



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV FYZIKÁLNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF PHYSICAL ENGINEERING

VÝVOJ A VÝROBA MIKROELEKTROMECHANICKÝCH SYSTÉMŮ MEMS

DEVELOPMENT AND FABRICATION OF MICROELECTROMECHANICAL SYSTEMS MEMS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

LUKÁŠ KOŇAŘÍK

VEDOUcí PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. ZDENĚK NOVÁČEK, Ph.D.

BRNO 2024

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav fyzikálního inženýrství
Student: **Lukáš Koňářik**
Studijní program: Fyzikální inženýrství a nanotechnologie
Studijní obor: bez specializace
Vedoucí práce: **Ing. Zdeněk Nováček, Ph.D.**
Akademický rok: 2023/24

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

Vývoj a výroba mikroelektromechanických systémů MEMS

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Mikroelektromechanické prvky jsou nedílnou součástí moderních laboratorních, průmyslových i dopravních či medicínských systémů. Využívají se především jako senzory (akcelerometry, gyroskopy, barometry, ...) nebo zdroje pohybu v mikrometrovém měřítku.

Cílem práce je seznámit se s procesem výroby MEMS a jeho využitím při výrobě termomechanického aktuátoru požadovaných vlastností.

Cíle bakalářské práce:

- Popište základní vlastnosti a metody výroby MEMS prvků.
- Provedte návrh termomechanického aktuátoru.
- Prověřte možnosti výroby navrženého aktuátoru v laboratořích ÚFI VUT / CEITEC.

Seznam doporučené literatury:

GAD-EL-HAK, Mohamed. The MEMS handbook. Boca Raton: CRC Press, 2002. ISBN 0-8493-0077-0.

Handbook of Silicon Based MEMS Materials and Technologies. Online. Elsevier, 2010. ISBN 9780815515944. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/C2009-0-19030-X>.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2023/24

V Brně, dne

L. S.

prof. RNDr. Tomáš Šíkola, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.
děkan fakulty

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá mikroelektromechanickými systémy MEMS. V první části práce jsou obecně popsány aplikační oblasti těchto systémů společně s konkrétními případy. Dále jsou zde detailně vysvětleny simulace v programu COMSOL Multiphysics, stejně jako výčet fyzikálních principů technologií MEMS systémů. V praktické části jsou uvedeny modely elektrostatického aktuátoru a termomechanického aktuátoru. Práce zachycuje jednotlivé kroky výroby od prvotního substrátu až po finální strukturu. Součástí tohoto procesu je řezání vzorků pomocí laserové řezačky, spin coating, optická litografie, nanášení vodivé kovové vrstvy na evaporátoru, lift-off, leptání struktury technikou hloubkového reaktivního iontového leptání, leptání kyselinou fluorovodíkovou a bondování do elektrického obvodu. Všechny kroky jsou zdokumentovány a provedeny ve sdílených laboratořích Středoevropského Technologického Institutu CEITEC Nano. V závěru jsou shrnuty a diskutovány výsledky celého výrobního procesu.

Summary

This bachelor thesis deals with MEMS microelectromechanical systems. In the first part of the thesis the application areas of these systems are described in general together with specific cases. In addition, COMSOL Multiphysics simulations are explained in detail, as well as an enumeration of the physical principles of MEMS system technologies. In the practical part, models of an electrostatic actuator and a thermomechanical actuator are presented. The work depicts the different steps of fabrication from the initial substrate to the final structure. This process includes cutting the samples using a laser dicer, spin coating, optical lithography, depositing a conductive metal layer on an evaporator, lift-off, etching the structure using a deep reactive ion etching technique, hydrofluoric acid etching, and bonding to an electrical circuit. All steps are documented and performed in the shared laboratories of the Central European Institute of Technology CEITEC Nano. Finally, the results of the whole fabrication process are summarized and discussed.

Klíčová slova

Mikroelektromechanické systémy, MEMS, termomechanický aktuátor, elektromechanický aktuátor.

Keywords

Microelectromechanical systems, MEMS, thermomechanical actuator, electromechanical actuator.

KOŇAŘÍK, L. *Vývoj a výroba mikroelektromechanických systémů MEMS*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2024. 46 s. Vedoucí Ing. Zdeněk Nováček, Ph.D.

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma *Vývoj a výroba mikroelektromechanických systémů MEMS* vypracoval samostatně pod odborným vedením Ing. Zdeňka Nováčka, Ph.D., s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který tvoří přílohu této práce.

