

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ, PROJEKTOVÁNÍ A METROLOGIE



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Použití laseru pro výrobu MEMS komponent

MEMS parts manufacturing using a laser

AUTOR: Vojtěch Kudrna
STUDIJNÍ PROGRAM: Teoretický základ strojního inženýrství
VEDOUCÍ PRÁCE: Ing. Pavel Zeman, Ph.D.

PRAHA 2020

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Kudrna Jméno: Vojtěch Osobní číslo: 476056
Fakulta/ústav: Fakulta strojní
Zadávací katedra/ústav: Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie
Studijní program: Teoretický základ strojního inženýrství
Studijní obor: bez oboru

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Použití laseru pro výrobu MEMS komponent

Název bakalářské práce anglicky:

MEMS parts manufacturing using a laser

Pokyny pro vypracování:

1. Definice a popis MEMS a jejich komponent
2. Popis funkce laserů s ultrakrátkými pulsy
3. Návrh vlastního MEMS dílce vhodného pro výrobu laserem
4. Realizace dílce a analýza dosažených parametrů

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Pavel Zeman, Ph.D., ústav výrobních strojů a zařízení FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Ing. Pavel Kožmín, Ph.D., HOFMEISTER s. r. o.

Datum zadání bakalářské práce: 30.04.2020

Termín odevzdání bakalářské práce: 31.07.2020

Platnost zadání bakalářské práce: _____

Ing. Pavel Zeman, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

Ing. Libor Beránek, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací.
Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně, a to výhradně s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu citovaných zdrojů.

V Praze dne:

.....

Podpis

Anotace

Hlavním cílem této bakalářské práce je prakticky využít technologii ultrakrátkopulsních laserů pro mikroobrábění vybrané komponenty MEMS. Teoretická část práce je rozdělena do dvou hlavních kapitol. První kapitola teoretické části je věnována definování MEMS, jejich možné kategorizaci na základě elementárních principů, které jsou pro jejich funkci využívány a popisu vybraných výrobních technologií a materiálů používaných pro MEMS. Druhá kapitola teoretické části je věnována především UKP laserům, obecnému popisu laserového zařízení, principu vzniku laserového záření, generaci ultrakrátkých pulsů a interakcím mezi laserovým zářením a materiálem. Experimentální část práce je zaměřena na návrh komponenty MEMS, její výrobu a následnou kontrolu.

Klíčová slova

MEMS, mikroobrábění, laser, ultrakrátkopulsní laser

Annotation

The main goal of this bachelor thesis is to use ultrashort pulse laser technology for micromachining a chosen component of microelectromechanical system. The theoretical part of this thesis is divided into two main chapters. The first chapter is dedicated to the definition of MEMS, its possible categorization based on elementary principles used for its functions, and the description of chosen technologies and materials used for MEMS manufacturing. The second chapter of the theoretical part is mostly dedicated to the USP lasers, a general description of a laser device, the principal of the formation of a laser radiation, the generation of ultrashort pulses and the interactions between a laser light and a material. The Experimental part of this thesis is focused on designing a MEMS component, its manufacturing and its subsequent analysis.

Keywords

MEMS, micromachining, laser, ultrashort pulse laser

Poděkování

Rád bych zde poděkoval především svému vedoucímu Ing. Pavlovi Zemanovi, Ph.D. za odborné rady a trpělivost při vypracování této bakalářské práce a Ing. Tomášovi Primusovi za konzultace. Rád bych také poděkoval Ing. Pavlovi Kožmínovi, Ph.D. za to, že mi téma MEMS představil a dalším zástupcům firmy Hofmeister za odbornou supervizi při přípravě a praktickém provedení experimentu. Nakonec bych rád poděkoval také svojí rodině za psychickou i materiální podporu při studiu.

Tato práce vznikla s podporou projektu OPVVV: „Nové nanostruktury pro inženýrské aplikace umožněné kombinací moderních technologií a pokročilých simulací“, CZ.02.1.01/0.0/0.0/16_026/0008396.

Seznam zkratek

Zkratka	Český ekvivalent	Anglický ekvivalent
Ag	Stříbro	Silver
Al	Hliník	Aluminium
Au	Zlato	Gold
C ₄ F ₈	Octafluorocyklobutan	Octafluorocyclobutane
CD	Kompaktní disk	Compact disk
CPA	Zesílení pulsu	Chirped pulse amplification
Cr	Chrom	Chromium
Cu	Měď	Copper
DLC	Uhlíkové sloučeniny	Diamondlike carbon
DLP	Digitální zpracování světla	Digital Light Processing
DMD	Digitální mikrozrcadlové zařízení	Digital Micromirror Device
DRIE	Hluboké reaktivní iontové leptání	Deep Reactive Ion Etching
DVD	Digitální Víceúčelový Disk	Digital Versatile Disk
Ge	Germanium	Germanium
H ₂ O ₂	Peroxid vodíku	Hydrogen peroxide
HF	Kyselina fluorovodíková	Hydrofluoric acid
HMDS	Hexamethyldisilazan	Hexamethyldisilazane
HNO ₃	Kyselina dusičná	Nitric acid
ICP	Indukční zdroj plasmy	Inductively coupled plasma (source)
IC	Integrované obvody	Integrated circuits
KOH	Hydroxid draselný	Potassium hydroxide

LASER	Zesilování světla stimulovanou emisí zření	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
LiGA	Litografie, pokovení a odlití	Lithography, Electroplating and Molding
MEMS	Mikroelektromechanický systém	Microelectromechanical system
MOEMS	Mikrooptickoelektromechanický systém	Microoptical-electromechanical system
Nd	Neodym	Neodymium
Ni	Nikl	Nickel
O ₂	Kyslík	Oxygen
PDMS	Polydimethylsiloxan	Polydimethylsiloxane
PEB	Vypálení po ozařování	Post exposure bake
PMMA	Polymethylmethakrylát	Polymethylmethacrylate
Pt	Platina	Platinum
PVDF	Polyvinylidenfluorid	Polyvinylidene fluoride
RTG	Rentgenové (záření)	X-ray
SEM	Rastrovací elektronový mikroskop	Scanning electron microscope
SF ₆	Fluorid sírový	Sulfur hexafluoride
Si ₃ N ₄	Nitrid křemičitý	Silicon nitride
SiO ₂	Oxid křemičitý	Silicon oxide
Ta	Tantal	Tantalum
Ti	Titan	Titanium
UKP (USP)	Ultrakrátké pulsy	Ultrashort pulse
USP	Farmakologický institut spojených států	United States Pharmacopeia

VOA	Optický modulátor	Variable Optical Attenuator
W	Wolfram	Wolfram
Yb	Ytterbium	Ytterbium
Yb ³⁺ :YVO ₄	Yttriumvanadát dopovaný Yb ³⁺	Yb ³⁺ doped Yttrium vanadate
ZnO	Oxid zinečnatý	Zinc oxide

Seznam symbolů

Symbol	Význam
$C [F]$	Kapacita
$E [J]$	Energie
$E_p [J]$	Energie pulsu
$f [kHz]$	Frekvence
$F [J \cdot cm^{-2}]$	Intenzita laserového paprsku
$F_{th} [J \cdot cm^{-2}]$	Prahová hodnota F pro ablaci
$h [J \cdot s]$	Planckova konstanta
$H [\%]$	Překrytí šrafování
$P [W]$	Výkon
$Ra [\mu m]$	Střední aritmetická odchylka profilu
$Rq [\mu m]$	Průměrná kvadratická odchylka profilu
$Rz [\mu m]$	Výška nerovností
$S_p [\%]$	Překrytí šrafování
$Sa [\mu m]$	Aritmetický průměr výšky povrchu
$t [ps]$	Délka pulsu
$v_x [mm \cdot s^{-1}]$	Rychlost rozmítání
$\alpha [dm^3 \cdot mol^{-1} \cdot cm^{-1}]$	Absorpční koeficient
$\varepsilon [F \cdot m^{-1}]$	Permitivita
$\lambda [nm]$	Vlnová délka
$\nu [Hz]$	Frekvence fotonu

Seznam obrázků

Obr. 1 - Kapacitní senzor tlaku [5].....	16
Obr. 2 - Funkční celky komplexního mikrosystému [6]	17
Obr. 3 - Schéma akcelerometrů (vlevo kapacitní, vpravo piezofotorezistivní) [5]	18
Obr. 4 - Elektrostatický mikromotor [10].....	19
Obr. 5 - Matice mikrozrcadel DLP čipu	21
Obr. 6 - Funkční schéma naklápěcí struktury DLP čipu.....	21
Obr. 7 - SEM snímek systému VOA s „comb-drive“ uspořádáním [15].....	22
Obr. 8 - Tepelně řízený mikroaktuátor [5]	22
Obr. 9 – Mikromanipulátor [5].....	23
Obr. 10 - Kapacitní průtokoměr [5].....	24
Obr. 11 - Princip mikrotermálního měření průtoku [16].....	24
Obr. 12 - Elektrostaticky řízená mikropumpa [4]	25
Obr. 13 – Příklad konfigurace DRIE technologie [17].....	27
Obr. 14 – Cyklus metody Bosch [17]	28
Obr. 15 - Textura povrchu vertikálních stěn, scalloping [17]	29
Obr. 16 - Schéma výsledku leptání anizotropního a izotropního leptání [10].....	30
Obr. 17 - Schéma tvarů anizotropně leptaného profilu [10]	30
Obr. 18 - Jednotlivé kroky technologie LiGA (1 – Odlití PMMA na kov, 2 – RTG ozáření, 3 – vývoj PMMA, 4 – pokovení, 4 – odstranění zbytku PMMA) [10]	31
Obr. 19 – Schéma přechodů elektronů mezi energetickými hladinami (upraveno) [23].....	37
Obr. 20 - Schéma základní konstrukce laserového zařízení (upraveno) [22].....	38
Obr. 21 – Čtyř hladinový a tří hladinový systém [23].....	39
Obr. 22 - Módy rezonátoru, dostupné frekvenční spektrum, vystupní laserové spektrum [26].....	40
Obr. 23 - Vznik UKP interferencí stacionárních vln [29]	41
Obr. 24 - Časové průběhy optických pulsů a ztrát generovaných modulátorem [30].....	41
Obr. 25 - Časové průběhy optických pulsů a ztrát v saturačním absorbéru [31].	42
Obr. 26 – Závislost reflexe vybraných materiálů na vlnové délce a teplotě (pro λ = 1,06 μm) [40]	45

Obr. 27 - Srovnání obrobených povrchů nano- a femtosekundovým pulsním laserem [34].....	46
Obr. 28 - Matice ablovaných bodů	50
Obr. 29 - Graf lineární regrese bodů z naměřených a vypočtených dat.....	51
Obr. 30 - Konfokální mikroskop Olympus LEXT OLK 50037	52
Obr. 31 - Měření skutečných rozměrů polotovaru	53
Obr. 32 - Vnitřní prostor UKP laserového centra.....	54
Obr. 33 - Překryv pulsů S_p a H [56].....	55
Obr. 34 – Makrosnímek obrobeného kusu	56
Obrázek 35 - Detail obrobeného křemíkového substrátu.....	57
Obr. 35 - 3D snímek kuželové díry formující membránu z konfokálního mikroskopu.....	57
Obr. 36 – Provedení řezu 3D snímkem	58
Obr. 37 – Kuželová díra v řezu	58
Obr. 38 – Měření průměru a hloubky díry, resp. tloušťky membrány	59
Obr. 39 – Měření sklonu stěn	59
Obr. 40 - Měření kruhovitosti membrány.....	60
Obr. 41 – Graf změřených hodnot pro určení kruhovitosti.....	60
Obr. 42 - Lomená čára pro měření R_a	61
Obr. 43 - Měření plošné drsnosti.....	62

Seznam Tabulek

Tab. 1 - Naměřená a vypočtená data z měření ablačního prahu křemíku.....	51
Tab. 2 - Parametry laserového obrábění	55
Tab. 3 - Vyhodnocené parametry drsnosti profilu	61
Tab. 4 - Vyhodnocení sledovaných parametrů.....	63

Obsah

1	Úvod	15
2	MEMS dílce a jejich popis	16
2.1	Definice MEMS	16
2.2	Funkce MEMS, oblasti použití a vybrané aplikace.....	17
2.2.1	Mechanické systémy.....	17
2.2.2	Opticko-mechanické systémy	20
2.2.3	Termo-mechanické systémy.....	22
2.2.4	Mikrofluidní systémy	23
2.3	Technologie pro výrobu MEMS.....	25
2.3.1	Optická litografie	25
2.3.2	DRIE – Deep Reactive Ion Etching	27
2.3.3	Mokrý leptání	29
2.3.4	LIGA.....	30
2.4	Materiály pro výrobu MEMS.....	32
2.4.1	Polovodiče, dielektrika.....	32
2.4.2	Kovy.....	34
2.4.3	Polymery.....	35
3	UKP lasery	37
3.1	Princip a obecný popis laseru.....	37
3.2	UKP laser	40
3.2.1	Generování ultrakrátkých pulsů	40
3.2.2	Typy UKP laserů	43
3.3	Interakce paprsku s materiálem.....	44
4	Experiment.....	47
4.1	Návrh mechanické komponenty MEMS.....	47
4.2	Metodika měření ablačního prahu [51] [52]	49
4.2.1	Měření a vyhodnocení ablačního prahu křemíku	50
4.3	Test hloubky ablace.....	52
4.4	Experimentální výroba membrány.....	53
4.4.1	Polotovar	53
4.4.2	Vlastní proces laserového obrábění	53
4.5	Vyhodnocení přesnosti výroby membrány.....	56

4.5.1	Vyhodnocení přesnosti z hlediska tvaru a rozměrů	57
4.5.2	Vyhodnocení drsnosti povrchu	60
4.6	Shrnutí experimentální části	62
4.6.1	Diskuze k experimentu	63
5	Závěr.....	64
6	Bibliografie	65

1 Úvod

Miniaturizace je velmi aktuálním technickým trendem, který se projevuje v širokém spektru průmyslových oborů a především v oblasti elektroniky lze za počátek tohoto trendu označit Nobelovou cenou ohodnocený vynález tranzistoru. Právě díky tranzistorům se totiž začal vyvíjet koncept integrovaných obvodů, jež měl za následek nejen rapidní zmenšení dosavadních elektronických zařízení, ale také rozvoj dalších technických oblastí. Rešeršní část této práce se ze značné části věnuje problematice MEMS (MikroElektroMechanický Systém). Jedná se o relativně nové průmyslové odvětví, které do jisté míry navazuje na IC průmysl a jeho produkty, které kombinuje s miniaturizovanými mechanickými a dalšími subsystémy. Vzhledem k rychle se rozšiřujícímu poli možného uplatnění MEMS (od elektrotechniky přes aeronautiku po medicínské aplikace) se jedná o zajímavý segment průmyslu, který je na počátku svého vzestupu. [1]

Neoddělitelnou součástí problematiky MEMS jsou technologie mikrovýroby, z čehož plyne druhé zaměření rešeršní části této práce, kterým jsou ultrakrátkopulsní lasery. Díky fenoménu studené ablace, který je jedinečný pro obrábění UKP lasery, jejich použití přináší do světa MEMS nové možnosti zpracování materiálů s přesností vyhovující požadavkům výroby součástí MEMS.

Hlavními cíli této práce je nejdříve proniknout do mikrosystémové problematiky a seznámit se s laserovou technologií a následně navrhnout a realizovat experiment demonstrující použitelnost technologie UKP laserů pro výrobu určité MEMS komponenty.

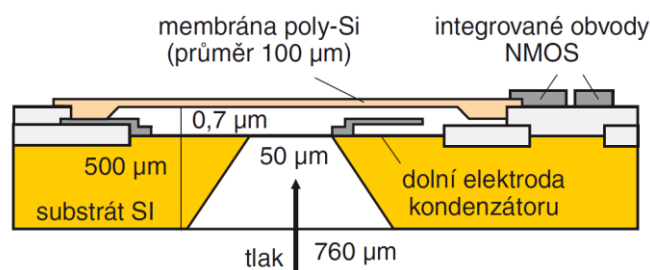
2 MEMS dílce a jejich popis

Konkrétních produktů mikrovýroby je nepřehledné množství a pro definici toho co MEMS jsou je třeba vytvořit soubor jejich společných znaků. I tak je pojem MEMS poměrně široký, a je proto dobré vytvořit také určité podskupiny podle toho v čem jsou naopak jednotlivé MEMS rozdílné. V následujících kapitolách budou MEMS definovány, bude navržena jejich možná kategorizace dle funkce a budou také uvedeny některé technologie a materiály pro jejich výrobu.

2.1 Definice MEMS

Mikrosystémy vznikly jako další krok navazující na revoluční technologie integrovaných elektrických obvodů a jsou vlastně kombinací jich samotných s nějakým dalším akčním členem. MEMS je akronym pro mikroelektromechanický systém. Podobně jako integrované obvody jsou i MEMS často řádově zmenšené verze existujících zařízení a vůči svým protějškům disponují mnoha výhodami. Hlavní výhodou je relativně nízká cena (v případě hromadné výroby) při zachování, ale často i zlepšení, fungování zařízení (např. přesnosti snímání fyzikální veličiny). [2] [3] [4]

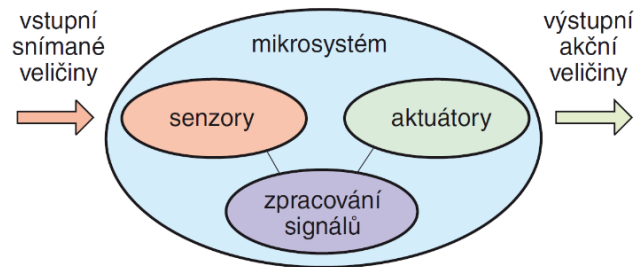
Mikrosystémy obecně pracují jako převodníky různých fyzikálních veličin na často elektrický signál a obráceně. MEMS k tomu využívají právě mechanických akčních členů. Jako příklad lze uvést membránu mikro snímače tlaku, jejíž průhyb je vyhodnocen jako změna kapacity kondenzátoru, který je tvořen jí a fixní druhou elektrodou (Obr. 1). [2] [3] [4]



Obr. 1- Kapacitní senzor tlaku [3]

Daný mikrosystém lze rozdělit na více funkčně samostatných celků, jež může, ale nemusí, obsahovat všechny (Obr. 2), a to: senzory, aktuátory a integrované

obvody, které zařizují zpracování ze senzorů vystupujících a do aktuátorů vstupujících elektrických signálů. [2] [3] [4]



Obr. 2 - Funkční celky komplexního mikrosystému [4]

Velikost jednotlivých komponent, ze kterých se daný mikrosystém skládá, se obvykle pohybuje v rozmezí jednotek mikrometrů až jednotek milimetrů. Pro jejich výrobu se s ohledem na funkci využívají různé materiály, mezi které patří například sloučeniny křemíku, ale i polymerní materiály a kovové slitiny. [5] [6]

2.2 Funkce MEMS, oblasti použití a vybrané aplikace

Mikrosystémy nebo jejich části lze rozdělit do více skupin podle funkce, resp. dle principů podle kterých interagují s okolím prostředím na:

- Mechanické systémy
- Opticko-mechanické systémy
- Termo-mechanické systémy
- Mikrofluidní systémy

Jednotlivé kategorie budou blíže popsány v následujících podkapitolách. [2] [4] [5]

2.2.1 Mechanické systémy

Čistě mechanické senzory jsou založeny na snímání polohy nebo pohybu určité části systému. K vytvoření informace, signálu, o dané skutečnosti využívají typicky jeden ze 3 principů, a to vztahu mezi kapacitou kondenzátoru a jeho geometrií nebo piezorezistivního či piezoelektrického jevu. [5]

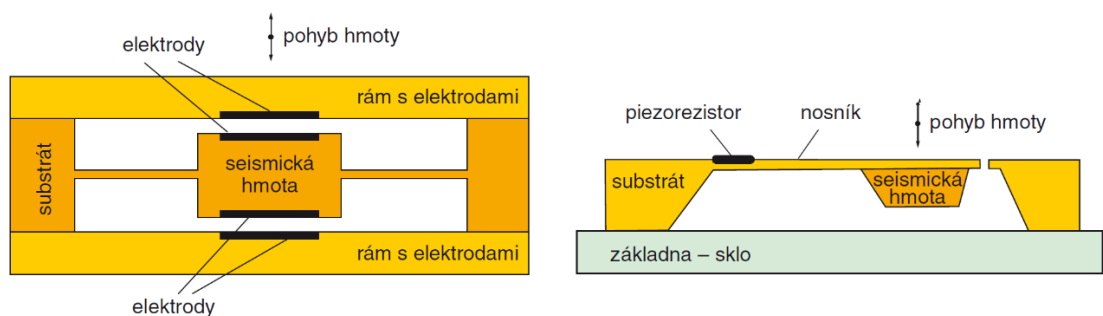
Nejčastěji používaný mechanismus využívá právě vztahu mezi kapacitou kondenzátoru a vzdáleností jeho elektrod. Výchozí vztah je popsán obecně známou rovnicí:

$$C = \varepsilon_0 * \varepsilon_r * A * d^{-1} [F] \quad (1)$$

kde C je kapacita kondenzátoru, ε_0 permitivita vakua, ε_r relativní permitivita dielektrika mezi elektrodami, A plocha elektrod a d měřená vzdálenost mezi elektrodami. Díky povaze vztahu, kapacita je nepřímo úměrná proměnné vzdálenosti elektrod, lze velmi dobře měřit „mikrovýchylky“ této vzdálenosti. [5]

