.
- [26] MOUNIER, Eric. *Global MEMS market forecast 2007 - 2012*. [on-line]. 29.01.2008 [cit. 2009-05-02]. Dostupný z: <<http://www.i-micronews.com/interview.asp?id=25>>.

6 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

aj.	- a jiné
apod.	- a podobně
atd.	- a tak dále
CAD	- computer aided design
LIGA	- röntgentiefen lithographie, galvanofornung und abformung
MEMS	- mikroelektromechanický systém
MOEMS	- mikrooptickoelektromechanický systém
RF-MEMS	- radio frequency microelectromechanical system

7 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ	
Obr. 1-1 Nosník	14
Obr. 1-2 Membrána	14
Obr. 1-3 Hřebenová struktura	14
Obr. 1-4 Ozubená kola vyrobená technologií LIGA	15
Obr. 2-1 Struktury realizované objemovým mikroobráběním	16
Obr. 2-2 Postup výrobní technologie LIGA	17
Obr. 2-3 Postup fotolitografie	18
Obr. 2-4 Obrábění excimerovým laserem	19
Obr. 2-5 Blokové schéma vytvořené v modulu Architekt	20
Obr. 2-6 3D model MEMS vytvořený v modulu Designer	21
Obr. 2-7 Analýza MEMS v modulu Analyzer	21
Obr. 2-8 Model MEMS	22
Obr. 2-9 Prostředí a model MEMS vytvořený v programu IntelliCAD	23
Obr. 2-10 MEMS vytvořený programem IntelliSuite	24
Obr. 2-11 Nosník v simulačním modulu SolidWorksu	26
Obr. 4-1 Oblasti využití MEMS	28
Obr. 4-2 Předpokládaný vývoj trhu s MEMS	29

8 SEZNAM TABULEK

Tab. 2-1 Návrhové nástroje

20