.....

Datum

.....

Lukáš Koňářík

Na tomto místě bych chtěl poděkovat svému vedoucímu Ing. Zdeňku Nováčkovi, Ph.D., za příkladné vedení a jeho cenné rady. Dále děkuji Ing. Lukáši Zezulkovi, který mě naučil základy práce v čistých prostorách a vždy mi neváhal pomoci a poradit. Také bych chtěl poděkovat Ing. Radimu Zahradníčkovi, Ph.D., za nesčetné konzultace ohledně optické litografie a leptání v plazmatu. Děkuji Ing. Jakubu Zlámalovi, Ph.D., za rady při práci na simulacích v programu COMSOL Multiphysics. Dále děkuji firmě onsemi za poskytnutí waferu pro výrobu mikroelektromechanických systémů. Část práce byla provedena za podpory výzkumné infrastruktury CzechNanoLab (ID LM2023051, MŠMT, 2023–2026), CEITEC Vysoké učení technické v Brně. Velký dík patří mé rodině, která mě vždy podporovala ve studiu. Speciální poděkování patří mé přítelkyni, která mě vždy po dlouhých hodinách strávených v laboratoři vyslechla a dodala mi energii pokračovat.

Lukáš Koňářík

Obsah

Úvod	1
1 Mikroelektromechanické systémy	3
1.1 MEMS a mikroskopy atomárních sil	3
1.2 Aplikace MEMS	5
1.2.1 Akcelerometr, gyroskop	5
1.3 Fyzikální principy v MEMS technologiích	7
1.3.1 Elektrická kapacita a elektrostatická síla	7
1.3.2 Piezoelektrický jev	8
1.3.3 Termoelektrický jev	9
1.3.4 Teplotní roztažnost	10
1.4 COMSOL Multiphysics	11
1.4.1 Simulace MEMS v programu COMSOL Multiphysics	12
1.4.2 Metoda konečných prvků	13
2 Vlastní návrh MEMS systému	15
2.1 Termomechanický aktuátor	15
2.2 Elektrostatický aktuátor	16
2.3 Výroba	18
2.3.1 Křemíkový wafer, řezání na jednotlivé vzorky	18
2.3.2 Optická litografie	20
2.3.3 Čištění vzorku v plazmatu	22
2.3.4 Nanesení vodivé kovové vrstvy	23
2.3.5 Hlubkové reaktivní iontové leptání	25
2.3.6 Leptání v kyselině fluorovodíkové	30
2.3.7 Kontaktování	32
2.4 Výsledky	33
2.4.1 Termomechanický aktuátor	34
2.4.2 Elektrostatický aktuátor	36
Závěr	39
Seznam použité literatury	41
Seznam zkratk	45
Seznam příloh	46

Úvod

Snaha o zdokonalení a vylepšení laboratorně i komerčně používané elektrotechniky vede k výrazně častějšímu využití mikroelektromechanických systémů, které byly dříve uplatňovány především v automobilovém a technologickém průmyslu [1]. Mikroelektromechanické systémy (MEMS) označují zařízení, jejichž rozměry se pohybují v rozsahu od jednotek mikrometrů až do jednoho milimetru [2]. Tyto systémy lze definovat jako zařízení, která dokážou převádět elektrický signál na jinou formu energie díky své vhodně navržené mechanické struktuře [3]. Jejich malé rozměry, nízké cenové náklady a široké spektrum využití z nich dělají vhodné téma k podrobnějšímu prozkoumání. Cílem této práce je vytvoření vlastního návrhu mikroelektromechanického systému a následné vyrobení tohoto návrhu.

První část této bakalářské práce pojednává o základních informacích ohledně MEMS systémů a o jejich aplikačním potenciálu v souvislosti s mikroskopem atomárních sil. Dále jsou v ní uvedeny dva typické příklady využití MEMS systémů, se kterými se lze velmi často setkat. Ke svému fungování využívají MEMS různé technologie založené na fyzikálních principech. Proto je v této části také popsáno několik nejčastěji využívaných fyzikálních principů. Zároveň je zde představen program COMSOL Multiphysics, který byl využit pro provedení potřebných simulací.