Alternativním způsobem, jak měřit výchylku mechanického členu systému, je využití piezoelektrického nebo piezorezistivního jevu. Tyto jevy lze pozorovat při deformaci určitých materiálů. Piezoelektrické materiály jsou krystalické materiály, u nichž se při deformaci generuje měřitelný elektrický náboj na jejich povrchu vlivem přesunu iontů v krystalické mřížce. Mezi piezoelektrické materiály patří například pro MEMS používaný polyvinylidenfluorid (PVDF) nebo oxid zinečnatý (ZnO). Piezorezistivní materiály jsou krystalické materiály, které při deformování výrazně mění svůj elektrický odpor. Využitelné piezorezistivní materiály jsou například polovodiče jako je křemík. [5]

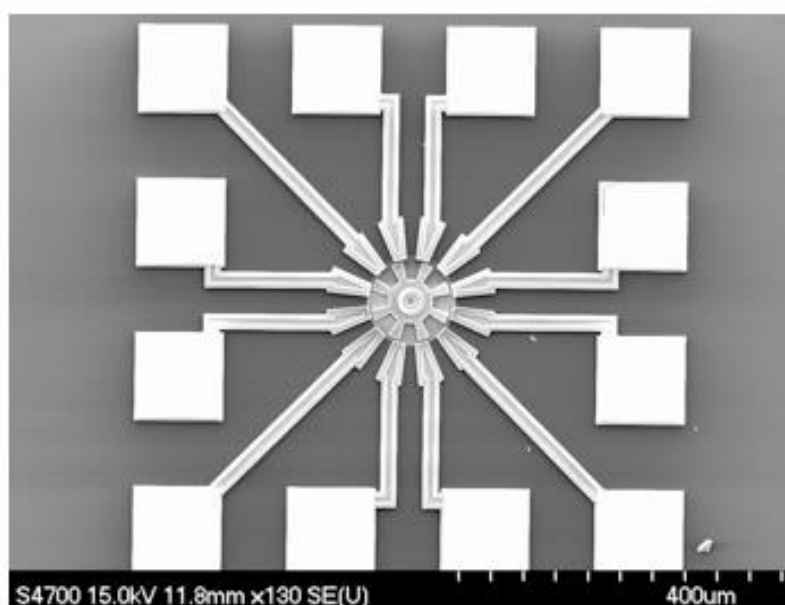
Pro úspěch a velké rozšíření v automobilovém průmyslu jsou dobrým příkladem použití senzorů využívající popsané mechanismy mikroakcelerometry. Akcelerometry se skládají ze tří základních částí (viz Obr. 3): rámu, seismické hmoty a pružných nosníků, který je spojuje. Zrychlený pohyb měřeného objektu generuje setrvačné síly zapříčiňující pohyb seismické hmoty umožněný průhybem pružných mikronosníků, který je vyhodnocen vybraným způsobem. [3]



Obr. 3 - Schéma akcelerometrů (vlevo kapacitní, vpravo piezofotorezistivní) [3]

Dalším komerčně úspěšným zařízením jsou senzory tlaku. Typické uspořádání senzoru je na Obr. 1. Tlak působí na pružnou membránu, jejíž průhyb je obvykle vyhodnocen pomocí změny kapacity kondenzátoru. Na zařízení se umísťuje ještě alespoň jeden referenční kondenzátor pro kompenzaci okolních vlivů, jako je teplota. [5] [3]

Tak jako mechanické senzory převádějí pohyb mechanické komponenty systému na elektrický signál, mechanické aktuátory převádějí elektrickou formu energie na mechanickou. Coulombův zákon hovořící o velikosti síly mezi nabitými částicemi je stěžejním principem těchto mikroaktuátorů. V MEMS síla působí mezi dvěma nabitými plochami, které se chovají jako kondenzátor. Síla mezi nimi je závislá na velikosti akumulované energie úměrné připojenému napětí a velikosti daných ploch. Aby síla mohla být dostatečně velká, je pro lineární posuvy často použita hřebenová konstrukce („comb-drive“) (viz Obr. 7) disponující mnoha jednotlivými dvojicemi ploch. Takové uspořádání zařizuje dobré rozložení síly mezi jednotlivá žebra a zároveň dostatečnou celkovou sílu pro posun pohyblivé komponenty. [5] [3]



Obr. 4 - Elektrostatický mikromotor [7]

Zajímavým příkladem elektrostatického mikroaktuátoru jsou rotační elektrostatické motory (ukázka na Obr. 4). Oproti elektromagnetickým mikromotorům mohou mít podstatně menší rozměry díky jednoduché konstrukci. Průměr rotoru elektrostatického motoru může být přibližně 100 μm .

Rozměry elektromagnetického motoru jsou limitovány relativně složitou strukturou zařízení, která obsahuje vinutí a další prvky, a proto je průměr rotoru obtížné zmenšit pod hranici milimetru. [8] [5] [3]

Hřebenové a rotační mikroaktuátory, popřípadě jejich kombinace, realizují různé aplikace, mezi něž mohou patřit např.: mikromanipulátory, velmi přesné krokové motory pro pozicování a mnoho dalších.

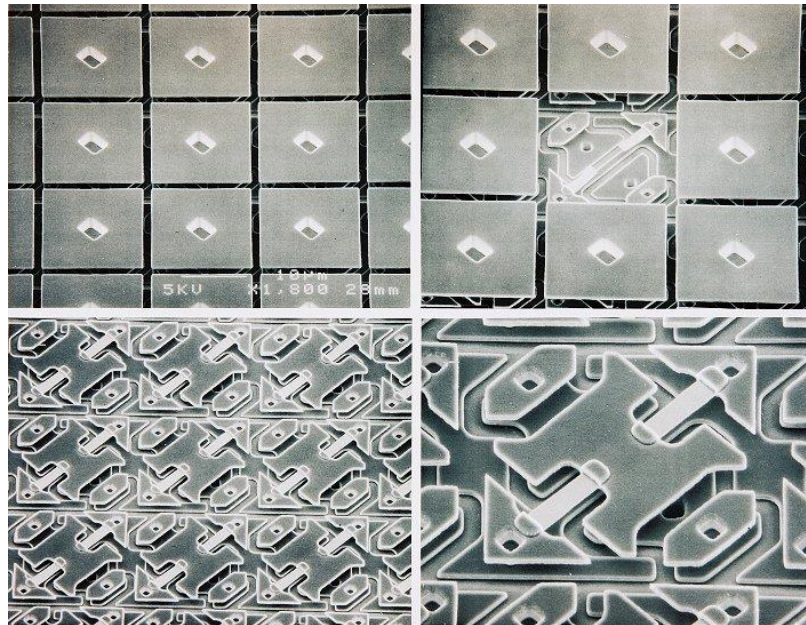
Pro mechanické aktuátory se využívá i piezoelektrického jevu. Jak bylo naznačeno, piezoelektrické materiály se při připojení napětí deformují. Oproti elektrostatickým vyvíjejí piezoelektrické aktuátory velké silové účinky (při srovnatelném napájecím napětí), avšak deformace jsou relativně malé. Velkých deformací, posuvů, lze ale dosáhnout skládáním více vrstev piezoelektrického materiálu na sebe.

2.2.2 Opticko-mechanické systémy

Pokud jsou v mikrosystému implementovány optické prvky, nebo mikrosystém jinak pracuje s optickým zářením, hovoří se o takzvaných MOEMS strukturách. MOEMS je akronym pro „mikrooptickoelektromechanický systém“. Implementovanými optickými prvky jsou zejména mikrozrcadla, mikročočky, mikroclony a další. Struktury MOEMS se běžně využívají v zařízeních jako jsou čtečky čárových kódů, snímací hlavy optických mechanik CD/DVD a další. [9] [4]

Senzory záření (viditelného, infračerveného i ultrafialového) lze rozdělit na tzv. přímé a nepřímé. Přímé optické senzory převádějí detekované záření na elektrický signál. Nepřímé optické senzory převádějí energii snímaného záření na jinou formu energie, například tepelnou, která je až v dalším kroku převedena na elektrický signál. Často používanými optickými senzory jsou fotodiody, které pro vytvoření elektrického signálu využívají fotoelektrického jevu, prudkého zvýšení vodivosti polovodičové součástky při ozáření. [5]

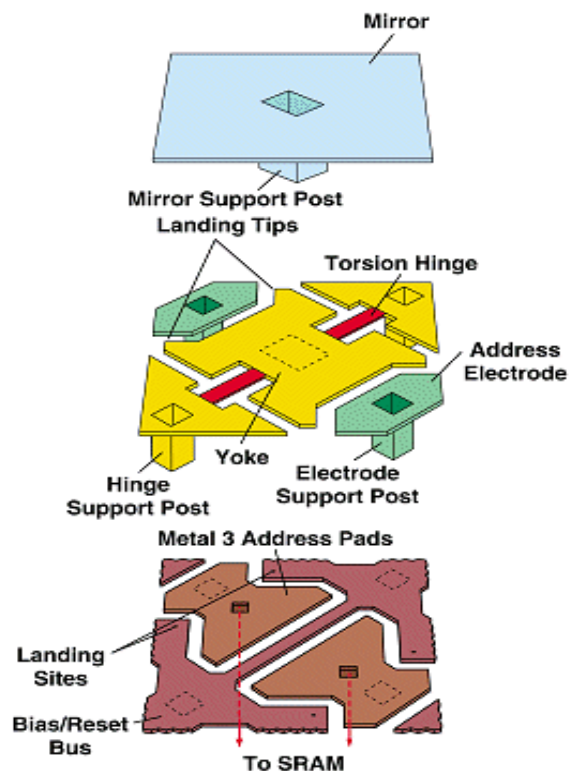
MOEMS aktuátory jsou v podstatě přepínače a modulátory optických paprsků. K plnění své funkce využívají natáčení a posunování mikrozrcadel a mikroclon vybraným způsobem (viz mechanické aktuátory).



Obr. 5 - Matice mikrozrcadel DLP čipu [10]

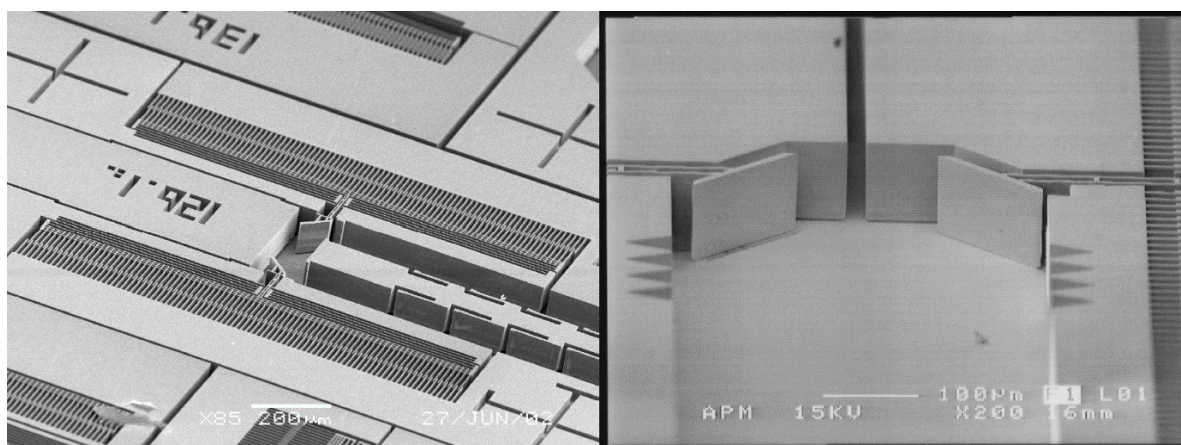
Použití nacházejí takové aktuátory například v obrazových projektorech. Světlo ze zdroje v projektoru je přivedeno na matici až několika milionů mikrozrcadel (Obr. 5), která jsou individuálně umístěna na strukturách zřizujících jejich natočení do různých poloh. Světlo je tak jednotlivými zrcadly odraženo buď dál do čočky projektoru (poloha „ON“) nebo pryč z optické cesty (poloha „OFF“).

Výsledná intenzita jednotlivých pixelů obrazu je určena rychlostí přepínání mezi polohami ON/OFF jednotlivých zrcadel. Pro projekci barevného obrazu je pak nutné použít tři matice zrcadel, pro každou ze tří základních barev (červenou, zelenou, modrou) jednu. Obraz je následně složen dál v optické cestě. Funkční schéma naklápěcích struktur je vidět na Obr. 6. Více informací o fungování DMD technologie je k dispozici na stránkách Texas Instruments. [11] [10]



Obr. 6 - Funkční schéma naklápěcí struktury DLP čipu [10]

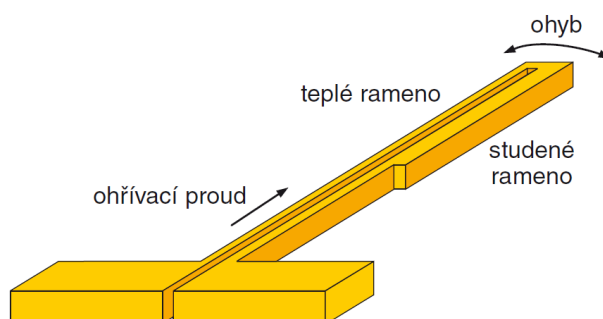
MOEMS aktuátory nacházejí také využití například v datových přenosech optickými vlákny. Modulaci optického signálu lze realizovat pomocí VOA (Variable Optical Attenuator), mechanismu se spojitě posuvnou mikroclonou mezi dvěma optickými vlákny. Častěji se však místo clony používá k vedení signálu jednoho nebo více mikrozrcadel. Na Obr. 7 jsou vidět dvě cesty pro optická vlákna a dvojice mikrozrcadel na hřebenových elektrostatických polohovačích. [9] [12]



Obr. 7 - SEM snímek systému VOA s „comb-drive“ uspořádáním [13]

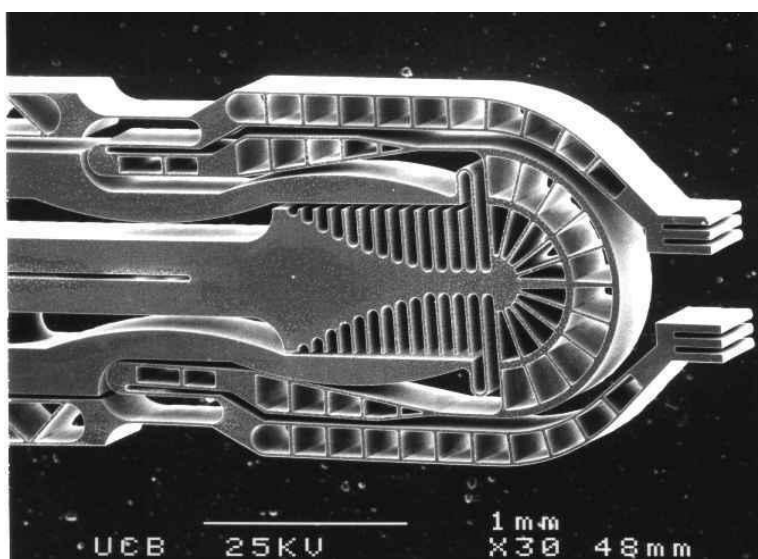
2.2.3 Termo-mechanické systémy

MEMS senzory a aktuátory využívají i teplotně závislých jevů, mezi které patří teplotní roztažnost materiálů, teplotně závislá rezistivita materiálů a termoelektrický jev. Teplotně řízené mechanické systémy stejně jako běžný bimetalový teploměr fungují díky rozdílným teplotním roztažnostem dvou na sebe nanesených vrstev. Při změně teploty se každá z vrstev prodlouží nebo zkrátí o jiný kus délky, což se projeví jako mechanický pohyb.



Obr. 8 - Tepelně řízený mikroaktuátor [3]

Druhou možností, jak mechanický pohyb uskutečnit, je ohřátí jednotlivých částí struktury na různé teploty. To lze zajistit např. pomocí materiálově homogenních konstrukcí složených z nosníků různých průřezů. Jednotlivé nosníky mají rozdílný odpor a při průchodu elektrického proudu se tak ohřívají na různé teploty a prodlužují o různé délky. Schéma jednoduchého teplotního mikroaktuátoru je na Obr. 8 - Tepelně řízený mikroaktuátor . Obdobných principů se využívá například u mikromanipulátorů („mikropinzet“), struktury jsou ale značně složitější (viz Obr. 9). Mikromanipulátory se používají například k práci s drobnými komponentami při montáži mikrosystémů. [3] [5]



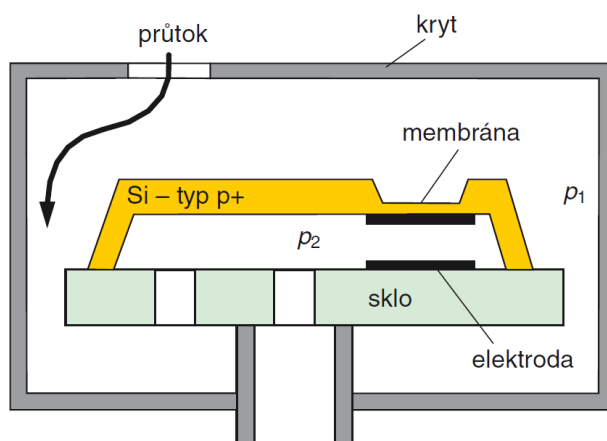
Obr. 9 – Mikromanipulátor [3]

2.2.4 Mikrofluidní systémy

Práce s tekutinami na mikroúrovni v chemické analýze, manipulaci s léčivými, nebo biologickými aplikacemi je pro MEMS rozrůstajícím se polem potenciálního použití. Mikrofluidní systémy mohou obsahovat pístky, mikropumpy, jehly a další. Jejich nedílnou součástí jsou i kanálky pro vedení tekutiny, které je třeba navrhovat, stejně jako zbytek systému, s ohledem na kapilární jevy, předpokládaný typ proudění apod.