Hlavní náplní této bakalářské práce bylo vytvoření návrhu a prověření možností výroby MEMS systému. Návrhy byly provedeny dva. Jednalo se termomechanický a elektrostatický aktuátor. Druhá část bakalářské práce začíná ukázkou a popisem funkčnosti vytvořených návrhů v prostředí programu COMSOL Multiphysics. Poté následuje detailní popis všech provedených výrobních kroků, který je doprovázen diskuzí dosažených výsledků. Závěrečná pasáž části vlastního návrhu se věnuje experimentu pozorování výchylky vyrobených aktuátorů. Vyrobené vzorky se po provedení experimentu mohou využít jako učební pomůcka předmětu MEMS a NEMS systémy, jehož výuku zajišťuje Ústav fyzikálního inženýrství.

Poslední část shrnuje dosažené výsledky, zhodnocuje provedené výrobní postupy a rozebírá možné alternativní přístupy. Přílohou tohoto textu jsou vytvořené simulace s maskou navrženou pro optickou litografii z programu KLayout.

1. Mikroelektromechanické systémy

MEMS systémy jsou částí průmyslového odvětví, které se zabývá miniaturními elektrickými součástkami. Tyto systémy působí buď samostatně, anebo jsou zakomponovány do většího celku (například spojení snímače rychlosti a integrovaného elektrického obvodu pro autodiagnostiku).

Nespornou výhodou MEMS systémů je jejich velikost a možnost hromadné výroby. Při výrobě nové technologie je zapotřebí vyvinout první návrh, na něm otestovat požadované vlastnosti a až potom převést celý proces do sériové výroby. Větší překážkou v tomto schématu je vytvoření návrhu a vyladění parametrů jednotlivých výrobních postupů. Převedení do velkovýroby je už pouze otázkou dostupnosti potřebných zařízení. Část 2.3 této práce je věnována výrobě, při které bylo zapotřebí některé výrobní kroky zopakovat několikrát, pokaždé s pozměněným postupem a jinými vstupními hodnotami.

Kvůli požadavku na velikost výsledného zařízení je nutné přistoupit k použití výrobních postupů, které vyžadují hlubší znalosti fyzikálních jevů. Do takových postupů můžeme zařadit využití technologie plazmatu, technologie svazku částic (ionty, atomy, molekuly, elektrony) nebo laserové technologie.

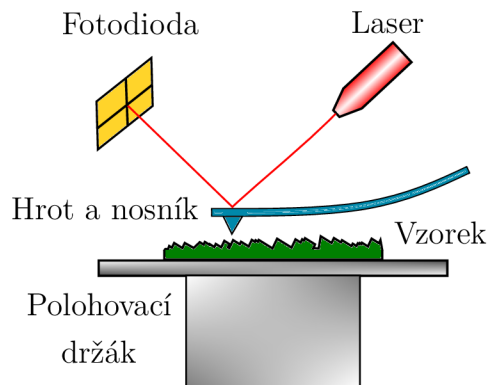
1.1. MEMS a mikroskopy atomárních sil

Existuje spojitost mezi MEMS systémy a mikroskopy atomárních sil¹. AFM je druhem rastrovací sondové mikroskopie, kde pomocí ostrého hrotu přejíždíme po povrchu vzorku a detekujeme atomární síly působící na tento hrot. Hrot je umístěn na ohebném nosníku, jehož průhyb je úměrný silám působícím na něj. Výchylka hrotu může být zaznamenána například laserovým paprskem odraženým od zadní strany nosníku na fotodiodu [4]. Zobrazení tohoto uspořádání je na obrázku 1.1. AFM dokáže pracovat v různých módech, a to v:

- **kontaktním režimu**, kdy hrot přejíždí přímo po povrchu vzorku a je s ním v kontaktu. Existují dva způsoby snímání v tomto režimu: mód konstantní síly a mód konstantní výšky [4]. V režimu konstantní výšky je udržovaná stálá vzdálenost mezi vzorkem a hrotem. Ohyb nosníku potřebný k zachování této výšky udává topografii vzorku. Pro režim konstantní síly je stálý ohyb nosníku a informaci o povrchu vzorku lze získat ze změny vertikální pozice hrotu pro udržení konstantního ohybu.