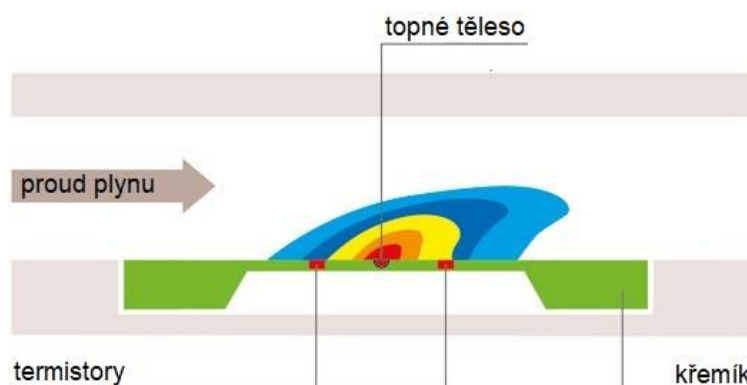
Pro měření průtoku tekutiny se používají dva druhy průtokoměrů. První průtokoměr, který je mechanický, měří sílu, resp. tlak, kterou proudící tekutina vyvíjí na vybranou komponentu. Tu lze měřit obdobně jako při měření zrychlení (viz 2.2.1), tedy převedením deformace akčního členu systému na elektrický

signál (změna kapacity, piezoelektrický jev). Schématické zobrazení kapacitního průtokoměru je vidět na Obr. 10. [5] [3]



Obr. 10 - Kapacitní průtokoměr [3]

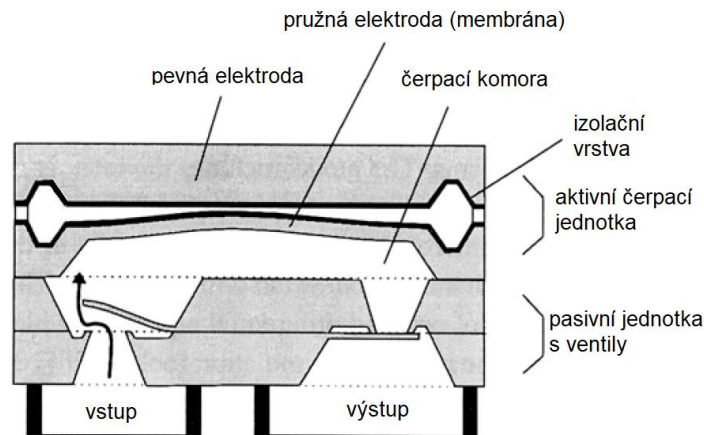
Častěji se používají teplotní průtokoměry. V nich je umístěno topné těleso (odpor) mezi dva snímače teploty (termistory), jak je znázorněno na Obr. 11. Dle difference teplot na termistorech lze následně vyhodnotit rychlost proudění tekutiny. [5] [14]



Obr. 11 - Princip mikrotermálního měření průtoku (upraveno) [14]

Konstrukčně komplikovanějším zařízením mikrofluidních systémů jsou jejich pohony, mikropumpy. V případě elektrostatické pumpy na Obr. 12 se do čerpací komory nasává tekutina přes jednocestný ventil pomocí aktuátoru v podobě tenké membrány, jejíž průhyb je iniciován napětím mezi membránou a tuhou elektrodou. Po odlehčení je tekutina vytlačena skrze druhý konstrukčně stejný, ale obrácený, ventil. Díky velikosti celé pumpy a definovanému množství přečerpané tekutiny za jeden cyklus lze velmi dobře odměřit přesné množství přečerpané tekutiny. Jedním z dalších možných řešení mikropump jsou pumpy

rotační, v kterých se pohyb tekutiny uskutečňuje pomocí otáčejícího se ozubeného kola, nebo více kol, jsou však oproti elektrostatickým značně náročné na výrobu (nutná montáž) a jsou poruchové. [2] [5] [3]



Obr. 12 - Elektrostaticky řízená mikropumpa (upraveno) [2]

2.3 Technologie pro výrobu MEMS

Pro výrobu MEMS se uplatňují zejména modifikované metody pro výrobu integrovaných elektrických obvodů. Tedy různé postupy leptání a nanášení vrstev materiálu na základní substrát, nejčastěji křemíkovou destičku, tzv. wafer. Technologické postupy uplatňované pro výrobu MEMS lze rozdělit na objemové a povrchové mikroobrábění. Označení objemové mikroobrábění odkazuje na vytváření žádaných struktur z objemu základního materiálu technologickými postupy především anizotropního či izotropního leptání. Povrchové mikroobrábění naopak vytváří struktury na základním materiálu, a to nanášením a leptáním tenkých funkčních a takzvaných „obětovaných“ vrstev. Vybrané technologie významné pro výrobu MEMS popsané v následujících podkapitolách jsou [5] [2] [15]:

- Optická litografie
- Mokré leptání
- Deep Reactive Ion Etching
- LIGA

2.3.1 Optická litografie

Optická litografie je proces přenášení kopie určitého vzoru, ve formě takzvané masky, na povrch substrátu. Celý proces je komplexní a má mnoho

parametrů specifických pro použité materiály, požadavky na výsledné struktury apod. Rámcově se technologie optické litografie skládá z následujících stručně popsaných kroků. [15]

Prvním krokem, důležitým pro zajištění definovaných počátečních podmínek celého procesu, je čištění a následné sušení substrátu. Jelikož čisticí látky jsou povětšinou vodné roztoky, je sušení klíčovým krokem pro dobré přilnutí hydrofobní fotosenzitivní vrstvy. Aby nedošlo k opětovnému zvlhnutí, nanáší se často po sušení na povrch základního materiálu ještě silikonový povlak HMDS (hexamethyldisilazane), který odpuzuje vlhkost. [15]

Na připravený substrát se v druhém technologickém kroku nanáší vrstva na určitý druh záření chemicky citlivého materiálu, takzvaného fotorezistu. Hojně používaným způsobem nanesení fotorezistu je rotační povlakování. Substrát se nechá rotovat ve speciálním zařízení („spin coater“) a fotosenzitivní povlak je na něm rozprostřen díky působení odstředivé síly. Rotačního povlakování se využívá kvůli výborným dosahovaným hodnotám jednotnosti tloušťky vrstvy (0,1 až 5 % v závislosti na tloušťce vrstvy). Pro nanesení fotorezistu na členitý povrch (např. po předchozím leptání) lze použít nástřikového povlakování, které na topograficky složitých površích dosahuje lepších kvalitativních parametrů než rotační povlakování. Dalšími způsoby pro nanesení fotorezistu jsou: laminace suchých filmů, lití do speciálních forem uchycených na substrátu, elektrolytické povlakování. Po nanesení kapalného fotorezistu je nutné jej, zvláště v případě silných vrstev, které se pro MEMS používají, vysušit. Nedokonalé vysušení by mohlo při chemické reakci po ozáření způsobit vznik bublin, které by výrobek znehodnotili. [15]

Třetím krokem optické litografie je proces, kdy se pomocí ozáření iniciuje chemická reakce fotoaktivní složky naneseného fotorezistu. Na připravenou destičku se pomocí pozičních značek umístí maska, která dle vzoru blokuje nebo propouští světlo jdoucí od zdroje k fotorezistu. Zarovnání na poziční značky je obzvláště důležité při ozařování již obroběných struktur, aby nedošlo k dislokaci nových prvků. [15]

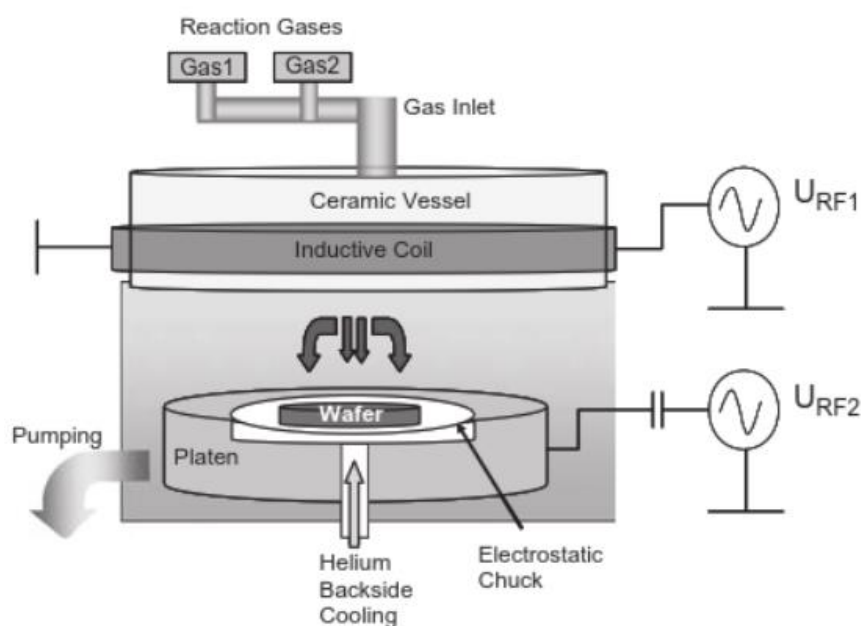
Po ozáření destička podstupuje proces vypálení – PEB (post exposure bake), při kterém dochází k dokončení chemické reakce. Funkčně se fotorezisty

dělí na dva typy: pozitivní a negativní. Pozitivní fotorezisty získávají chemickou reakcí větší odolnost vůči rozpuštění, negativní fotorezisty tuto vlastnost naopak na ozářených místech ztrácejí. [15]

Posledním krokem je takzvaný vývoj, rozpuštění „nevytvrzené“ části fotorezistu, a následné vysušení. Vývoj probíhá v lázni rozpouštědla, které se pro rychlejší průběh míchá ať už mechanicky nebo ultrazvukem. Sušení je důležité pro posílení chemické stálosti fotorezistu (např. odolnosti vůči leptání) a pro zlepšení adheze k substrátu, jejichž rozhraní bylo napadeno rozpouštědly při vývoji struktur. [15]

Optická litografie umožňuje vytváření struktur výšky 1 μm až 1 mm s rozlišením až 1 mikrometru. Dosažitelné parametry vytvořených struktur se odvíjí od použitého fotorezistu, použitého záření i optimalizace procesu. [15]

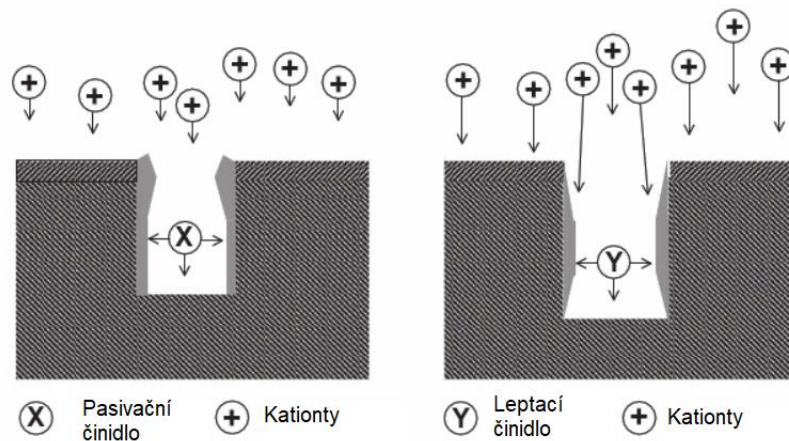
2.3.2 DRIE – Deep Reactive Ion Etching



Obr. 13 – Příklad konfigurace DRIE technologie (shora: přívod plynů, ICP zdroj v keramickém těle, elektrostatický upínač, přívod helia) [15]

DRIE, pokročilá technologie suchého leptání nebo také plazmového leptání, je proces kombinující chemické a fyzikální prostředky pro odebrání materiálu z povrchu křemíkového substrátu. Základem této technologie jsou chemické reakce leptání mezi aktivním plynem a obráběným materiálem, které jsou podporovány ostřelováním materiálu ionty. Typická konfigurace DRIE

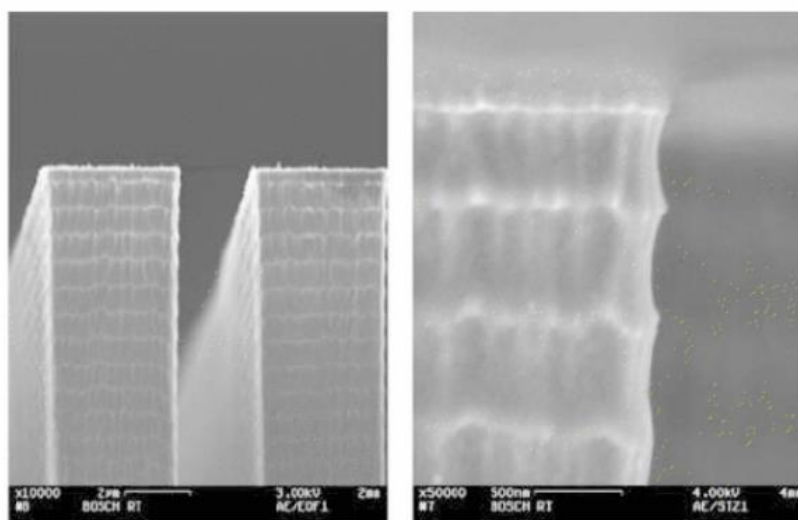
technologie je vidět na Obr. 13. Do komory jsou vháněny plyny do oblasti, kde dochází k jejich ionizaci v plazmatu vyvíjeném ICP (inductively coupled plasma) zdrojem (U_{RF1}). Ionty, nabité částice, jsou pak směrovány a urychlovány napětím sekundárního zdroje (U_{RF2}) kolmo na podstavec s obráběnou destičkou. Existuje více technik DRIE, z nichž hlavním zástupcem je patentovaná metoda Bosch a takzvaná kryo-metoda. Obě tyto metody využívají jako leptadla pouze plyny na bázi fluoru, jelikož při obrábění křemíku se s jejich použitím dosahuje nejvyšších rychlostí leptání a zároveň nejlepší selektivity leptání mezi obráběným materiálem a materiálem masky. Výskyt radikálů fluoru, vysoce reaktivních částic s nepárovými elektrony, způsobuje přirozeně izotropní leptání materiálu. Proto je nutné při použití leptadel na fluorové bázi učinit opatření pro zajištění anizotropie procesu. Řešením je pasivace stěn, kde není leptání žádané. [15]



Obr. 14 – Cyklus metody Bosch (upraveno) [15]

Metoda Bosch je založena na oddělení a cyklickém střídání do procesu vháněných plynů. Během pasivační části cyklu je kondenzací polymerních řetězců z excitovaného plynu C_4F_8 deponován tenký povlak na stěny leptaných struktur. Ostřelování ionty způsobuje narušení povlaku na plochách, které jsou kolmé k jejich trajektoriím, tedy na dně vznikajícího zahloubení. V následující části cyklu je materiál leptán radikály fluoru uvolněnými z plynu SF_6 ionizací v plazmatu. Cyklický proces (Obr. 14) odebrání a depozice materiálu má za následek typickou texturu povrchu vertikálních stěn obráběných struktur, takzvaný scalloping (viz Obr. 15), který lze minimalizovat zvyšováním frekvence cyklů. [15]

Druhá často používaná metoda využívá asi 10 nm tenkého povlaku oxyfluoridů (jako pasivační vrstvy), který vzniká při kryogenickém leptání v SF₆/O₂ plazmatu. Obráběný substrát je elektrostatically nebo mechanicky přichycen k podstavci, který je chlazen tekutým dusíkem na kryogenické teploty. Pro dobrý přenos tepla je na spodní stranu substrátu přiváděné médium velké tepelné vodivosti pod tlakem, helium. Radikály fluoru uvolněné z SF₆ plynu mají velmi malý adsorbční koeficient ve vztahu k pasivační vrstvě a díky tomu i malou pravděpodobnost reakce. Díky tomu, že povlak je, kvůli své malé tloušťce, na horizontálních plochách snadno narušitelný ostřelováním ionty, je zajištěna dobrá anizotropie procesu. Pro vertikální profil stěn je důležitý poměr koncentrací SF₆ a O₂. SF₆ poskytuje radikály fluoru pro leptání a O₂ zajišťuje tvoření pasivační vrstvy. Nevhodný poměr koncentrací vede ke svažování stěn vznikajícího zahloubení. Optimalizovaný proces vyniká hladkým povrchem vertikálních stěn, avšak nedosahuje takové rychlosti odebrání materiálu jako Bosch. [15]

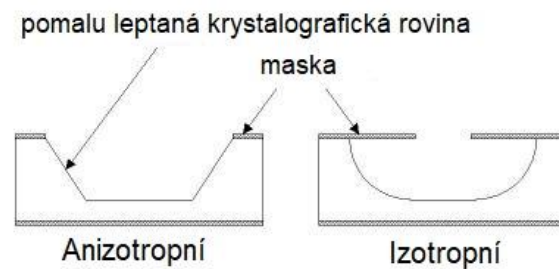


Obr. 15 - Textura povrchu vertikálních stěn, scalloping [15]

2.3.3 Mokrý leptání

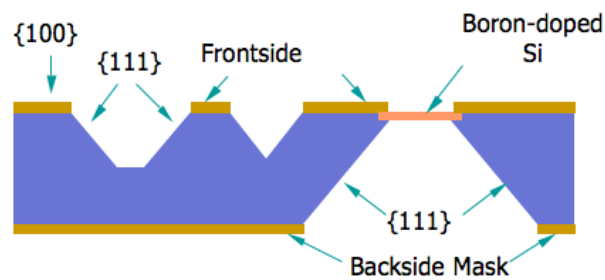
Rozšířenou metodou mikroobrábění je mokré leptání, při kterém je obráběný kus vystaven chemickému roztoku, tzv. leptadlu, který rozpouští substrát na místech, která nejsou chráněna krycí vrstvou, přičemž finální vzor je vytvořen předem pomocí litografie. Technologie je dále rozdělena na dvě základní skupiny dle izotropie leptacího procesu. [7] [15]

V případě izotropního leptání se používají roztoky, které leptají základní materiál na nekrytých místech všemi směry podobnou rychlostí. Vznikají tak pro izotropní leptání typické dutiny pod krycí vrstvou (Obr. 16 - Schéma výsledku leptání anizotropního a izotropního leptání (upraveno)), toto „podřezání“ má za následek zhoršení rozlišení vytvářených struktur, a proto se pro výrobu MEMS využívá převážně leptání anizotropického. [7] [15]



Obr. 16 - Schéma výsledku leptání anizotropního a izotropního leptání (upraveno) [7]

V průběhu anizotropické reakce je rychlost úběru materiálu závislá na krystalografické orientaci substrátu. Rozdílné rychlosti v různých směrech jsou způsobeny rozdílnou silou nebo počtem vazeb mezi atomy v mřížce. V případě křemíkového substrátu leptaného anizotropním leptačem (roztokem KOH) tak například bude rychlost ve směru $\langle 111 \rangle$ značně menší než ve zbývajících směrech (až v poměru 1:1000) (viz. Obr. 17). [7] [15]



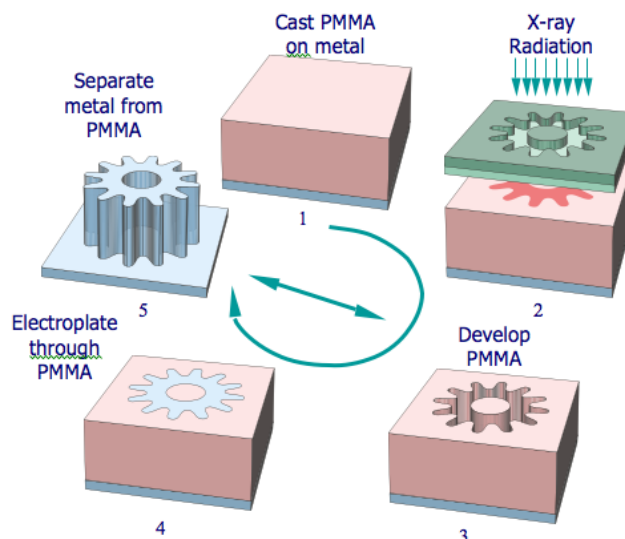
Obr. 17 - Schéma tvarů anizotropně lepaného profilu [7]

2.3.4 LIGA

LIGA je technologický proces používaný pro výrobu mikrostruktur pomocí rentgenové litografie, galvanického pokovování s možností replikace vybranými metodami (LIGA z německého Lithographie, Galvanik und Abformung). Hlavní

benefit této technologie je možnost výroby mikrokomponent s velkým poměrem výška/šířka. [16] [7]

Proces začíná výrobou vhodné masky pro RTG litografii. Na křemíkovou destičku se deponuje tenká titanová vrstva, na kterou se obdobnou technologií jako je optická litografie (viz 2.3.1) vytvoří požadovaná struktura ve vrstvě PMMA rezistu tloušťky asi 3,5 μm . Tím vznikne jakási „forma“. Následuje depozice vrstvy zlata na titanový základ a rozpuštění zbylého PMMA rezistu. Používá se kombinace titan-zlato, jelikož titanová vrstva je pro RTG záření průsvitná a zlato má pro RTG záření naopak velký absorpční koeficient. Masku se přilepí k rámu z invarové oceli a křemíkový substrát je odstraněn. Tato maska slouží pro výrobu svojí identické, ale odolnější, kopie vytvořenou již RTG litografií. Proces výroby je obdobný. Na ocelovou destičku se nanese titanová vrstva, asi 60 μm vrstva PMMA, vytvoří se struktura použitím primární masky a ozáření RTG. Následuje depozice zlaté vrstvy tloušťky několika desítek mikronů a zbytek PMMA je ozářen RTG (bez primární masky), aby mohl být jednoduše rozpuštěn stejným roztokem. Posledním krokem výroby masky vhodné pro RTG litografii je leptání zadní strany ocelového základu, aby se odhalila titanová membrána. [16] [7]



Obr. 18 - Jednotlivé kroky technologie LiGA (1 – Odlití PMMA na kov, 2 – RTG ozáření, 3 – vývoj PMMA, 4 – pokovení, 5 – odstranění zbytku PMMA) [7]

Samotný proces RTG litografie je obecně popsán v kapitole 2.3.1. Jako rezistu se používá PMMA vrstvy „libovolné“ tloušťky (100 μm až 3 mm).

Následuje galvanické pokovení RTG litografií odhalených ploch definovaných PMMA vrstvou. Takto lze zhotovit mikrostruktury z libovolných kovů, mají-li předpoklady pro elektrolytické pokovení. Zbývající rezist je ozářen RTG a rozpuštěn. Z leštěného povrchu substrátu lze vzniklé struktury oddělit malou mechanickou silou, případně se mezi substrát a PMMA deponuje přídatná vrstva např. titanu, který může být selektivně odleptán. [16] [7]

Pokovením několik milimetrů nad výšku PMMA vrstvy, oddělením struktury od substrátu a odstranění zbylého rezistu vede k vytvoření formy použitelné pro hromadnou výrobu komponent vstřikováním nebo vytlačováním plastů. [16] [7]

2.4 Materiály pro výrobu MEMS

Materiály využívané pro výrobu MEMS lze rozdělit na následující skupiny:

- Polovodiče, dielektrika
- Kovy
- Polymerní materiály

Jednotlivé skupiny budou stručně popsány v následujících podkapitolách.

2.4.1 Polovodiče, dielektrika

Vzhledem k tomu že MEMS jsou jistým způsobem pokračováním technologií integrovaných elektrických obvodů, je podobnost v používaných základních materiálech a technologiích zpracování zřejmá. Při výrobě MEMS proto majoritní skupinu používaných materiálů tvoří polovodiče a dielektrika, nejčastěji sloučeniny křemíku. [6]

Monokrystalický křemík je v oblasti MEMS rozšířeným strukturním materiálem díky spojení dobrých mechanických vlastností (např. Youngův modul křemíku dosahuje hodnot okolo 190 GPa) a rozvinutých technologií jeho zpracování. Používá se proto často pro konstrukci mechanických akčních členů, jako jsou membrány apod. [17]

Polykrystalický křemík nachází použití, stejně jako monokrystalický křemík, jako strukturní materiál. Polykrystalický křemík se používá převážně jako strukturní materiál pro povrchové obrábění v kombinaci s SiO_2 jako obětní

vrstvou. Během depozice vrstev polykrystalického křemíku je lze navíc relativně snadno obohatit o atomy jiných prvků, často bóru nebo fosforu, pro alteraci elektrické vodivosti vrstvy. Mechanické i fyzikální vlastnosti jsou úzce spojeny s velikostí zrn, obecně jsou ale nižší v porovnání s monokrystalickou strukturou. [17]

SiO_2 – oxid křemičitý je pro své vlastnosti a kompatibilitou s Si atraktivním materiálem v MEMS. S rezistivitou 10^{14} až 10^{15} $\Omega\cdot\text{cm}$, dielektrickou pevností $5\cdot 10^6$ $\text{V}\cdot\text{cm}^{-1}$ a relativní permitivitou 3,9 je oxid křemíku dobrým izolantem, a často se tak používá v elektrostatických mikrosenzorech a aktuátorech. Použití nachází také jako maskovací materiál při leptání. [6] [17]

Si_3N_4 – nitrid křemičitý je v produkci MEMS využíván podobně jako SiO_2 . Vrstvy nitridu křemíku plní funkci elektrické izolace, povrchové pasivace, maskování pro leptací procesy a používají se i jako strukturní vrstvy mechanických členů. [17] [6]

Germanium (Ge), je pro svou kompatibilitu s křemíkovými substráty a relativně nízkou procesní teplotou využívanou alternativou k polykrystalickému křemíku. Nabízí podobné mechanické vlastnosti (Youngův modul germania dosahuje hodnot okolo 130 GPa a mez pevnosti hodnot 1,5 - 3 GPa). Germanium nereaguje s rozpouštědly křemíku a naopak. Lze proto kombinaci těchto dvou materiálů efektivně využít při konstrukci různých struktur. [17] [6]

Slitina SiGe kombinuje vlastnosti obou prvků. Slitina se jako polykrystalický křemík dobře obohacuje o aditivní prvky v průběhu depozice, která díky složce germania může probíhat za nižších teplot. Výhodnou kombinaci materiálů pro povrchové obrábění tvoří díky dobrým vlastnostem SiGe a méně náročným procesním podmínkám dvojice vrstev SiGe a Ge. Polykrystalické Ge je navíc dobře rozpustné v H_2O_2 ($0,4 \mu\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$), jenž je oproti leptadlům křemíku (HF, HNO_3 , KOH atd.) relativně bezpečnou chemikálií, se kterou slitina SiGe nereaguje. [17] [6]

Materiály na bázi uhlíku, tzv. DLC (diamondlike carbon), jsou velmi odolné mechanickému opotřebení díky své tvrdosti. Pro MEMS se proto používají obvykle jako ochranné povlaky mechanických akčních členů namáhaných otěrem apod.

Pro aplikace v chemicky nebo tepelně náročném prostředí lze využít také materiálu SiC, karbidu křemíku, který vyniká svou chemickou i teplotní odolností. [6]

2.4.2 Kovy

Kovových materiálů se v MEMS používá pro jejich dobré elektrické, magnetické, tepelné i mechanické vlastnosti. K rozšířeným kovům v této oblasti patří stříbro (Ag), zlato (Au), hliník (Al), chrom (Cr), měď (Cu), nikl (Ni), platina (Pt), tantal (Ta), titan (Ti), wolfram (W). [6]

Při výběru materiálu komponenty k vedení elektrického proudu je hlavním parametrem jeho vodivost, resp. rezistivita. Materiál však musí splňovat i další parametry jako je vyhovující závislost rezistivity materiálu na jeho teplotě, kterou standardně popisuje teplotní součinitel odporu, udávající procentuální změnu odporu na stupeň Kelvina. Tuto závislost, je-li dobře popsána, lze při návrhu některých zařízení i aktivně využít pro snímání teploty. Dalším parametrem je chemická a teplotní stálost materiálu, která je nutná pro zaručení určité životnosti zařízení. Chemickou stálostí se vyznačují vzácné kovy (Ag, Au, Pt), které za standardních podmínek neoxidují. Některé kovy (Al, Ti, Cr), jsou-li vystavené atmosférickým podmínkám, mají tendenci vytvářet tenkou vrstvu oxidů, která následně brání další oxidaci a tím je chemická stálost taktéž zajištěna. Jiné kovy (např. Cu) tuto auto-pasivační schopnost nemají, a proto se bez dodatečné ochrany nehodí pro použití v chemicky náročných prostředích. [6]

Tepelné vlastnosti jsou další skupinou charakteristik, pro kterou jsou kovy v oblasti MEMS validní skupinou materiálů. Kovy disponují velkou tepelnou vodivostí a používají se proto jako chladiče či tepelné vodiče. Kovy mají také relativně velký součinitel teplotní roztažnosti a tvoří tak s jinými materiály ideální dvojice pro termické aktuátory a jiné aplikace. [6]

Kovových materiálů se využívá také pro výrobu mikromechanických členů MEMS (nosníky, membrány atd.). V tomto případě jsou rozhodující mechanické vlastnosti, které jsou ale do jisté míry těžko definovatelné. Hodnoty mechanických vlastností tenkých vrstev kovů, jako jsou meze pevnosti či kluzu, se totiž mohou značně lišit od hodnot změřených standardizovanými metodami. Kvůli malým rozměrům MEMS komponent mechanické vlastnosti

ovlivňuje také konkrétní mikrostruktura a chyby v ní. Rámcově lze vycházet z hodnot měřených „makro-metodami“, je ale zřejmé, že pro určení mechanických vlastností kovů v pojetí MEMS, je třeba znát mnohem více o konkrétní aplikaci. [6]

2.4.3 Polymery

Polymery jsou v MEMS stále více používanými materiály. Chemická stabilita, zajímavé mechanické vlastnosti a také nízká ekonomická náročnost jsou všechno atributy, které k tomu přispívají.

Polymer SU-8 je rozšířeným UV rezistem pro optickou litografii. S jeho použitím lze realizovat struktury jemného rozlišení v silných vrstvách a díky chemické netečnosti mohou být tyto struktury použity jako formy pro pokovení. Toto je dobrou alternativou k LIGA procesu (viz 2.3.4), který je oproti optické litografii technologicky náročnější a nákladnější. [17]

Polyimidy jsou polymery disponující vysokou mechanickou pevností, chemickou i tepelnou stabilitou, vysokou teplotou skelného přechodu, nízkou permitivitou atd. Pro své vlastnosti a dobrou zpracovatelnost, která je pro polymery typická, jsou polyimidy využívány jako náhrada za keramické materiály nebo jako chemicky odolný maskovací materiál. [6]

Parylen (poly-para xylylen) je polymerním materiálem, který nachází uplatnění v biomedicínských aplikacích. Splňuje extrémně vysoké požadavky na bezpečnost materiálu (nízká toxicita, chemická stabilita atd.) tzv. šesté třídy dle USP (United States Pharmacopeia) a je tedy použitelný i pro dlouhodobé implantáty. Pro MEMS je tento materiál atraktivní také díky dobré zpracovatelnosti. Procesní teploty jsou nízké a tvořená vrstva má jednolitý, neporézní charakter i na složitých prostorových strukturách. Parylen proto lze dobře využít pro ochranné povlaky. [6] [17]

PDMS, polydimethylsiloxan, je polymer patřící do skupiny silikonů, řetězce obsahují atomy křemíku. Je pružný, průhledný, dobře propustný pro plyny a nepropustný pro vodné kapaliny, chemicky málo reaktivní a netoxický. Použití nachází v mikrofluidních a biochemických systémech. [6]

Pro specifické aplikace MEMS existuje mnoho dalších polymerních materiálů využívaných pro jejich unikátní vlastnosti. Patří mezi ně například různé hydrogely, polymery ve formě tzv. tekutého krystalu, nebo také relativně nově vyvinuté konduktivní polymery. [6] [17]

3 UKP lasery

LASER je akronym pro Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, což lze přeložit jako zesílení světla stimulovanou emisí záření. V podkapitolách bude popsán princip vzniku laserového záření, obecný popis laserového zařízení, podrobnější popis takzvaných ultrakrátkopulsních laserů a způsoby jakými laserový paprsek interaguje s materiálem.

3.1 Princip a obecný popis laseru

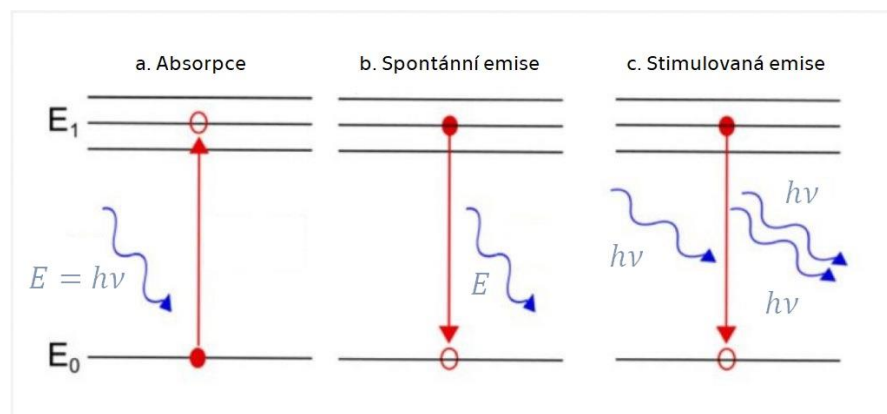
Princip vzniku laserového záření je založen na přechodech elektronů mezi energetickými hladinami atomu. Tyto kvantové přechody, změny energetických stavů atomu, mohou být vyvolány absorpcí nebo obráceně vyzářením energetického kvanta ve formě fotonu. Mezi energetickými hladinami může dojít k následujícím typům přechodů: absorpce, spontánní (samovolná) emise, stimulovaná (vynucená) emise a náhodné relaxační přechody. [18] [19] [20]

Absorpcí (Obr. 19 a.) se rozumí přechod elektronu z nižší energetické hladiny do hladiny vyšší způsobený absorpcí (pohlcením) kvanta energie. Aby atom mohl přejít do excitovaného stavu interakcí s fotonem, musí mít daný foton energii (E_{fotonu}) rovnou energetickému rozdílu daných dvou hladin ($E_1 - E_0$). [18] [19] [20]

$$E_{fotonu} = h * \nu = E_1 - E_0 \tag{2}$$

h ... Planckova konstanta

ν ... frekvence

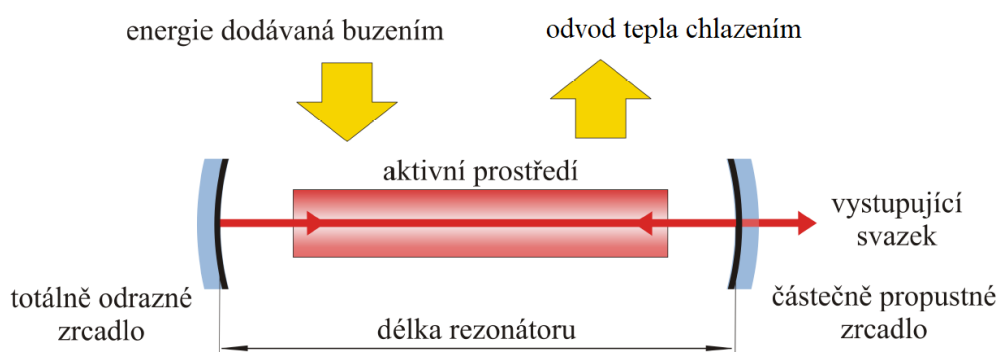


Obr. 19 – Schéma přechodů elektronů mezi energetickými hladinami (upraveno) [21]

Atomy mají tendenci být v energeticky výhodném, neexcitovaném stavu. Excitovaný atom je proto nestabilní a elektrony samovolně přecházejí do nižších energetických hladin. Při tomto přechodu elektronu (Obr. 19 b.), spontánní emisi, je vyzářena energie. Vlny záření vzniklé spontánními emisemi nejsou koherentní, nemají tedy shodnou frekvenci ani směr a nejsou spolu ve fázi. [18] [19] [20]

Sestup elektronu do nižší hladiny může být způsoben také interakcí s dalším fotonem (Obr. 19 c.). K této stimulované emisi může dojít, pokud jeho energie odpovídá energetickému rozdílu mezi danými hladinami. Vyzářený foton pak svými vlastnosti (směrem, fází a frekvencí) odpovídá stimulujícímu záření. [18] [19] [20]

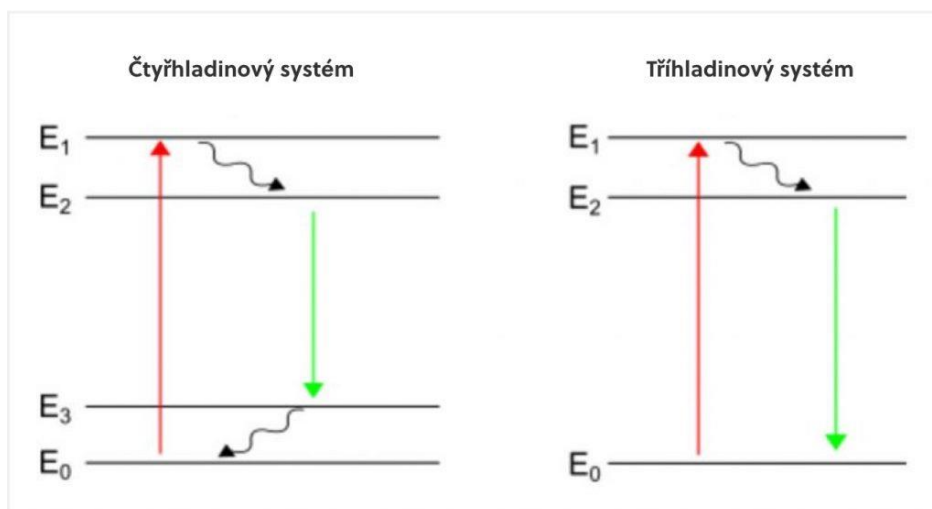
Lze ukázat, že za normálních okolností přechody absorpce výrazně převažují nad přechody stimulované emise. Pro fungování laserů je ale klíčovým předpokladem obrácený stav, převaha stimulované emise nad absorpcí a spontánní emisí. Pro splnění tohoto předpokladu je nutné, aby v aktivním prostředí bylo více atomů s elektrony na vyšších energetických hladinách než neexcitovaných atomů. Taková situace se nazývá stavem inverzní populace a lze jí dosáhnout přívodem energie. [19] [20]



Obr. 20 - Schéma základní konstrukce laserového zařízení (upraveno) [20]

Základní konstrukci laserového zařízení (Obr. 20) tvoří: rezonátor, čerpací zařízení a chladičící zařízení. V rezonátoru dochází ke stimulované emisi a nejčastěji jej tvoří aktivní prostředí a dvě zrcadla. Ta obklopují aktivní prostředí tak, aby bylo vznikající laserové záření, které má směr šíření shodný s osou rezonátoru, odráženo zpět. Opakovanými průchody aktivním prostředím se záření zesiluje až na hodnotu, při které svazek záření vystupuje z rezonátoru

částečně propustným zrcadlem. Čerpací zařízení zajišťuje přívod energie, díky které přechází aktivní prostředí do stavu inverzní populace. Způsobů, jak toto buzení zajistit, je více (opticky, elektricky atd.). Chlazení odvádí přebytečné teplo vzniklé v důsledku nízké účinnosti laserových zdrojů pryč z aktivního prostředí. [20] [21]



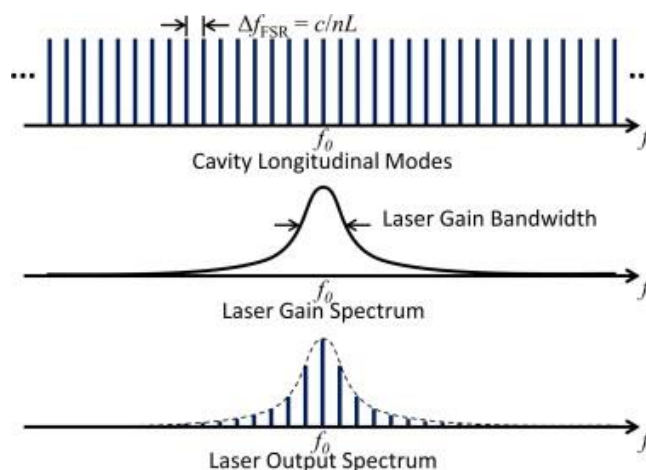
Obr. 21 – Čtyřhladinový a tříhladinový systém [21]

V laserových zařízeních se obvykle používají tři a čtyřhladinové systémy, jelikož v případě systému dvouhladinového, který je uveden na Obr. 19 nelze dosáhnout inverzní populace optickým buzením. V momentě, kdy jsou energetické hladiny E_0 a E_1 rovnoměrně obsazeny, je totiž pravděpodobnost přestupu elektronů z vyšší hladiny na nižší stejná jako pravděpodobnost přestupu elektronu z nižší hladiny na vyšší. Používají se proto tříhladinové a čtyřhladinové systémy (Obr. 21). Oba systémy využívají tzv. metastabilní pracovní hladiny (E_2). Buzením se dostávají elektrony ze základní hladiny (E_0) na energetickou hladinu (E_1), ze které samovolně velice rychle přecházejí často nezářivým přechodem na metastabilní hladinu, kde relativně dlouho setrvávají. Z pracovní hladiny pak elektrony za vyzáření fotonu o vlnové délce výsledného laserového záření sestupují na nižší energetickou hladinu. Frekvence budícího a laserového záření je různá, fotony budícího záření proto nemohou spustit stimulovanou emisi z E_2 . V případě čtyřhladinového systému elektron ještě musí z hladiny E_3 znovu nezářivým přechodem sestoupit na základní hladinu. Nastalé podmínky umožňují stav inverzní populace a v rezonátoru může dojít k žádanému zesílení. [21] [19] [22]

3.2 UKP laser

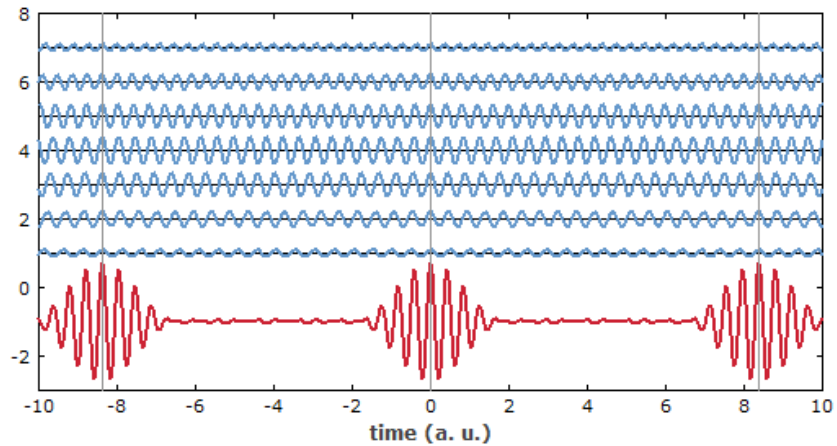
Pulsní lasery, oproti kontinuálním laserům generujícím soustavný, časově nezávislý, kontinuální paprsek, vysílají záření ve formě takzvaných optických pulsů. V závislosti na době trvání těchto pulsů lze z této kategorie laserů vyčlenit lasery ultrakrátko pulsní, tedy UKP. Ty pracují s optickými pulsy v řádu piko– až femtosekund (tedy 10^{-12} až 10^{-15} sekundy). Výhodou UKP laserů je koncentrace dostupné energie do extrémně krátkého časového intervalu a díky přesnému zaostření také na velmi malou plochu. Uvažujme pulsy délky 500 fs, s energií 1 mJ a zaostření na plochu kruhu poloměru 50 μm . Ideálně by pak výsledný výkon jednoho pulsu činil 2 GW a hustota výkonu přes 20 $\text{GW}\cdot\text{cm}^2$. Hlavním benefitem použití femto– a pikosekundových laserů je však skutečnost, že při obrábění těmito lasery vzniká pouze velmi malá tepelně ovlivněná oblast. [18] [23]

3.2.1 Generování ultrakrátkých pulsů



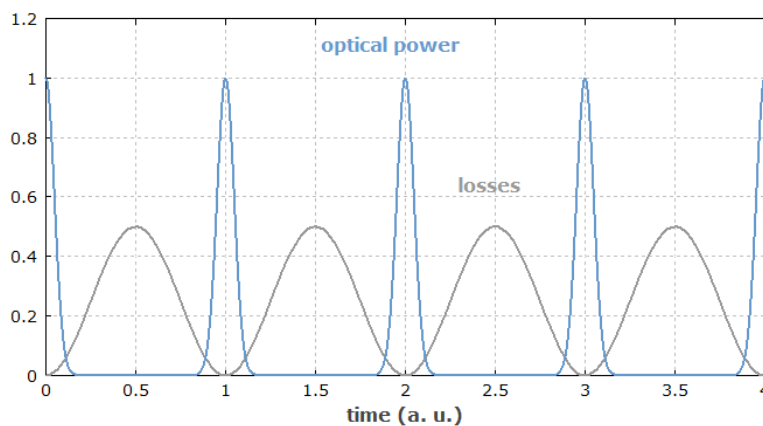
Obr. 22 - Módy rezonátoru, dostupné frekvenční spektrum, vystupní laserové spektrum [24]