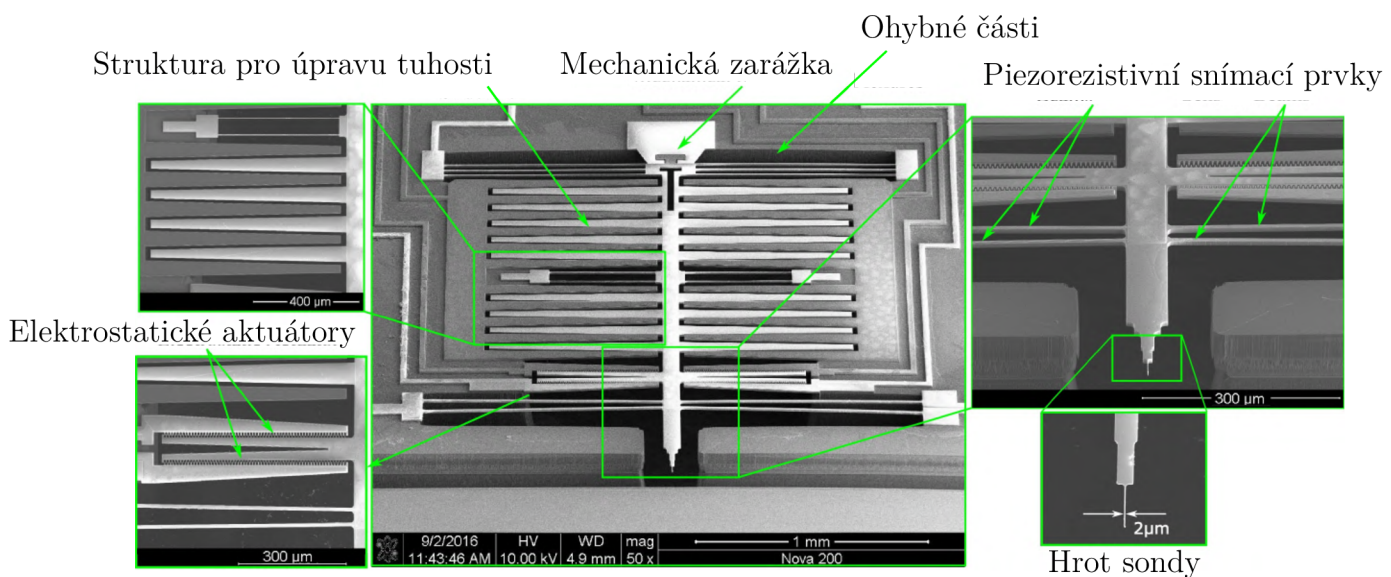
¹Anglicky *Atomic Force Microscopy*, zkráceně AFM.

- **bezkontaktním režimu**, při kterém hrot osciluje na své rezonanční frekvenci nad povrchem vzorku. Když se hrot mikroskopu přiblíží k povrchu, tak Van der Waalsova síla mezi hrotem a vzorkem způsobí změnu rezonanční frekvence hrotu [4]. Jelikož je tato metoda bezkontaktní, tak je její využití vhodné pro měkké vzorky, které se lehce deformují. Zároveň dynamický režim prodlužuje životnost hrotu AFM.



Obrázek 1.1: Schematický náčrt mikroskopu atomárních sil.

- **poklepovém režimu**², který je kombinací bezkontaktního a kontaktního režimu. Hrot je při něm rozkmitán na rezonanční frekvenci a je přiblížen k povrchu vzorku tak, aby hrot při kmitání „poklepával“ na povrch vzorku [5].



Obrázek 1.2: Snímek MEMS AFM sondy z rastrovacího elektronového mikroskopu. Elektrostatické aktuátory, piezorezistivní snímač, struktura pro nastavení tuhosti a hrot sondy jsou zobrazeny v detailních pohledech. Tloušťka zařízení je 10 μm . Převzato z [9].

Většina AFM využívá pro přesné polohování vzorku piezoelektrický jev³ a pro odečtení výchylky hrotu výše popsaný odraz laserového paprsku [6]. Tyto konvenční techniky

²Anglicky *tapping mode*.

³Popisu piezoelektrického jevu je věnována část 1.3.2.

lze nahradit MEMS systémy. Hlavními výhodami použití MEMS jsou jejich výrazně menší rozměry, větší šířka pásma frekvencí pro měření, možnost sériové výroby a rychlejší měření [7, 8]. Příklad zabudování MEMS systému do AFM sondy je zobrazen na obrázku 1.2.