Generaci UKP je možno uskutečnit tzv. mode-locking metodou, která se dále rozlišuje na aktivní a pasivní. Nutným předpokladem pro fungování této metody je použití aktivního prostředí, které vyzařuje relativně široké spektrum vlnových délek, resp. frekvencí (Obr. 22 uprostřed). V závislosti na parametrech rezonátoru jsou pak vlny určitých délek vyzařovaného spektra (Obr. 22 nahoře) „uzamčeny“ uvnitř (odtud název mode-locking) a jednotlivě stacionárně kmitají. Interferencí (skládáním) těchto vln pak vznikají ultrakrátké optické pulsy, které periodicky kmitají v rezonátoru. Rozdílem mezi aktivní a pasivní metodou je způsob jakým se dosahuje odstínění zbytku interferujícího vlnění. [25] [26]



Obr. 23 – Modelová syntéza periodicky se opakujících pulsů (červená) sečtením sedmi mírně odlišných frekvencí (modrá). Vertikální čáry indikují body, kde jsou najednou všechny skládané frekvence ve fázi. [25]

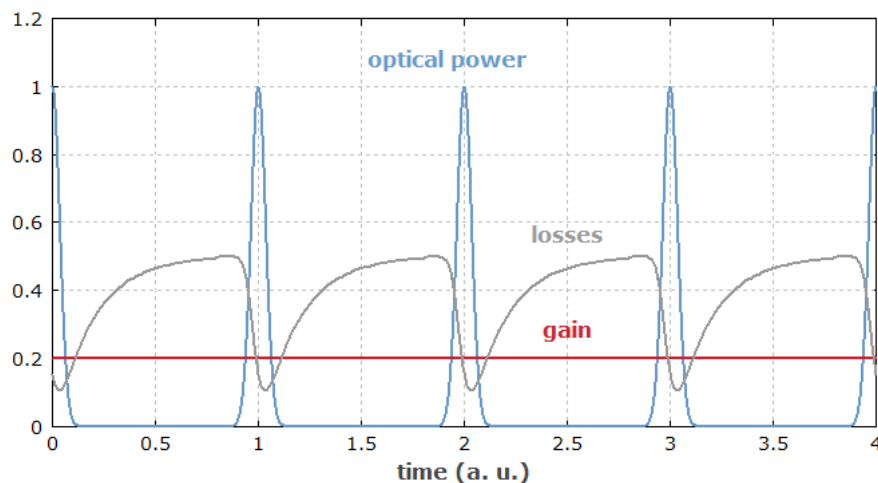
Aktivní metoda k tomuto účelu používá akusticko - optických, elektro - optických a dalších modulátorů, jimiž se v čase upravují energetické ztráty v rezonátoru. Periodický průběh ztrát, vytvořený modulátorem, musí být synchronizován s periodou v rezonátoru kmitajících pulsů tak, aby při průchodu pulsu byly vytvořené ztráty na minimu (Obr. 24). V momentě, kdy modulátorem prochází zbylé záření, musejí být ztráty naopak na nenulové hodnotě. Vlivem harmonických průběhů jak optických pulsů, tak ztrát, dochází k částečnému útlumu pulsů na jejich počátku a konci. Tím jsou dále zkracovány, dokud nepřeváží děje, které mají tendenci pulsy naopak prodlužovat. [27] [25]



Obr. 24 - Časové průběhy optických pulsů a ztrát generovaných modulátorem [27]

Pasivní mode-locking k filtraci optických pulsů využívá tzv. saturačního absorbéru. Absorbér není tak jako aktivní modulátor umístěn mezi zrcadla rezonátoru, ale zrcadlo na nepropustné straně nahrazuje. Je to zařízení schopné absorbovat nechtěné záření, které má v porovnání s UKP malou amplitudu.

V momentě kontaktu s pulsem je však absorpční schopnost saturována, vyčerpána, a puls se proto odrazí. Počátek průběhu pulsu je spotřebován k saturaci absorbéru a v závislosti na rychlosti zotavení, „odsaturování“, je i konec průběhu tlumen. [28] [25]



Obr. 25 - Časové průběhy optických pulsů a ztrát v saturačním absorbéru [28]

Vzhledem k tomu, že v případě aktivní varianty mode-lockingu je nutné elektronické řízení a v případě pasivní varianty nikoliv, je zřejmé že dosažitelné pulsní délky jsou značně rozdílné. Pro aktivní variantu jsou obvyklé hodnoty délek pulsů v řádu pikosekund, v případě pasivní však díky „elektronické nezávislosti“ lze dosáhnout délky pulsu i méně než 10 fs. [28] [27]

Generování UKP metodou mode-locking má však své limity. Při vysoké narůstající maximální energii krátkých pulsů se začnou významně projevovat parazitní optické nelineární děje zkreslující laserové záření, které mohou mít až destruktivní vliv na komponenty optické cesty laserového paprsku. Tyto děje omezují maximální intenzitu pulsu. Byla proto vyvinuta technika pro zesílení krátkých pulsů – tzv. CPA metoda (CPA je zkratka pro „chirped pulse amplification“). Tato metoda moduluje již vytvořený puls. Průchodem přes disperzivní element (anglický název „pulse stretcher“ lze doslova přeložit jako natahovač pulsu) se zvětší časová délka pulsu a tím se sníží jeho maximální energie v pulsu. V tomto stavu lze puls opětovně zesílit průchodem skrz aktivní prostředí pod energetickou hranici, při které nastávají nechtěné optické děje. Následně se puls opětovně zkrátí na požadovanou délku v pulsním kompresoru. Extrémní intenzita pulsu laserového záření v pulsním kompresoru je regulována

průměrem svazku. Tímto způsobem lze dosáhnout řádově až petawatových (10^{15} W) výkonů pulsů. [29]

Pro vytvoření UKP lze využít také metody Cavity Dumping. Jedná se o způsob kombinující vytvoření optického pulsu mode-lockingem a jeho extrakci způsobem jaký je obvyklý u nanosekundových laserů. Rezonátor laseru je ohraničen absolutně reflektivními zrcadly. Puls vzniklý interferencí vln existuje uvnitř a prochází do rezonátoru umístěným elektro-optickým přepínačem. V tíženém okamžiku pak přepínač upraví trajektorii paprsku a puls je vypuštěn pryč z rezonátoru. Následuje dobití aktivního media buzením, neboť je po vyslání pulsu energie vyčerpána, a děj se opakuje. Velmi důležitá je při této metodě synchronizace přepínání s aktuální polohou optického pulsu v rezonátoru. K tomu se využívá extrémně rychlého monitoringu pomocí fotodiod. [30]

3.2.2 Typy UKP laserů

Aktuálně se nejvíce používají pevnolátkové UKP lasery, mezi které patří [31]:

- Ti^{3+} :safírový laser
- Yb^{3+} lasery
- Nd^{3+} lasery
- Cr^{2+} lasery

Monokrystalický Al_2O_3 dopovaný Ti^{3+} ionty je velmi rozšířené aktivní medium pro laditelné a UKP lasery. Ti^{3+} ionty mají velmi široké vyzařovací spektrum (650 – 1100 nm), což dovoluje generování UKP (<10 fs) a také laditelnost vyzařovaných vlnových délek. Právě díky laditelnosti vyzařované frekvence lze Ti:safírové lasery použít také jako optické čerpací zdroje pro různá další aktivní media. [32]

Dalšími aktivními medii v pevnolátkových laserech mohou být krystaly i skla dopované různými ionty např. vzácných zemin jako jsou ionty Ytterbia (Yb^{3+}) či Neodymu (Nd^{3+}) nebo kovů (Cr^{2+}).

Ionty Ytterbia či Neodymu dopované krystaly a skla jsou často používaným mediem pro výkonové průmyslové a frekvenčně laditelné lasery. Vyzařované spektrum Yb^{3+} laserů je v porovnání s Nd^{3+} relativně velké, což umožňuje generování UKP metodou mode-locking. Vyzařované vlnové délky

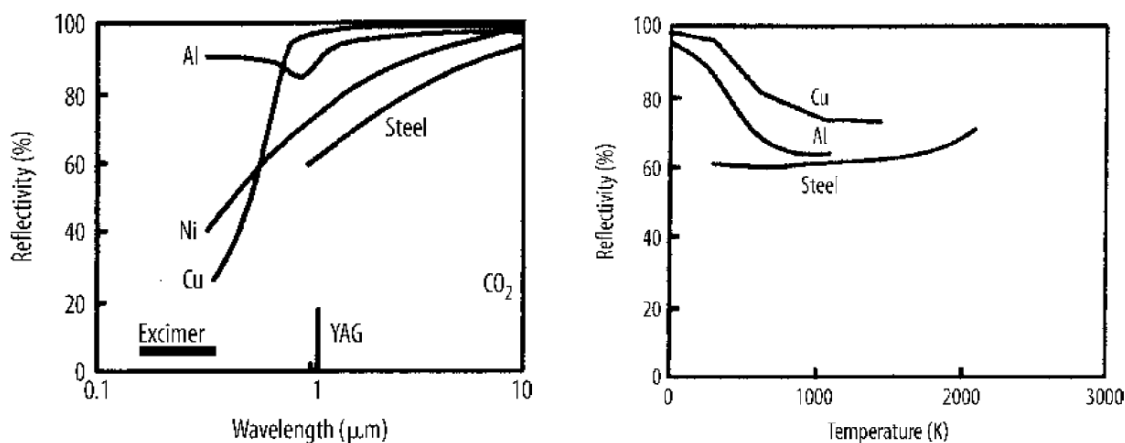
Nd^{3+} i Yb^{3+} laserů se pohybují okolí 1000 nm, Yb^{3+} aktivní medium ale disponuje širším vyzařovaným spektrem i delším časem, po který elektrony setrvávají na metastabilní energetické hladině. Aktivní medium s ionty neodymu je však energeticky účinnější. [33] [34]

Kromě pevnolátkových laserů na bázi aktivního krystalu se používají také vláknové UKP lasery. Ve většině případů se používá optických vláken na bázi křemíku dopovaných ionty vzácných zemin (Er^{3+} , Nd^{3+} , Yb^{3+} , Tm^{3+} atd.) čerpaných diodami. [35]

3.3 Interakce paprsku s materiálem

Ultrakrátko pulsní lasery se ukázaly být vynikajícím nástrojem pro velmi přesné obrábění. Při zpracování materiálů lze za použití UKP laserů dosáhnout výrazně lepších výsledků (zejména z hlediska přesnosti obráběné geometrie a tepelného ovlivnění materiálu) v porovnání s lasery operujícími v kontinuálním režimu nebo v režimu krátkých (nanosekundových a milisekundových) pulsů. Je tomu tak kvůli zásadním odlišnostem fyzikálních mechanismů přenosu energie, probíhajících při kontaktu materiálu s laserovým paprskem v různých režimech. [36]. [31]

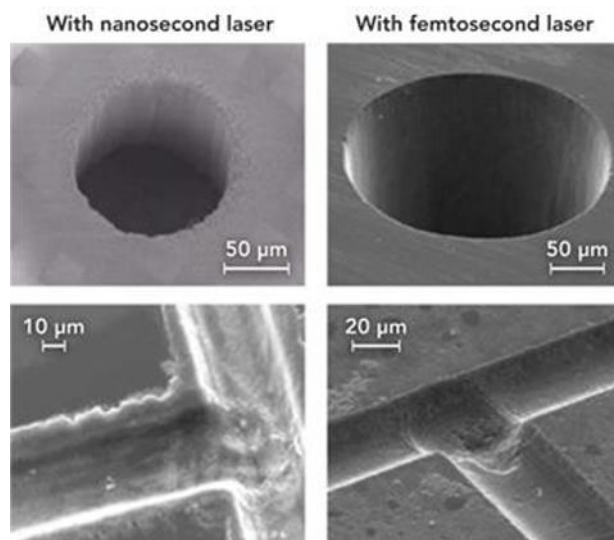
Kritickým parametrem pro jakékoliv zpracování materiálu laserem je koeficient absorpce daného materiálu. Dopadající záření může být po dopadu na neprůhledný povrch buď reflektováno, tedy odraženo, nebo absorbováno. Absorpční koeficient (často značen A nebo α) určuje míru předané energie mezi laserovým paprskem a povrchem obráběného povrchu za daných podmínek, a jedná se tak o procentuální podíl absorbované části záření. Tento absorpční koeficient je ovlivněn více faktory, ale dominantní je vlnová délka záření a teplota povrchu. V grafech (Obr. 26) je vidět závislost reflektivity na vlnové délce záření a teplotě pro vybrané materiály. Je tedy zřejmé, že pro obrábění konkrétního materiálu nelze použít jakékoliv vlnové délky záření, respektive vhodnost různých laserových zdrojů se může významně lišit. [37]



Obr. 26 – Závislost reflexe vybraných materiálů na vlnové délce a teplotě (pro $\lambda = 1,06 \mu\text{m}$) [37]

Laserový paprsek v kontinuálním režimu materiál intenzivně ohřívá a taví, což má za následek vznik rozsáhlých tepelně ovlivněných oblastí. Laser v režimu dlouhých pulsů materiál taktéž taví, ale díky nestabilitě procesu je materiál v kapalně fázi vytlačován z ozařované oblasti zde vznikajícími parami a opětovně tuhne, což má za následek geometrické nepřesnosti a stejně jako v případě použití laseru v kontinuálním režimu vznik tepelně ovlivněných oblastí. [36] [31]

Právě v tomto se ablace (odebírání materiálu) UKP laserem liší. Délka pulsu je totiž výrazně kratší než čas potřebný k přenosu energie mezi volnými elektrony a atomovou strukturou obráběného materiálu. V malé hloubce (v rámci jednotek mikrometrů) se tak dosáhne prudkého nárůstu tlaku a teploty. Volnými elektrony absorbovaná energie je natolik velká, že se tato vrstva téměř skokově ohřeje na teplotu mnohem vyšší než bod tání a materiál přechází z pevného skupenství přímo do plynné fáze. Disipace absorbované energie probíhá dvěma hlavními způsoby, a to: termickou vaporizací, tedy dějem lokálního rychlého zvýšení teploty nad bod varu kolizemi mezi elektrony a fonony (fonon = kvazičástice realizující šířící se energetické kvantum v krystalové struktuře [38] [39]), a tzv. Coulombickou explozí, při které velké množství volných elektronů vytvoří dostatečně silné elektrické pole schopné „vytrhnout“ ionty ven z povrchu materiálu. Okolí ozařované oblasti po ablaci není (na rozdíl od případu použití laseru s dlouhými pulsy a kontinuálního) tepelně zatíženo a obrobené struktury jsou díky absenci kapalně fáze v procesu velmi přesné. [36] [31]



Obr. 27 - Srovnání obroběných povrchů nano- a femtosekundovým pulsním laserem [31]

Intenzita záření UKP laserů je navíc často extrémně vysoká, a tak umožňuje průběh dalších nestandardních absorpčních dějů. Jedním z těchto dějů je multifotonová ionizace, při které je kvůli velké hustotě toku fotonů možná absorpce více fotonů zároveň vázaným elektronem. Pokud je absorbovaná energie dostatečně velká, vázaný elektron je „osvobozen“ z valenční vrstvy atomu a stává se volným. Vzhledem k velké kinetické energii volných elektronů absorbujících energii fotonů také dochází ke srážkám volných a vázaných elektronů. Kolizí se tato energie může předat vázanému elektronu a pokud překročí ionizační potenciál, elektron se stává volným. Je zřejmé, že tento děj má jistý lavinový efekt, neboť nově volné elektrony se absorpcí fotonů dostávají do stavu, kdy jsou sami schopné kolizí dodat dostatečné množství energie dalšímu vázanému elektronu. [36] [31]

4 Experiment

Cílem experimentu je navržení mechanické komponenty komplexního mikroeletromechanického systému a využití technologie ultrakrátkopulsních laserů pro její výrobu. V následujících podkapitolách je experiment chronologicky popsán. Začíná návrhem dílce, pokračuje testováním ablace zvoleného materiálu a vyústí jeho samotnou výrobou a analýzou přesnosti výroby.

4.1 Návrh mechanické komponenty MEMS

Pro experimentální výrobu na laserovém zařízení byla pro jednoduchou konstrukci a reálnou použitelnost navržena struktura mikromembrány, která by potenciálně mohla sloužit jako senzitivní součást např. tlakových MEMS senzorů. V konkrétním zařízení by membrána plnila roli členu, jehož pohyb (průhyb) závislý na zjišťované vnější síle může být vyhodnocen libovolným způsobem (viz 2.2.1). S tímto záměrem byla navržena membrána zobrazená na výkresu na následující straně. Membrána byla navržena kruhového tvaru pro co nejlepší rozložení napětí při deformaci, přestože komerčně vyráběné tlakové membrány MEMS jsou obvykle čtvercové či obdélníkové. Při výběru materiálu byly zvažovány především sloučeniny křemíku, jakožto zastupitelé zásadní skupiny dnes používaných materiálů pro MEMS. Z rešerše článků o designu a experimentální výrobě podobných struktur nakonec jako vhodní kandidáti vyplynuli dva materiály: monokrystalický křemík a SiC. Oba materiály disponují vhodnými mechanickými vlastnostmi pro toto použití, především vysokým modulem pružnosti ($E_{Si} \approx 190 \text{ GPa}$, $E_{SiC} \approx 200 \text{ až } 400 \text{ GPa}$ [17]). Z těchto dvou materiálů je čistý křemík vzhledem k rozvinutým technologiím pro jeho zpracování často preferovanou volbou pro strukturní a mechanicky namáhané komponenty. Zpracování karbidu křemíku je naopak často značně problematické a standardních metod pro zpracování Si (např. mokré a suché leptání viz 2.3.3, 2.3.2) nelze bez modifikací využít. Významnou vlastností SiC je totiž jeho chemická a teplotní stálost, díky které je vhodným materiálem pro aplikace v agresivním prostředí. S ohledem na špatnou dostupnost a relativně vysokou cenu SiC byla pro tento experiment zvolena první možnost, tedy monokrystalický křemík. [40] [41] [42] [43] [44] [45] [46] [47] [48] [49] [50] [17] [6]

1

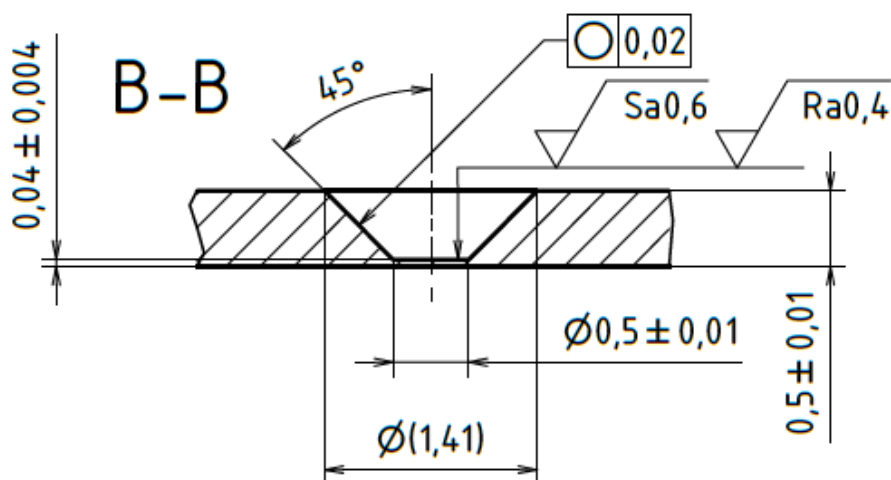
2

3

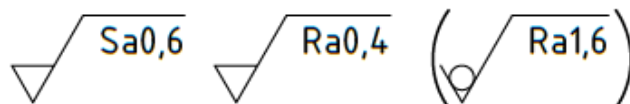
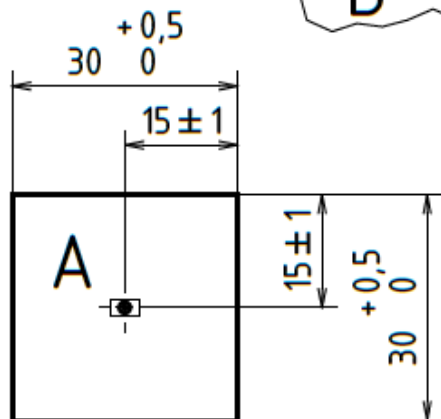
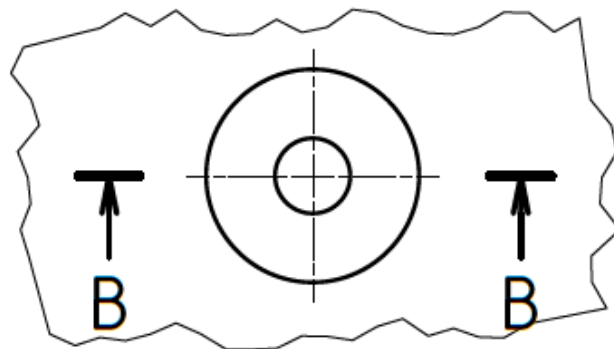
4

A

A



A (20 : 1)



MATERIAL: Monokrystal Si

POLOTOVAR: DESKA - 30x30x0,5

TOLEROVÁNÍ DLE ISO 8015

PŘESNOST ISO 2768 - mK

VSEOB. TOL. ISO 8062 -



INDEX ZMĚNA DATUM PODPIS

NAVŘHL	Autor	Datum	PŘEZK.	Podpis	Datum	HMOTNOST 0,000 kg	MĚŘITKO
KRESLIL	Vojtěch Kudma	02.06.2020	SCHVÁLIL			SESTAVA	1:1 (1:X)
	Vojtěch Kudma	17.06.2020				KUSOVNÍK	PROMÍTÁNÍ: $\left(\begin{array}{c} \ominus \\ \oplus \end{array} \right)$ (ISO E.)