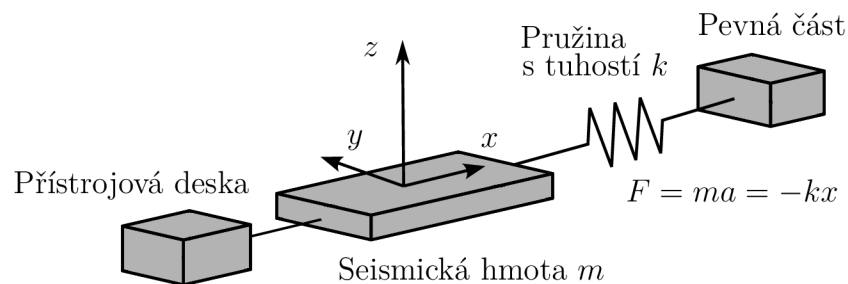
1.2. Aplikace MEMS

Odvětví, kde MEMS systémy najdou své uplatnění, je mnoho. Uvedme zde pár příkladů pro nastínění všestrannosti jejich využití: zařízení pro řízení srdeční činnosti, systémy pro podávání léků (inzulín, analgetika), řízení motorů a pohonů, brzdové a závěsné systémy, bezdrátová elektronika, vojenské aplikace (navádění raket a osobní navigace) nebo miniaturní fluidní systémy pro kontrolu a rozbor tekutin [10].

Jedním z nejčastějších pojmů v aplikacích MEMS systému jsou senzory a aktuátory. Senzor je zařízení, které obvykle převádí neelektrickou veličinu na elektrickou a aktuátor (akční člen) převádí elektrický signál na neelektrickou veličinu [11]. Tato kapitola bude dále zaměřena na konkrétní případy aplikací MEMS systémů, se kterými se lze setkat v každodenním životě.

1.2.1. Akcelerometr, gyroskop

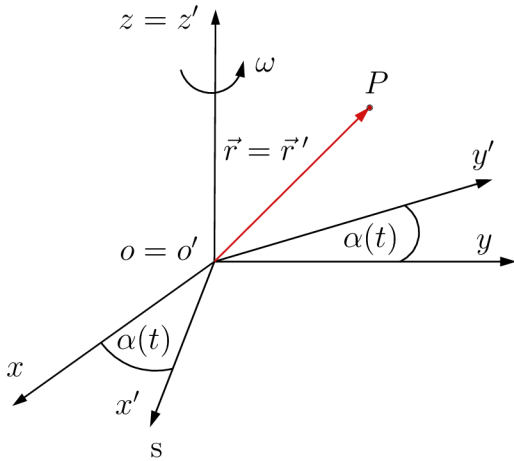
Akcelerometr a gyroskop se využívají například u chytrých hodinek, kde mají za úkol snímat pohyb a monitorovat tak aktivitu uživatele. Akcelerometr dokáže měřit zrychlení a gyroskop úhlovou rychlost. Konstrukce těchto zařízení se skládá ze seismické hmoty, pružiny a přístrojové desky pro měření výchylky [2]. Schematické zobrazení základního principu akcelerometru je zachyceno na obrázku 1.3.



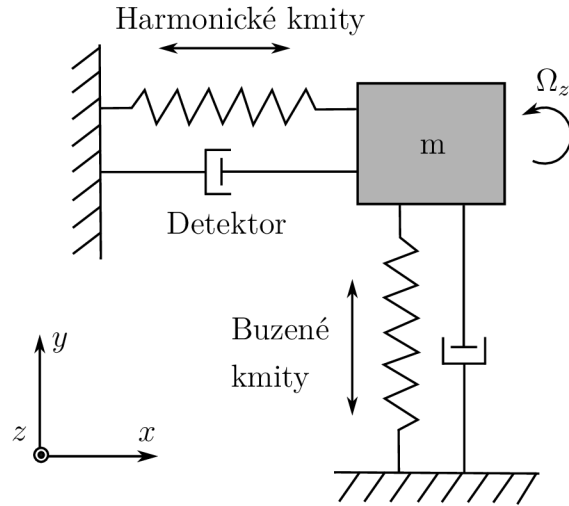
Obrázek 1.3: Schéma akcelerometru.

1.2.1 AKCELEROMETR, GYROSKOP

Hlavní rozdíl mezi akcelerometrem a gyroskopem je ten, že zatímco akcelerometr pracuje v kartézském souřadném systému a registruje kinetickou posouvající sílu, gyroskop je definován ve sférických nebo válcových souřadnicích a působí na něj především Coriolisova síla [12]. Ta zde vystupuje kvůli tomu, že body rotujícího tělesa dále od osy rotace mají vyšší obvodovou rychlost. Dále bude ukázáno, v jakém matematickém tvaru Coriolisova síla působí a jaký vliv má na funkci gyroskopu s dvěma hlavními osami.



Obrázek 1.4: Schéma rotující a fixní soustavy souřadnic.



Obrázek 1.5: Nákres gyroskopu se dvěma osami.

Mějme fixní souřadnicovou soustavu s osami x, y, z a rotující soustavu s osami x', y', z' . Označme bod P , který je umístěný obecně v prostoru. Schéma této situace je na obrázku 1.4. Jelikož počátek obou soustav je totožný, tak platí

$$\vec{r}(t) = \vec{r}'(t) \quad \text{a} \quad \left(\frac{d\vec{r}}{dt} \right)_{\text{fix}} = \left(\frac{d\vec{r}'}{dt} \right)_{\text{fix}}. \quad (1.1)$$

Po rozepsání polohového vektoru v rotující soustavě dostáváme vztah

$$\left(\frac{d\vec{r}}{dt} \right)_{\text{fix}} = \left(\frac{d\vec{r}'}{dt} \right)_{\text{rot}} + \vec{\omega} \times \vec{r}'. \quad (1.2)$$

Rovnice 1.2 popisuje vztah mezi rychlostmi v daných soustavách. Pro výpočet zrychlení rovnici opět zderivujeme podle času ve fixní soustavě. Po rozepsání vztahů dostaneme

$$\vec{a}_{\text{rot}} = \vec{a}_{\text{fix}} - 2\vec{\omega} \times \vec{v}_{\text{rot}} - \dot{\vec{\omega}} \times \vec{r}' - \vec{\omega} \times (\vec{\omega} \times \vec{r}'). \quad (1.3)$$

Druhý člen na pravé straně rovnice odpovídá Coriolisovu zrychlení, třetí Eulerovu zrychlení a čtvrtý odstředivému zrychlení. Pro převedení rovnice do tvaru, který pracuje se silami, stačí obě strany vynásobit hmotností. Vraťme se k našemu praktickému využití

a uvažujme design zařízení na obrázku 1.5. V tomto případě je seismická hmota vychylována harmonickými kmity. Ty mohou být vyvolané elektrostaticky, piezoelektricky, magneticky či jiným zvoleným působením. Ustálená výchylka podél osy x je popsána rovnicí 1.4

$$x(t) = A_x \cos(\omega_x t), \quad (1.4)$$

kde A_x je amplituda a ω_x je úhlová frekvence kmitů. Pakliže na těleso působí úhlová rychlost rotace Ω_z , Coriolisovo zrychlení působící na těleso je dáno rovnicí:

$$a_y = 2 \Omega_z \times \frac{dx(t)}{dt} = -2 \Omega_z A_x \omega_x \sin(\omega_x t). \quad (1.5)$$

Je tedy jasné, že vibrace podél osy y způsobuje Coriolisova síla a měřením výchylky tělesa na této ose jsme schopni určit úhlovou rychlost, která způsobila vychýlení.

1.3. Fyzikální principy v MEMS technologiích

MEMS systémy se velmi často používají jako senzory, které nejčastěji využívají kapacitní, piezoelektrické anebo termoelektrické technologie [13]. Proto se tato část práce věnuje popisu těchto tří fyzikálních principů, které se uplatňují v MEMS systémech. Dalším důležitým jevem pro případ jednoho z navržených aktuátorů je teplotní roztažnost, a proto je jedna sekce této části věnována vysvětlení vzniku teplotní roztažnosti na atomové úrovni.

1.3.1. Elektrická kapacita a elektrostatická síla

Běžné mechanické aktuátory jsou zřídka řízeny elektrostatickou silou, protože tato síla je obvykle příliš malá na to, aby posunula nebo zvedla mechanické části. S miniaturizací mechanických konstrukcí se elektrostatická síla stává vhodnou pro využití [14]. V této pasáži textu bude popsáno, na jakém principu působí normálová elektrostatická síla, a v části 2.2 bude uveden popis síly v konkrétní geometrii vyráběného návrhu.