FAKULTA	NAZEV	ČÍSLO VYKRESU	TYP:
STROJNÍ	MEMS Membrána	1	



ČESKÉ
VYSOKÉ
UČENÍ
TECHNICKÉ
V PRAZE

FAKULTA
STROJNÍ

NAZEV

MEMS Membrána

ČÍSLO VYKRESU

1

LIST: 1 / 1

1

2

3

4

F

F

4.2 Metodika měření ablačního prahu [51] [52]

Prahová hodnota intenzity laserového paprsku pro ablaci materiálu, tzv. ablační práh $F_{th} [J.cm^{-2}]$, je konstantou experimentu potřebnou pro nastavení parametrů laseru pro obrábění. Lze z ní stanovit nutnou minimální energii pulsu $E_p [J]$, resp. poměr průměrného výkonu $P_{avg} [W]$ a opakovací frekvence pulsů $f [Hz]$ pro ablaci konkrétního materiálu.

$$E_p = \frac{P_{avg}}{f} \quad (3)$$

Ablační práh pro konkrétní materiál lze stanovit z pozorování závislosti mezi energií pulsu a průměrem příslušného bodu („kráteru“) vzniklého na povrchu materiálu. Pro popis této závislosti bude použita rovnice (4), kterou je třeba vhodně upravit a dosadit za některé členy.

$$D^2 = 2 * \omega_0 * \ln\left(\frac{F}{F_{th}}\right) \quad (4)$$

Rovnice (4), kde $\omega_0 [cm]$ je poloměr fokusovaného laserového svazku a $F_{th} [J.cm^{-2}]$ je konstanta ablačního prahu, popisuje vazbu mezi průměrem ablovaného bodu $D [cm]$ a příslušnou intenzitou laseru $F [J.cm^{-2}]$. Do této rovnice je vhodné dosadit z definice intenzity (5).

$$F = \frac{2 * E_p}{\pi * \omega_0^2} \quad (5)$$

Rovnici (4) lze po dosazení z (5) upravit do tvaru (6).

$$\ln(2 * E_p) = \frac{D^2}{2 * \omega_0^2} + \ln(F_{th}) + \ln(\pi * \omega_0^2) \quad (6)$$

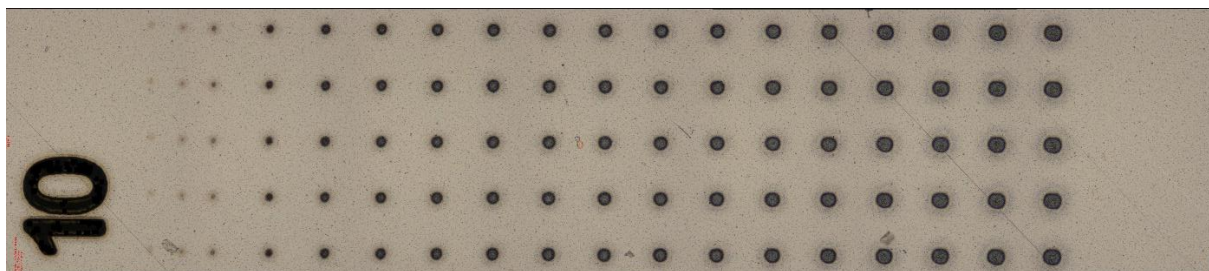
Následně lze zavést substituci (7), která bude vhodná pro praktické vyhodnocení měření.

$$y = ax + b$$
$$y = \ln(2 * E_p), \quad a = \frac{1}{2 * \omega_0^2}, \quad x = D^2, \quad b = \ln(F_{th}) + \ln(\pi * \omega_0^2) \quad (7)$$

Z grafického zpracování lineární regrese bodů určených hodnotami průměrů ablovaných bodů a jim příslušných energií pulsů pak lze stanovit konstanty a a b substituce (7) a z nich následně vypočíst ablační práh F_{th} .

4.2.1 Měření a vyhodnocení ablačního prahu křemíku

Experimentální měření ablačního prahu křemíku proběhlo při konstantní frekvenci pulsů $f = 200 \text{ kHz}$. Byla navržena matice 5x18 bodů (pět opakování pro konkrétní výkon) s rozsahem výkonu laseru $P_{avg} \in (0,1 ; 5) \text{ W}$. S ohledem na očekávanou hodnotu ablačního prahu je rozprostření výkonů po intervalu nerovnoměrné. Odpovídající prahová hodnota výkonu je v řádu desetin wattů a v dolní části intervalu proto byl výkon navyšován po menších přírůstcích než v části horní. Každý bod byl vytvořen deseti pulsy. Snímek vytvořené matice je na Obr. 28.



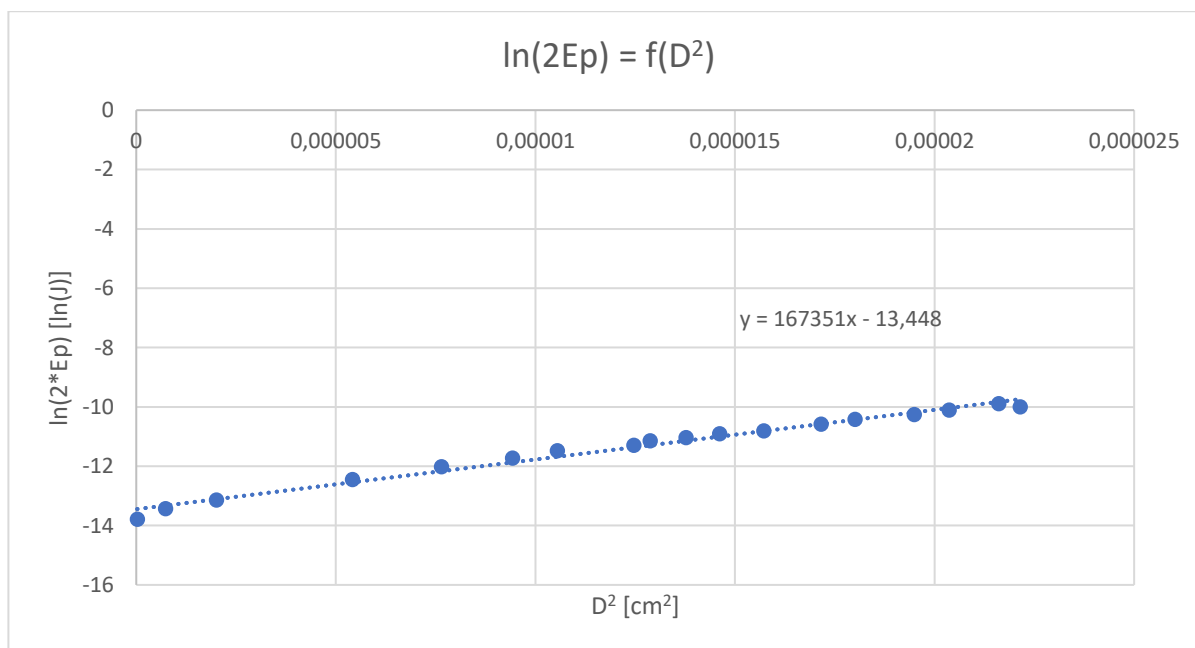
Obr. 28 - Matice ablovaných bodů

Pro nasnímání a měření matice bodů bylo použito zařízení Alicona IFM G4. Konkrétní hodnoty výkonů měřených na konci optické cesty laserového zařízení, vypočtené hodnoty energií pulsů a příslušné průměrné hodnoty průměrů ablovaných bodů v jednotlivých sloupcích matice jsou uvedeny v Tab. 1.

Po přepočítání hodnot výkonů uvedených v Tab. 1 na energie pulsů lze vynést funkční závislost $\ln(2 * E_p) = f(D^2)$ do grafu (viz Obr. 29). V tabulce jsou uvedeny a do grafu jsou vyneseny hodnoty kvadrátu průměrů ablovaných bodů D v jednotkách $[cm^2]$ a energie pulsů E_p v jednotkách $[J]$. To je výhodné s ohledem na obvykle používanou jednotku ablačního prahu $F_{th} [J.cm^{-2}]$, který je zjišťován.

Tab. 1 - Naměřená a vypočtená data z měření ablačního prahu křemíku

Nastavený výkon	Energie pulsu		Průměrné hodnoty ablovaných bodů	
P_{avg} [W]	E_p [μ J]	E_p [J]	D [μ m]	D [cm]
0,103	0,515	0,000000515	1,55 ± 0,14	0,000155
0,146	0,730	0,000000730	8,57 ± 0,35	0,000857
0,195	0,975	0,000000975	14,16 ± 0,24	0,001416
0,389	1,945	0,000001945	23,27 ± 0,15	0,002327
0,599	2,995	0,000002995	27,65 ± 0,37	0,002765
0,801	4,005	0,000004005	30,70 ± 0,24	0,003070
1,030	5,150	0,000005150	32,47 ± 0,38	0,003247
1,243	6,215	0,000006215	35,30 ± 0,20	0,003530
1,445	7,225	0,000007225	35,88 ± 0,19	0,003588
1,601	8,005	0,000008005	37,11 ± 0,25	0,003711
1,827	9,135	0,000009135	38,22 ± 0,16	0,003822
2,004	10,020	0,000010020	39,65 ± 0,18	0,003965
2,513	12,565	0,000012565	41,42 ± 0,28	0,004142
2,974	14,870	0,000014870	42,43 ± 0,30	0,004243
3,488	17,440	0,000017440	44,14 ± 0,32	0,004414
4,049	20,245	0,000020245	45,12 ± 0,37	0,004512
4,525	22,625	0,000022625	47,06 ± 0,36	0,004706
5,030	25,150	0,000025150	46,48 ± 0,21	0,004648



Obr. 29 - Graf lineární regrese bodů z naměřených a vypočtených dat

Po proložení změřených bodů přímkou jsou z rovnice lineární regrese zjištěny hodnoty konstant substituce (7).

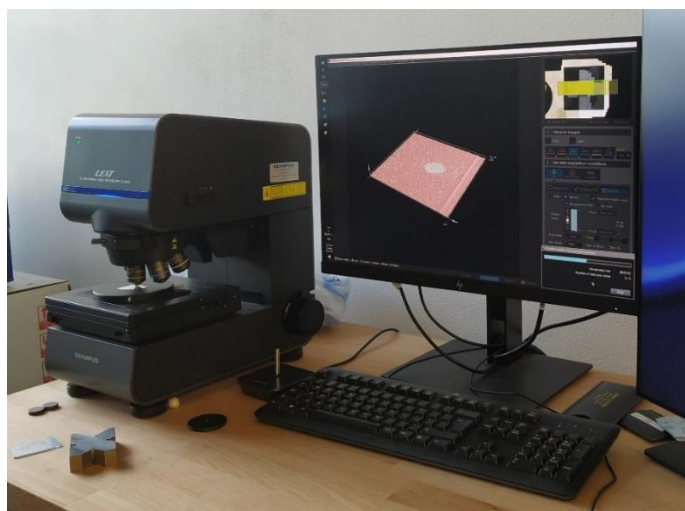
$$\frac{1}{2\omega_0^2} = 167351 \quad (8)$$

$$\ln(F_{th}) + \ln(\pi\omega_0^2) = -13,448$$

Ze soustavy rovnic (8) je následně vypočten ablační práh a poloměr fokusovaného laserového svazku. Hodnota ablačního prahu křemíku byla touto metodou určena na $F_{th} = 0,154 J \cdot cm^{-2}$ a poloměr spotu na $\omega_0 = 17,29 \mu m$. Zjištěná hodnota ablačního prahu konvenuje s předpoklady vycházejícími z rešerše [53] [54].

4.3 Test hloubky ablace

Před samotnou výrobou membrány bylo potřeba zjistit ještě poslední (pro přesné obrábění nutný) parametr, a to hloubku ablované vrstvy materiálu po jednom přejezdu laserem při daném nastavení. Tato hodnota byla určena jednoduchým testem. Zkušební vzorek byl ablován určitým počtem přejezdů laserového paprsku a následně byla změřena hloubka takto vzniklé díry. Jednoduchým výpočtem pak lze odvodit kolik přejezdů laseru je teoreticky potřeba pro obrobení jakékoliv jiné konkrétní hloubky. Hloubka ablované vrstvy na přejezd se může v rámci procesu měnit v závislosti na dalších proměnných (např. možný vznik oxidů atd.), a je proto nutné počítat s jistou nepřesností takto určené hodnoty.



Obr. 30 - Konfokální mikroskop Olympus LEXT OLK 50037

Pro zjištění ablované hloubky byl zkušební vzorek obroben 100 přejezdy na geometrii čtverce 2x2 mm. Hloubka vzniklé díry byla následně změřena na 85,8 μm pomocí konfokálního mikroskopu Olympus LEXT OLK 50037 (Obr. 30).

Ablovaná vrstva na jeden přejezd laserem byla takto určena jako:

$$\Delta h = \frac{85,8}{100} = 0,858 \mu\text{m}$$

4.4 Experimentální výroba membrány

4.4.1 Polotovar

Výroba navržené MEMS membrány byla provedena na polotovaru, čtvercové monokrystalické křemíkové destičce. Teoretická délka strany polotovaru je 30 mm a tloušťka 0,5 mm. Pro možnost dodržení výkresem předepsaných tolerancí bylo provedeno měření skutečných rozměrů pomocí posuvného měřítka pro měření stran a mikrometru pro měření tloušťky destičky. Délka čtvercového polotovaru byla změřena na 30,4 mm a tloušťka na 0,497 mm.

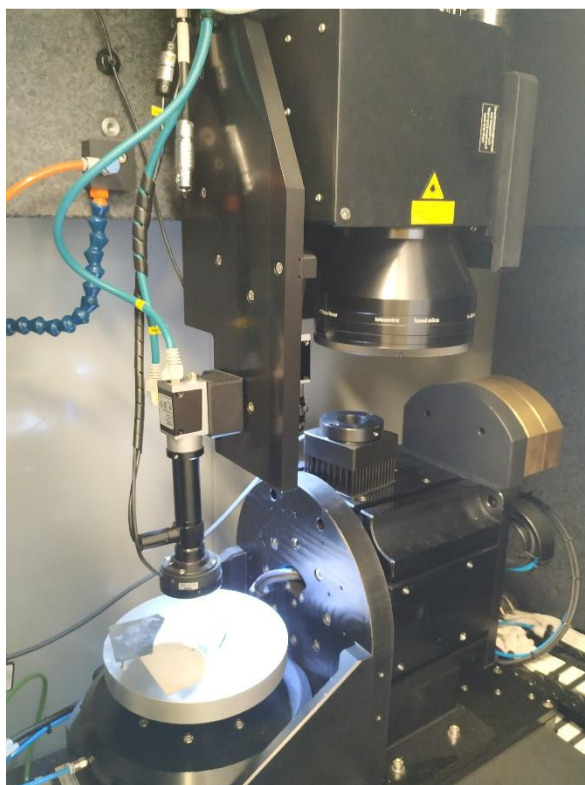


Obr. 31 - Měření skutečných rozměrů polotovaru

4.4.2 Vlastní proces laserového obrábění

Obrábění a testování ablačního prahu i hloubky ablace proběhlo na víceosém laserovém systému s ultrakrátkou délkou pulsu ve firmě Hofmeister (Obr. 32).

Centrum je vybaveno laserovým zdrojem s krystalem $\text{Yb}^{3+}:\text{YVO}_4$ a pro obrábění byla použita sekundární vlnová délka tohoto zdroje 532 nm.



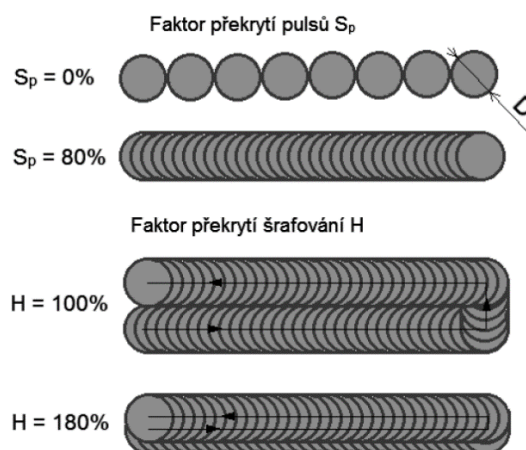
Obr. 32 - Vnitřní prostor UKP laserového centra

Navržená membrána vzniká jako dno slepé kuželové díry, která je v programu řídicím proces obrábění parametricky definována pomocí vrcholového úhlu kuželu 90° , nejmenšího průměru, resp. průměru dna, 0,5 mm a hloubky 0,457 mm, která je určena skutečnou tloušťkou polotovaru a požadovanou tloušťkou výsledné membrány. Ze znalosti teoretického úběru materiálu na jeden přejezd $\Delta h = 0,858 \mu\text{m}$ je stanoven počet vrstev potřebných pro obrobení dané kuželové díry na 532. Fokuse paprsku je zajištěna tak, že po každém přejezdu dojde k posuvu v ose Z, jehož velikost koresponduje s velikostí parametricky zadaného modelu díry a počtem přejezdů. Parametry nastavení laseru jsou pro přehlednost uvedeny v Tab. 2 a jsou totožné s parametry použitými pro zjištění hloubky ablace.

Tab. 2 - Parametry laserového obrábění

Vlnová délka	λ [nm]	532
Délka pulsu	t [ps]	<12
Opakovací frekvence	f [kHz]	200
Výkon	P_{avg} [mW]	500
Energie pulsu	E_p [μ J]	2,5
Poloměr spotu	w_0 [μ m]	17
Intenzita paprsku	F [$J \cdot cm^{-2}$]	0,551
Překryv pulsů	S_p [%]	92,5
	H [%]	192,5
Rychlost rozmítání	v_x [$mm \cdot s^{-1}$]	500

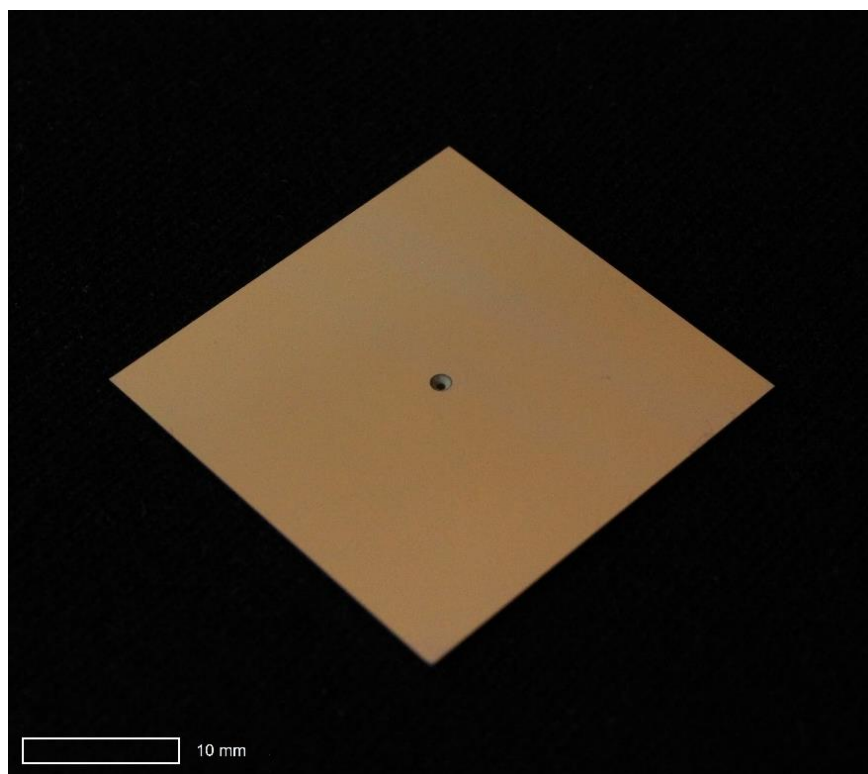
Použitý výkon laseru odpovídá přibližně 350% prahové hodnoty pro obrábění. Výkon byl nastaven s ohledem na předpoklad zvyšujícího se rizika vzniku oxidických nárůstků při obrábění křemíku laserem příliš vysoké intenzity vyplývající z předchozích zkušeností pracovníků firmy Hofmeister. Překryv laserových pulsů ve směru trajektorie laseru S_p byl nastaven na hodnotu 92,5 % a na odpovídající hodnotu 192,5 % byl nastaven i překryv ve směru kolmém na trajektorii laseru H (Obr. 33). Pro docílení co největší rovnoměrnosti obrábění v průběhu procesu je nastaven také úhel mezi šrafováním jednotlivých vrstev 53° . Prvočíselné úhlové posunutí mezi jednotlivými vrstvami by taktéž mělo být lepší variantou pro co nejlepší kruhovitosť membrány oproti periodicky se opakujícím natočením, jako je např. 90° .



Obr. 33 - Překryv pulsů S_p a H [55]

Nejprve bylo provedeno obrábění zkušební kusy pro ověření platnosti zvolených parametrů. Po obrábění byl zkušební kus proměřen pomocí konfokálního mikroskopu Olympus LEXT OLK 50037. Ukázalo se, že geometrie kuželové díry bohužel neodpovídá předepsaným rozměrům. Průměr dna byl změřen na 485 μm a hloubka díry na 467 μm . Byla proto provedena korekce v parametricky zadaném modelu řídicího programu navýšením průměru dna o 15 μm a byl snížen počet přejezdů na 521. Iterace parametrů byla s ohledem na nepřesné stanovení hloubky ablace vlivem parazitních jevů doprovázejících mikroablační procesy očekávaná. Takto upravenými parametry bylo provedeno obrobení finálního kusu. Při jeho kontrole však bylo zjištěno opětovné nedodržení dané geometrie. Kus byl však tentokrát opravitelný, jelikož kuželová díra byla hluboká 447 μm , a bylo proto pouze přidáno dalších 11 přejezdů pro prohloubení díry o zbývajících 10 μm . Po této opravě již finální kus prošel kontrolou rozměrů a byl podroben celkové analýze dosažených parametrů.

4.5 Vyhodnocení přesnosti výroby membrány



Obr. 34 – Fotografie obrobeného kusu

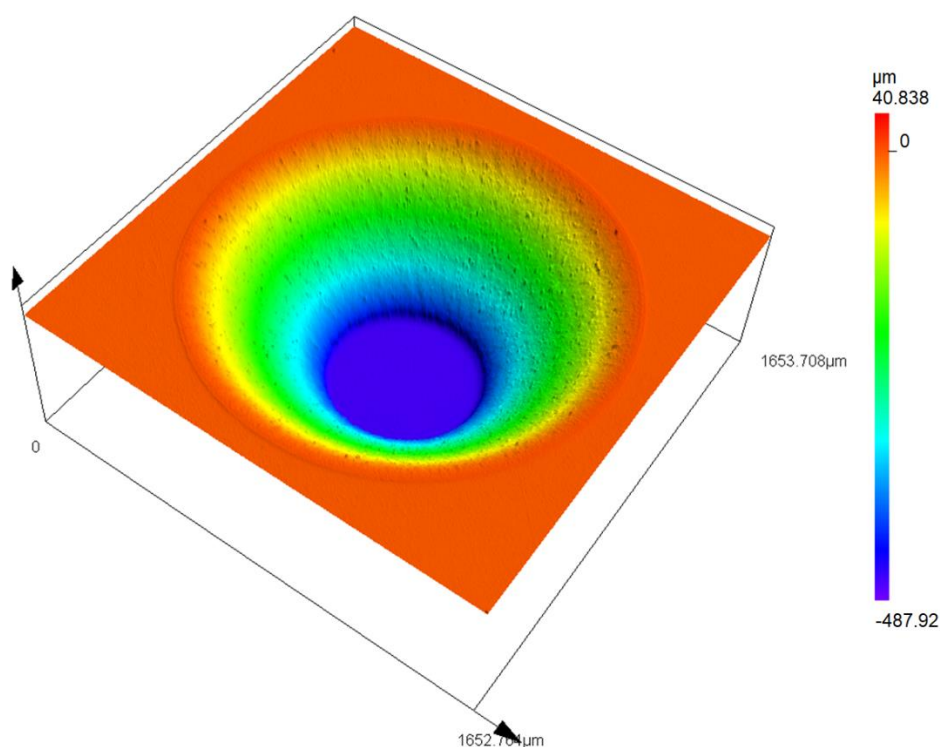
Vzniklá membrána byla změřena pomocí konfokálního mikroskopu Olympus LEXT OLK 50037 a optického metrologického systému Alicona Infinite Focus G5. Měření základních rozměrů (průměru a tloušťky membrány) proběhlo ve firmě

Hofmeister, měření drsnosti povrchu a kruhovitosti membrány proběhlo v laboratoři ČVUT.



Obr. 35 - Detail kuželové díry v křemíkovém substrátu

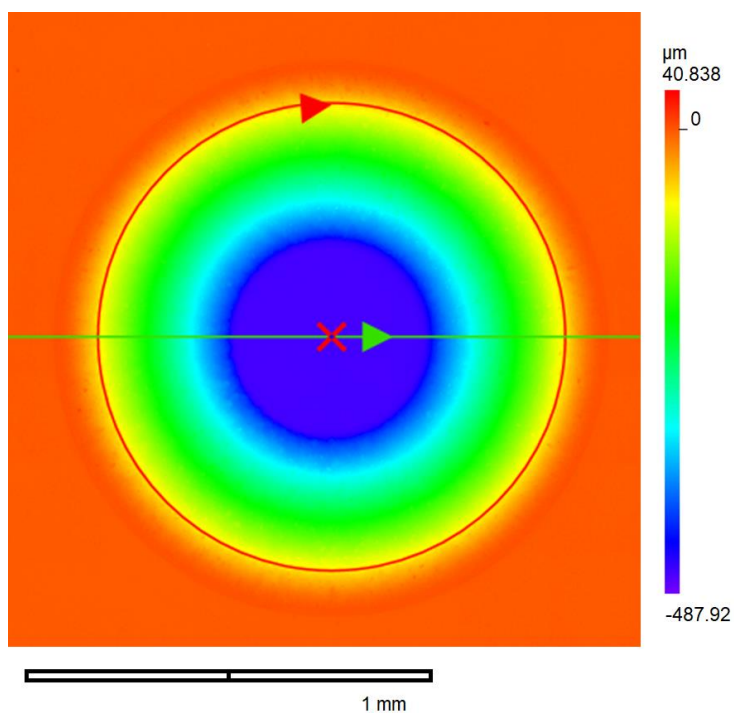
4.5.1 Vyhodnocení přesnosti z hlediska tvaru a rozměrů



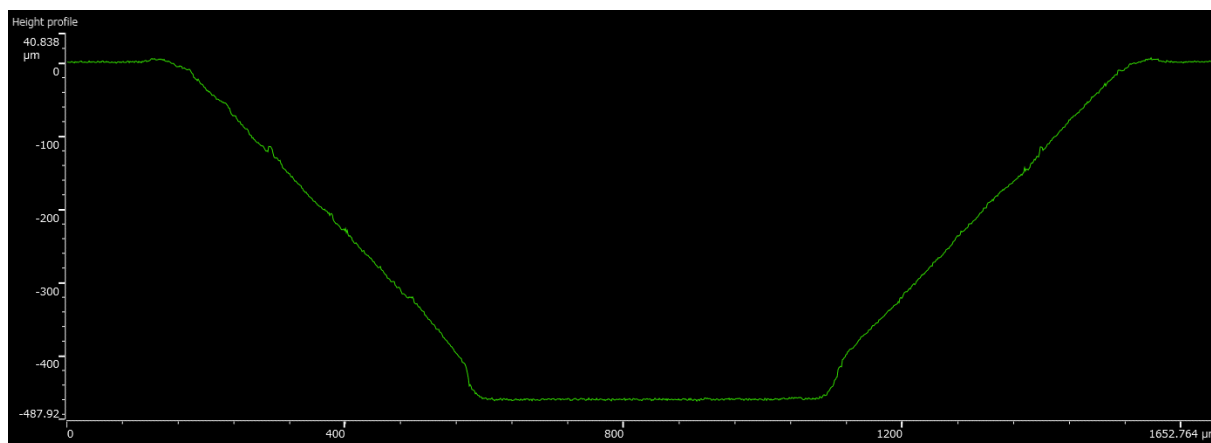
Obr. 36 - 3D snímek kuželové díry formující membránu z konfokálního mikroskopu

Na konfokálním mikroskopu byla provedena kontrola rozměrů průměru a hloubky kuželové díry, resp. tloušťky membrány, a také sklon stěn. Toto měření

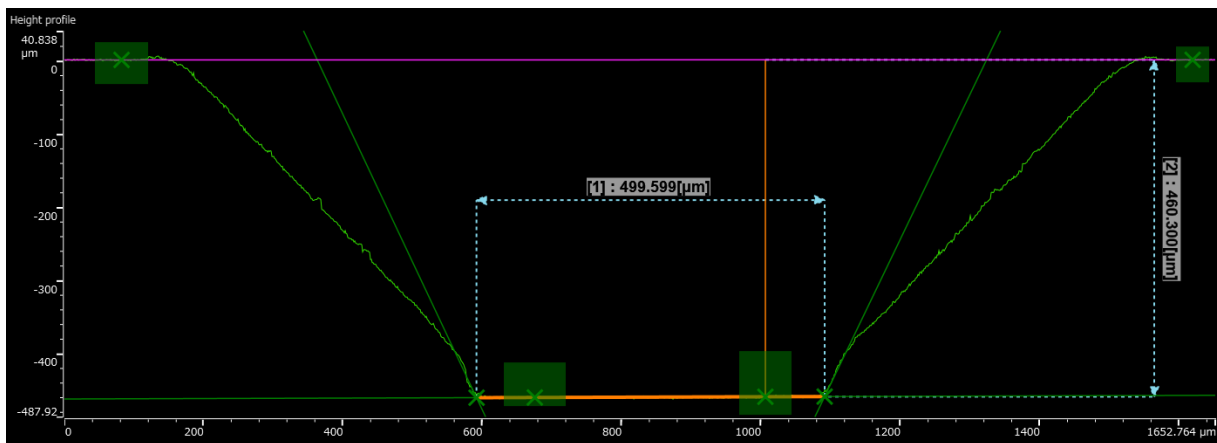
proběhlo na příčném řezu membránou, který je vidět na následujících snímcích (Obr. 37, Obr. 38, Obr. 39, Obr. 40).



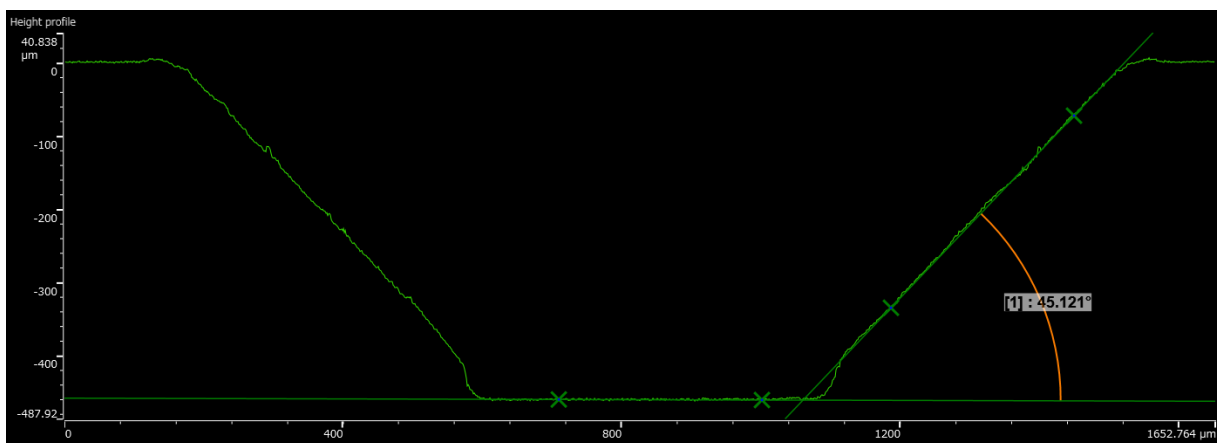
Obr. 37 – Provedení řezu 3D snímku



Obr. 38 – Kuželová díra v řezu



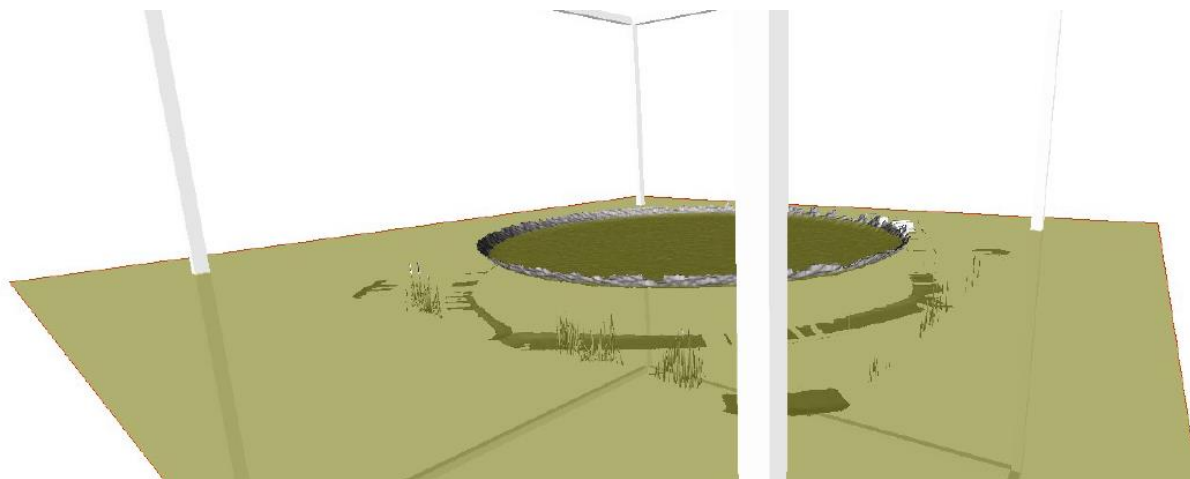
Obr. 39 – Měření průměru a hloubky díry, resp. tloušťky membrány



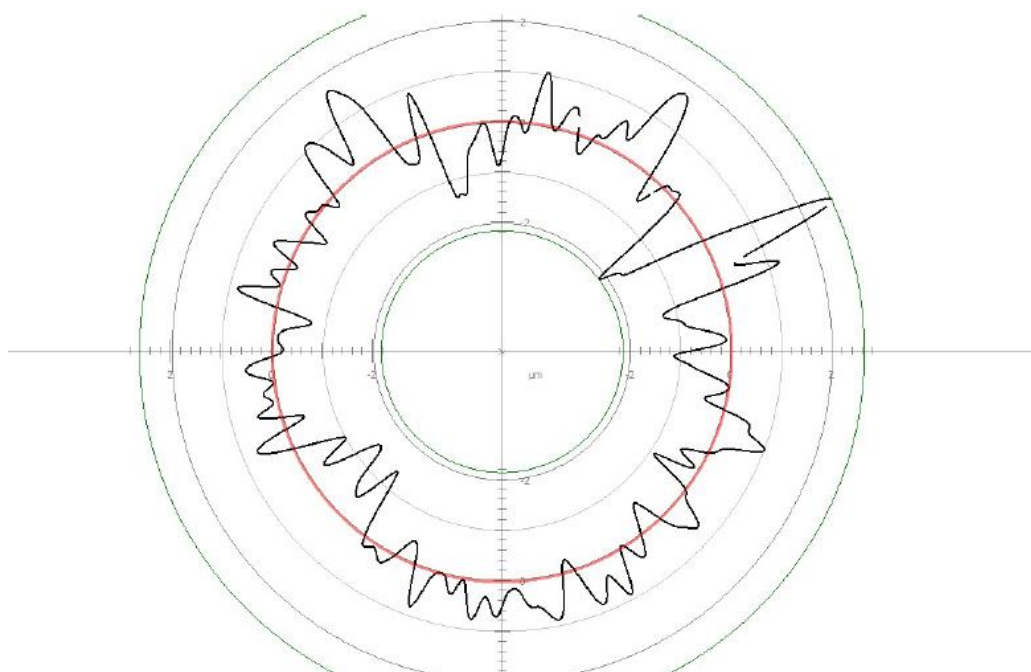
Obr. 40 – Měření sklonu stěn

Měřením byl určen průměr membrány 499,599 μm a hloubka kuželové díry 460,3 μm , resp. tloušťka membrány 36,7 μm . Obě tyto hodnoty jsou v tolerančním poli stanoveném výkresem. Procentuální chyba na požadované hloubce kuželové díry 457 μm byla 0,72 %.

Dalším vyhodnocovaným parametrem je kruhovitost membrány, která byla měřena na optickém metrologickém systému Alicona Infinite Focus G5. Kruhovitost byla vyhodnocena na křivce vzniklé průnikem nasnímané kuželové díry a rovinné plochy umístěné v co nejtěsnější blízkosti membrány, se kterou je vyrovnána. Tato situace je vidět na Obr. 41. Naměřené hodnoty jsou pak vidět v grafu (Obr. 42).



Obr. 41 - Měření kruhovitosti membrány



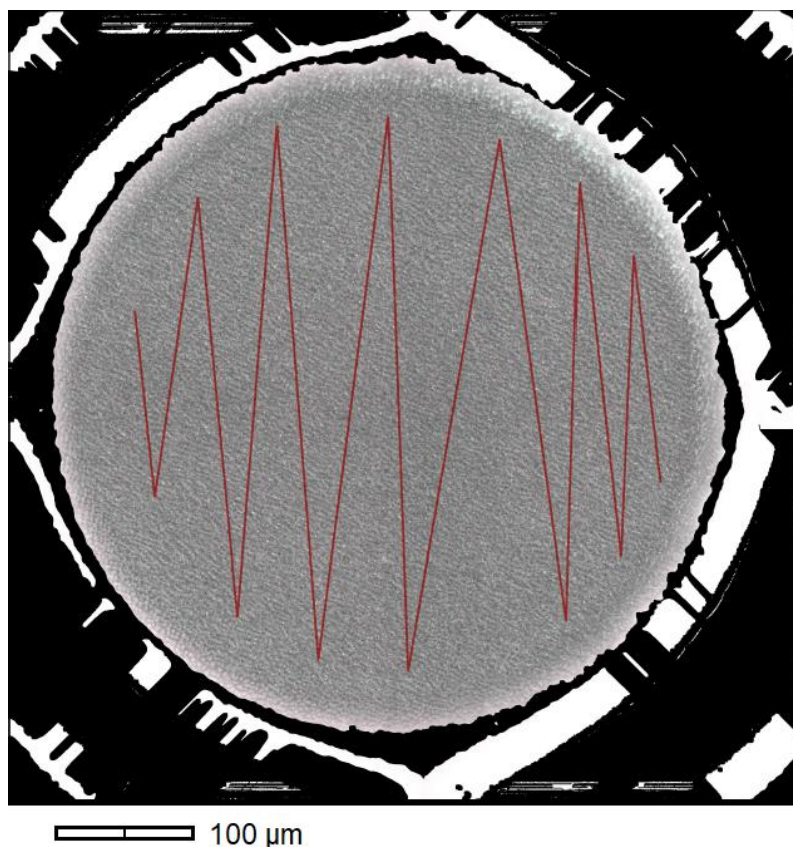
Obr. 42 – Graf změřených hodnot pro určení kruhovitosti

Maximální odchylka vrcholu od prohlubně byla změřena na 4,719 μm . Kruhovitost s tolerančním polem velikosti 20 μm předepsaná výkresem je tedy splněna.

4.5.2 Vyhodnocení drsnosti povrchu

Poslední měření provedené na zařízení Alicona Infinite Focus G5 bylo zaměřeno na vyhodnocení profilové a plošné drsnosti membrány, tedy dna kuželové díry. Pro vyhodnocení parametrů profilové drsnosti je dle normy ČSN EN ISO 4287 nutná délka úsečky profilu 4 mm. Vzhledem k tomu, že průměr měřené plochy je 0,5 mm, byla zvolena strategie měření po lomené čáře,

kteřá je vidět na Obr. 43 a na základě orientačního měření Rz byla určena základní délka pro aperiodický profil $L_c = 0,8$ mm.



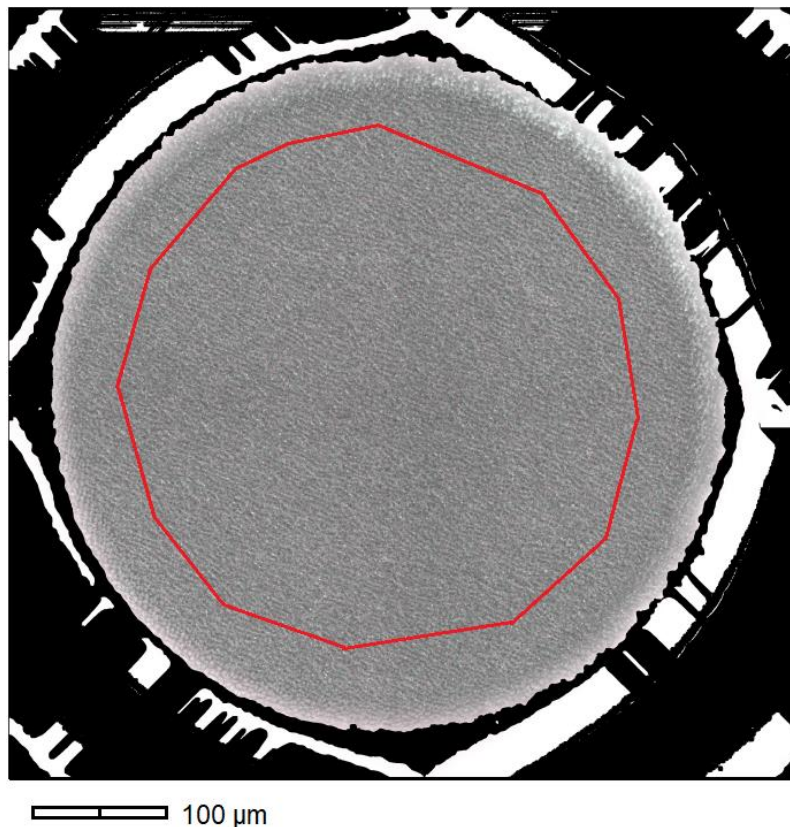
Obr. 43 - Lomená čára pro měření R_a

Délka profilu vyznačená lomenou čarou byla 4,2 mm. Na této lomené čáře byly vyhodnoceny parametry R_a – střední aritmetická odchylka profilu, R_z – výška nerovností a R_q – průměrná kvadratická odchylka profilu, které jsou uvedeny v Tab. 3.