Uvažujme dvě paralelní desky kondenzátoru, kde jedna je pevně zafixovaná a druhá je pohyblivá ve směru normály. Na jedné je elektrický náboj $+Q$ a na druhé $-Q$. Pakliže

jsou desky velice blízko u sebe, tak vykonaná práce pro posun pohyblivé desky od fixní je rovna energii kondenzátoru⁴. Lze tedy napsat, že:

$$W = Fd = \frac{1}{2}QU, \quad (1.6)$$

kde F je elektrostatická síla, d je vzdálenost, o kterou se pohyblivá deska posunula a U je napětí na kondenzátoru. Elektrická kapacita, což je schopnost součástky uchovávat elektrický náboj, je definována jako

$$C(x) = \frac{Q}{U} = \frac{S\varepsilon_0\varepsilon_r}{d}, \quad (1.7)$$

kde S je plocha desek kondenzátoru, d vzdálenost těchto desek, ε_0 permitivita vakua a ε_r relativní permitivita prostředí mezi deskami. Po dosazení tohoto vztahu do rovnice 1.6 a vyjádření je tvar pro elektrostatickou sílu dán jako:

$$F = \frac{S\varepsilon_0\varepsilon_r}{2d^2}U^2. \quad (1.8)$$

Na výsledku je zajímavé to, že pokud dojde ke změně rozměrů plochy (šířky a délky) elektrody a změně vzdálenosti mezi oběma elektrodami ve stejném poměru, tak se velikost síly zachová i při snižování rozměrů. Tohoto faktu lze využít při aplikacích MEMS systémů [13].

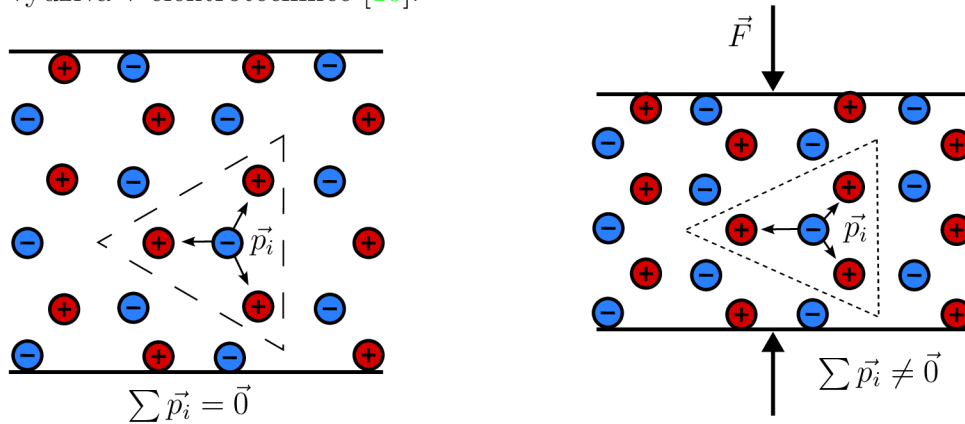
1.3.2. Piezoelektrický jev

Určité druhy krystalů vykazují schopnost vytvářet elektrické pole při působení vnější síly. Naopak v reakci na vnější elektrické napětí se prostorově rozpínají nebo smršťují. Toto chování krystalů se souhrnně nazývá piezoelektrický jev a elektrostrike [15]. Při aplikaci elektrického napětí je zapotřebí dbát na to, aby teplota v krystalu nepřekročila kritickou hodnotu, která se nazývá Curieova teplota [10]. Nad touto teplotou materiál ztrácí své piezoelektrické vlastnosti. Aplikací potenciál piezoelektrických materiálů pro MEMS systémy spočívá především v senzorech a aktuátorech.

Fyzikální princip piezoelektrického jevu vysvětluje asymetrie rozložení elektrických nábojů uvnitř elementární buňky krystalu. Když na krystal s takovou asymetrií zapůsobí vnější síla, dojde ke vzniku elektrických dipólových momentů napříč celým krystalem. Sečtením těchto jednotlivých dipólů v celém krystalu získáme celkovou elektrickou pola-

⁴Zároveň je ale posun dostatečně malý v porovnání s rozměry desek. Tento předpoklad je nutný pro zachování aproximace homogenního elektrického pole mezi deskami.

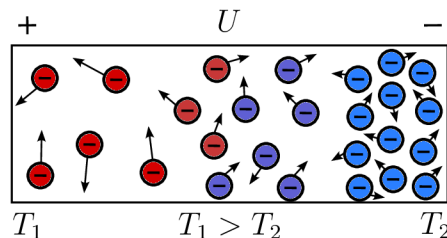
rizaci a elektrické pole uvnitř materiálu [10]. Pouze krystal s elementárními buňkami, které postrádají střed symetrie, vykazuje piezoelektrické vlastnosti. Symetrické elementární buňky netvoří piezoelektrický krystal, protože součet elektrických dipólů uvnitř celého krystalu je téměř nulový, a to i v přítomnosti vnějšího mechanického napětí. Nákres výše popsané situace je na obrázku 1.6. Příkladem piezoelektrického materiálu je křemen, který se využívá v elektrotechnice [10].