Tab. 3 - Vyhodnocené parametry drsnosti profilu

R_a [μm]	R_z [μm]	R_q [μm]
0,318	1,971	0,397

Dále byla na zařízení Alicona Infinite Focus G5 vyhodnocena plošná drsnost membrány na ploše vytyčené červeným mnohoúhelníkem, jak je vidět na Obr. 44.



Obr. 44 - Měření plošné drsnosti

Na této oblasti byl vyhodnocen parametr plošné drsnosti Sa – aritmetický průměr výšky povrchu dle normy ČSN EN ISO 25178. Jeho hodnota byla určena na $Sa = 0,714 \mu m$.

4.6 Shrnutí experimentální části

Cílem experimentu bylo vytvořit komponentu MEMS a pro jeho splnění byly učiněny kroky podrobně popsané v kapitolách 4.2 až 4.4. Prvním krokem bylo navržení komponenty a vytvoření výkresové dokumentace specifikující podstatné parametry. Navržena byla senzitivní membrána, jakožto mechanický člen MEMS senzorů. Dalším krokem bylo zjištění ablačního prahu zvoleného materiálu, tedy monokrystalického křemíku. Tento ablační práh byl určen na hodnotu $F_{th} = 0,154 J.cm^{-2}$. Po zvolení parametrů procesu laserového obrábění bylo pro vytvoření požadované struktury nutným krokem zjištění ablované hloubky příslušné jednomu přejezdu, ze které byl následně určen výsledný počet přejezdů pro vytvoření membrány v polotovaru. Posledním krokem bylo samotné vytvoření membrány, která byla následně změřena a byly vyhodnoceny tolerance předepsané výkresem.

Hodnoty průměru a tloušťky membrány byly určeny z měření na konfokálním mikroskopu a vyhovují předepsané toleranci. Drsnost a kruhovitost membrány byly určeny z měření na optickém systému Alicona Infinite Focus G5. Kruhovitost a profilová drsnost membrány vyhovuje toleranci. Změřená plošná drsnost povolenou toleranci překračuje. Vyhodnocené parametry a jejich tolerance (jinak uvedené pouze na výkresu) jsou pro přehlednost uvedeny v Tab. 4.

Tab. 4 - Vyhodnocení sledovaných parametrů

Parametr	Hodnota na výkresu	Reálná hodnota	
d [mm]	$0,5 \pm 0,01$	0,49959	<i>vyhovuje toleranci</i>
t [μm]	40 ± 4	37	<i>vyhovuje toleranci</i>
Ra [μm]	0,4	0,318	<i>vyhovuje toleranci</i>
Sa [μm]	0,6	0,71	<i>nevyhovuje toleranci</i>
<i>kruhovitost</i> [mm]	0,02	0,004719	<i>vyhovuje toleranci</i>

4.6.1 Diskuze k experimentu

Výsledky analýzy přesnosti výroby v rámci experimentu jsou uspokojivé s výjimkou drsnosti povrchu funkční plochy membrány, která přesahuje povolenou toleranci. Drsnost povrchu membrány je vzhledem k její celkové tloušťce ($40 \pm 4 \mu\text{m}$) nezanedbatelnou lokální změnou rozměru, která by mohla mít vliv na rozložení napětí při její deformaci. Nerovnoměrné napětí by následně mohlo zhoršit přesnost vyhodnocovaného průhybu membrány nebo na obrobeném povrchu zapříčinit vznik trhlin případně i celkové zničení. S ohledem na myšlenou aplikaci proto byla velikost tolerance drsnosti navržena jako procentuální část (1,5 %) její celkové tloušťky. Vzhledem k nedodržení tolerance drsnosti povrchu by proto bylo zajímavé experiment obohatit o další pokračování, konkrétně testování závislosti mezi parametry kvalitativně popisující povrch a parametry nastavení laserového procesu obrábění, z nichž jakost povrchu ovlivňuje zejména intenzita laserového paprsku, překryv pulsů a případně strategie šrafování.

5 Závěr

Cílem této práce bylo vypracovat rešerši v oblasti MEMS a ultrakrátkopulsních laserů a na základě této rešerše navrhnout a realizovat experiment výroby MEMS komponenty s využitím UKP laseru.

Rešerše byla zpracována v teoretické části práce, která je rozdělena do dvou hlavních kapitol, z nichž první se věnuje problematice MEMS. Zde jsou MEMS definovány, je zde vypracovaná jejich kategorizace, v rámci níž jsou uvedeny také příklady aplikací MEMS a jsou zde popsány také vybrané technologie a materiály pro výrobu MEMS. Druhá kapitola teoretické části je zaměřena na ultrakrátkopulsní lasery. Zde je především popsán princip vzniku laserového záření, princip generování ultrakrátkých pulsů a interakce mezi laserovým paprskem a materiálem při obrábění.

Experiment v této práci byl soustředěn na návrh a výrobu mikromembrány, jakožto zástupce mechanické komponenty MEMS. V rámci návrhu komponenty byla vytvořena výkresová dokumentace a byl zvolen vhodný materiál pro výrobu membrány, monokrystalický křemík. Experiment pokračoval testováním chování monokrystalického křemíku při obrábění UKP laserem a po zjištění potřebných parametrů nastavení laserového procesu byla navržená membrána vyrobena. Experiment byl dokončen analýzou přesnosti výroby z hlediska rozměrů, geometrie a drsnosti povrchu funkční plochy membrány. Sledované parametry membrány (průměr, tloušťka a kruhovitost) vyhovují výkresem předepsaným tolerancím. Skutečnost, že nebylo dosaženo předepsané drsnosti obrobeného povrchu, nedevaluje výsledky experimentu, ale pouze ukazuje na to, že by experiment bylo vhodné rozšířit o další testování vlivu parametrů laserového procesu na výsledný povrch. Celkově výsledky experimentu demonstrují dobrou použitelnost technologie UKP laserů pro mikroobrábění v oblasti MEMS.

6 Bibliografie

- [1] TAI-RAN, Hsu. *Miniaturization - a paradigm shift in advanced manufacturing and education*. California, 2002.
- [2] JUDY, Jack. Microelectromechanical systems (MEMS): fabrication, design and applications. *Smart Materials and Structures*. IOP Publishing, 2001, **2001**(10), 1115-1134.
- [3] HUSÁK, Miroslav. Užití MEMS v průmyslu. *AUTOMA*. 2008, **2008**(12).
- [4] HUSÁK, Miroslav. MEMS a mikrosystémové technologie. *AUTOMA*. 2008, **2008**(11).
- [5] *An Introduction to MEMS*. Loughborough: PRIME Faraday Partnership, 2002. ISBN 1-84402-020-7.
- [6] GHODSSI, Reza a Pinyen LIN, ed. *MEMS: Materials and Processes Handbook*. Boston, MA: Springer, 2011. ISBN 978-0-387-47318-5.
- [7] *MEMSnet* [online]. Reston [cit. 2020-03-04]. Dostupné z: <https://www.memsnet.org/>
- [8] WANG XINLI, , CUI SHUMEI a CHENG SHUKANG. Advantages of electrostatic micromotor and its application to medical instruments. *Conference Record of the 2002 IEEE Industry Applications Conference. 37th IAS Annual Meeting (Cat. No.02CH37344)*. IEEE, 2002, , 2466-2468. DOI: 10.1109/IAS.2002.1042792. ISBN 0-7803-7420-7. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/1042792/>
- [9] VOJÁČEK, Antonín. Co se skrývá pod zkratkou MOEMS ?. *Vyvoj.hw.cz profesionální elektronika* [online]. 2009 [cit. 2020-03-15]. Dostupné z: <https://vyvoj.hw.cz/teorie-a-praxe/dokumentace/co-se-skryva-pod-zkratkou-moems.html>
- [10] FÖLL, Helmut. The Texas Instrument DLP Chip. *Christian-Albrechts-Universität zu Kiel* [online]. Kiel [cit. 2020-03-15]. Dostupné z: https://www.tf.uni-kiel.de/matwis/amat/semitech_en/kap_7/illustr/i7_1_2.html
- [11] *Texas Instruments* [online]. Dostupné z: <http://www.ti.com>

- [12] PROKOP, Daniel. *Rozbor a konstrukce optického laditelného vláknového útlumového článku pro telekomunikační aplikace*. Brno, 2018.. Diplomová práce. VUT.
- [13] LEE, Chengkuo a RueyShing HUANG. Advances in MEMS Based Planar VOA. *Journal of Semiconductor Technology and Science*. 2007, 7(3).
- [14] *Sensirion: The sensor company* [online]. [cit. 2020-03-17]. Dostupné z: <https://www.sensirion.com>
- [15] MARKKU, Tilli. *Handbook of silicon based MEMS materials and technologies* [online]. Amsterdam: Elsevier Science & Technology Books, 2010 [cit. 2020-03-04]. ISBN 9780815519881. Dostupné z: <https://ebookcentral.proquest.com/>
- [16] LAST, Arndt. LIGA-process. *X-ray optics* [online]. Karlsruhe [cit. 2020-03-21]. Dostupné z: <http://www.x-ray-optics.de/index.php/en/10-hauptkategorie-en/208-liga-process>
- [17] ZORMAN, Christian a Mehran MEHREGANY. Material Aspects of Micro- and Nanoelectromechanical Systems. *Springer Handbook of Nanotechnology*. Berlin: Springer, 2007. ISBN 978-3-540-29857-1.
- [18] BUCHFINK, Gabriela, Nikola LEIBINGER-KAMMÜLLER, ed. *The Laser as a Tool*. 1. Vogel Communications Group, 2007. ISBN 978-3-8343-3072-7.
- [19] SKÁCELOVÁ, Dana. *Fyzikální princip laseru* [online]. [cit. 2020-05-09]. Dostupné z: https://is.muni.cz/el/1431/podzim2007/F7050/4593943/Fyzikalni_princip_laseru-Skacelova_Dana.pdf
- [20] LAPŠANSKÁ, Hana. *Laserové technologie v praxi* [online]. [cit. 2020-05-09]. Dostupné z: <https://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/granty/laser.pdf>
- [21] Laser. *Czechlasers* [online]. [cit. 2020-05-09]. Dostupné z <http://czechlasers.cz/studovna/laser-2/>
- [22] GREITEMANN, Jonas. Population Inversion can be Achieved in a Three-Level System. *Chemistry libretexts* [online]. California [cit. 2020-05-11]. Dostupné z: https://chem.libretexts.org/Courses/Pacific_Union_College/Quantum_Chemistry/15%3A__Lasers%2C__Laser__Spectroscopy%2C__and__Photochemistry/15.04%3A__Population__Inversion__can__be__Achieved__in__a__Three-Level__System
- [23] THOSS, Andreas. Fraunhofer institutes to develop 20 kW USP laser. *Laser Focus World* [online]. 2018 [cit. 2020-05-12]. Dostupné

z: <https://www.laserfocusworld.com/blogs/article/16571767/fraunhofer-institutes-to-develop-20-kw-usp-laser>

- [24] RUDY, Charles, Michel DIGONNET a Robert BYER. Advances in 2- μ m Tm-doped mode-locked fiber lasers. *Optical Fiber Technology* [online]. 2014, **20**(6) [cit. 2020-05-12]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1068520014000923#f0005>
- [25] RÜDIGER, Paschotta. Mode Locking. *RP Photonics Encyclopedia* [online]. [cit. 2020-05-12]. Dostupné z: https://www.rp-photonics.com/mode_locking.html
- [26] KRUEGER, Arnd a Philippe FÉRU. Getting Practical. *SPIE* [online]. 2004 [cit. 2020-05-12]. Dostupné z: <https://spie.org/news/getting-practical?SSO=1>
- [27] RÜDIGER, Paschotta. Active Mode Locking. *RP Photonics Encyclopedia* [online]. [cit. 2020-05-12]. Dostupné z: https://www.rp-photonics.com/active_mode_locking.html
- [28] RÜDIGER, Paschotta. Passive Mode Locking. *RP Photonics Encyclopedia* [online]. [cit. 2020-05-12]. Dostupné z: https://www.rp-photonics.com/passive_mode_locking.html
- [29] RÜDIGER, Paschotta. Chirped-pulse Amplification. *RP Photonics Encyclopedia* [online]. [cit. 2020-06-15]. Dostupné z: https://www.rp-photonics.com/chirped_pulse_amplification.html?s=ak
- [30] RÜDIGER, Paschotta. Cavity dumping. *RP Photonics Encyclopedia* [online]. [cit. 2020-05-13]. Dostupné z: https://www.rp-photonics.com/cavity_dumping.html
- [31] LUCAS, Lonnie a Jim ZHANG. Femtosecond laser micromachining: A back-to-basics primer. *Industrial Laser Solutions for Manufacturing* [online]. 2012 [cit. 2020-05-14]. Dostupné z: <https://www.industrial-lasers.com/micromachining/article/16485321/femtosecond-laser-micromachining-a-backto-basics-primer>
- [32] RÜDIGER, Paschotta. Titanium–sapphire Lasers. *RP Photonics Encyclopedia* [online]. [cit. 2020-05-15]. Dostupné z: https://www.rp-photonics.com/titanium_sapphire_lasers.html
- [33] RÜDIGER, Paschotta. Ytterbium-doped Gain Media. *RP Photonics Encyclopedia* [online]. [cit. 2020-05-15]. Dostupné z: https://www.rp-photonics.com/ytterbium_doped_gain_media.html

- [34] RÜDIGER, Paschotta. Neodymium-doped Gain Media. *RP Photonics Encyclopedia* [online]. [cit. 2020-05-15]. Dostupné z: https://www.rp-photonics.com/neodymium_doped_gain_media.html
- [35] RÜDIGER, Paschotta. Fiber Lasers. *RP Photonics Encyclopedia* [online]. [cit. 2020-05-15]. Dostupné z: https://www.rp-photonics.com/fiber_lasers.html
- [36] HAMAD, Abubaker. Effects of Different Laser Pulse Regimes (Nanosecond, Picosecond and Femtosecond) on the Ablation of Materials for Production of Nanoparticles in Liquid Solution. *High Energy and Short Pulse Lasers* [online]. InTech, 2016 [cit. 2020-05-14]. DOI: 10.5772/63892. ISBN 978-953-51-2606-5. Dostupné z: <http://www.intechopen.com/books/high-energy-and-short-pulse-lasers/effects-of-different-laser-pulse-regimes-nanosecond-picosecond-and-femtosecond-on-the-ablation-of-ma>
- [37] STEEN, William. *Laser Material Processing* [online]. 4th Edition. London: Springer, 2010 [cit. 2020-05-14]. ISBN 978-1-84996-062-5.
- [38] CHANDLER, David. Explained: Phonons. *MIT News* [online]. [cit. 2020-05-15]. Dostupné z: <http://news.mit.edu/2010/explained-phonons-0706>
- [39] Kvazičástice. *Aldebaran* [online]. Praha [cit. 2020-05-15]. Dostupné z: <https://www.aldebaran.cz/zvuky/blyskani/docs/38.html>
- [40] WU, Chen, Xudong FANG, Feng LIU, Xin GUO, Ryutaro MAEDA a Zhuangde JIANG. High speed and low roughness micromachining of silicon carbide by plasma etching aided femtosecond laser processing. *Ceramics International*. 2020, **46**(11), 17896-17902. DOI: 10.1016/j.ceramint.2020.04.097. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0272884220310427>
- [41] DONG, Yuanyuan, Rajeev NAIR, Raathai MOLIAN a Pal MOLIAN. Femtosecond-pulsed laser micromachining of a 4H-SiC wafer for MEMS pressure sensor diaphragms and via holes. *Journal of Micromechanics and Microengineering*. 2008, **18**(3). DOI: 10.1088/0960-1317/18/3/035022. Dostupné z: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0960-1317/18/3/035022>
- [42] GUPTA, Saurabh a Pal MOLIAN. *Design of laser micromachined single crystal 6H-SiC diaphragms for high-temperature micro-electro-mechanical-system pressure sensors*. 2011, **32**(1), 127-132. DOI: 10.1016/j.matdes.2010.06.024. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0261306910003997>

- [43] ZHAO, You, Yu-Long ZHAO a Lu-Kang WANG. Application of femtosecond laser micromachining in silicon carbide deep etching for fabricating sensitive diaphragm of high temperature pressure sensor. *Sensors and Actuators A: Physical*. 2020, **309**. DOI: 10.1016/j.sna.2020.112017. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924424720302387>
- [44] ZEHETNER, J., S. KRAUS, M. LUCKI, G. VANKO, J. DZUBA a T. LALINSKY. Manufacturing of membranes by laser ablation in SiC, sapphire, glass and ceramic for GaN/ferroelectric thin film MEMS and pressure sensors. *Microsystem Technologies*. 2016, **22(7)**, 1883-1892. DOI: 10.1007/s00542-016-2887-2. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s00542-016-2887-2>
- [45] SIMSEK, Emrah, Ben PECHOLT, Charles EVERSON a Pal MOLIAN. High-pressure deflection behavior of laser micromachined bulk 6H-SiC MEMS sensor diaphragms. *Sensors and Actuators A: Physical*. 2010, **162(1)**, 29-35. DOI: 10.1016/j.sna.2010.06.018. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924424710002803>
- [46] VANKO, Gabriel, Peter HUDEK, Johann ZEHETNER et al. Bulk micromachining of SiC substrate for MEMS sensor applications. *Microelectronic Engineering*. 2013, **110**, 260-264. DOI: 10.1016/j.mee.2013.01.046. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0167931713000816>
- [47] SIMSEK, Emrah, Michelle BUEHLER, Ben PECHOLT a Pal MOLIAN. *Mechanical behavior of laser micro-machined bulk 6H-SiC diaphragms*. 2010, **31(8)**, 3605-3609. DOI: 10.1016/j.matdes.2010.02.035. Dostupné z <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0261306910001366>
- [48] PRAMANIK, C, H SAHA a U GANGOPADHYAY. Design optimization of a high performance silicon MEMS piezoresistive pressure sensor for biomedical applications. *Journal of Micromechanics and Microengineering*. 2006, **16(10)**, 2060-2066. DOI: 10.1088/0960-1317/16/10/019. Dostupné z: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0960-1317/16/10/019>
- [49] FERREIRA, C., C. GRINDE, R. MORAIS, A. VALENTE, C. NEVES a M. REIS. Optimized Design of a Piezoresistive Pressure Sensor with Measurement Span of 1MPa. *Procedia Engineering*. 2012, **47**, 1307-1310. DOI: 10.1016/j.proeng.2012.09.395. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S187770581204458X>
- [50] MOLIAN, Pal, Ben PECHOLT a Saurabh GUPTA. Picosecond pulsed laser ablation and micromachining of 4H-SiC wafers. *Applied Surface Science*.

2009, **255**(8), 4515-4520. DOI: 10.1016/j.apsusc.2008.11.071. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0169433208024252>

- [51] SANNER, N., O. UTÉZA, B. BUSSIERE, G. COUSTILLIER, A. LERAY, T. ITINA a M. SENTIS. Measurement of femtosecond laser-induced damage and ablation thresholds in dielectrics. *Applied Physics A*. 2009, **94**(4), 889-897. DOI: 10.1007/s00339-009-5077-6. ISSN 0947-8396. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s00339-009-5077-6>
- [52] NATHALA, Chandra, Ali AJAMI, Wolfgang HUSINSKY, Bilal FAROOQ, Sergey KUDRYASHOV, Albena DASKALOVA, Irina BLIZNAKOVA a Andreas ASSION. Ultrashort laser pulse ablation of copper, silicon and gelatin: effect of the pulse duration on the ablation thresholds and the incubation coefficients. *Applied Physics A*. 2016, **122**(2), 889–897. DOI: 10.1007/s00339-016-9625-6. ISSN 0947-8396. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s00339-016-9625-6>
- [53] BONSE, J., S. BAUDACH, J. KRÜGER, W. KAUTEK a M. LENZNER. Femtosecond laser ablation of silicon–modification thresholds and morphology. *Applied Physics A*. 2002, **74**(1), 19-25. DOI: 10.1007/s003390100893. ISSN 0947-8396. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s003390100893>
- [54] THORSTENSEN, Jostein a Sean ERIK FOSS. Temperature dependent ablation threshold in silicon using ultrashort laser pulses. *Journal of Applied Physics*. 2012, **112**(10). DOI: 10.1063/1.4766380. ISSN 0021-8979. Dostupné z: <http://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.4766380>
- [55] ČERMÁK, Adam. *LASER v procesech mikroobrábění monolitních řezných nástrojů*. Plzeň, 2017.. Disertace. Západočeská univerzita, Fakulta strojní.