Obrázek 1.6: Znáornění piezoelektrického jevu na příkladu dvourozměrného krystalu. Celkový součet elektrických dipólů je při působení vnějšího mechanického napětí nenulový.

1.3.3. Termoelektrický jev

Interakce mezi elektřinou a teplotou bez působení magnetického pole je významná třemi různými termoelektrickými jevy: Seebeckovým, Peltierovým a Thomsonovým [10]. Termoelektrický jev popisuje přímou přeměnu teplotních rozdílů na elektrické napětí a naopak. Nejčastěji používaným jevem v elektrotechnice a MEMS aplikacích je Seebeckův jev (například v termočláncích⁵), a proto je tato část textu zaměřena pouze na něj.



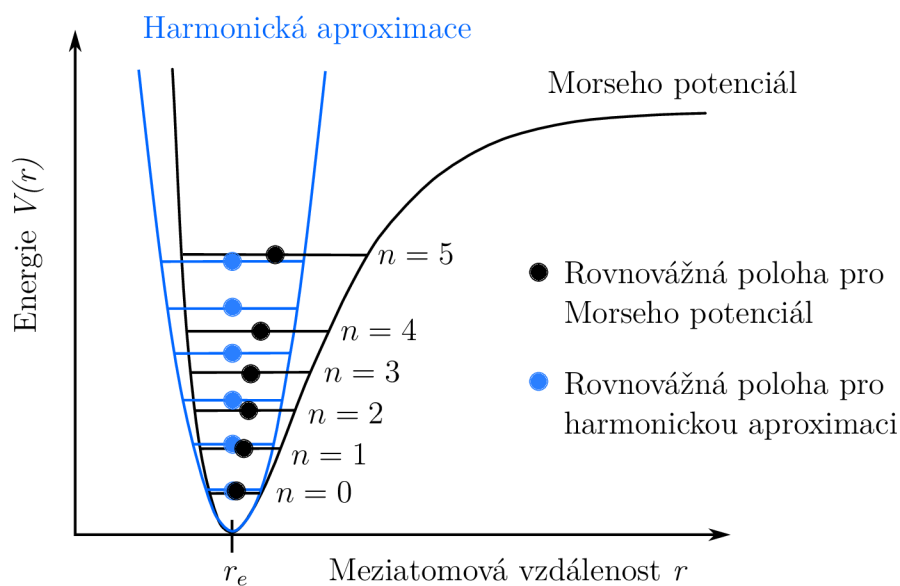
Obrázek 1.7: Schematické zobrazení pohybu a koncentrace elektronů napříč vodičem s různými teplotními oblastmi. Délka šipky u elektronů reprezentuje velikost jejich kinetické energie.

⁵Termočlánek je elektrická součástka, která se využívá jako teplotní čidlo.

Při Seebeckově jevu teplotní gradient vytváří měřitelné elektrické napětí. Volné elektrony v kovu mají v oblasti s vyšší teplotou větší kinetickou energii než ty v oblastech s nižší teplotou. Tuto kinetickou energii elektrony spotřebují na přesun do oblasti s nižší energií, tedy i nižší teplotou. V důsledku této tepelně indukované difuze elektronů se horká oblast ve srovnání s opačným koncem vodiče nabíjí kladně a studená oblast záporně. Takto vzniká elektrické napětí [16]. Popsaná situace je znázorněna na obrázku 1.7.

1.3.4. Teplotní roztažnost

Při změně teploty tělesa dochází ke změně jeho rozměrů. Tento děj je označován jako teplotní roztažnost. Většina materiálů se při zvyšující se teplotě rozpíná. Pro vysvětlení tohoto faktu je vhodné aproximovat vazby mezi atomy v látce pružinami a popsat jejich potenciální energii v závislosti na meziatomové vzdálenosti Morseho potenciálem. Morseho potenciál je zde použit proto, že ním lze popsat vlastnosti kovů, o kterých se v souvislosti s teplotní roztažností mluví nejčastěji [17].



Obrázek 1.8: Grafické zobrazení Morseho potenciálu a harmonické aproximace v závislosti na meziatomové vzdálenosti. Vykresleno je pouze prvních pět energetických hladin.

Morseho potenciál je dán jako

$$V(r) = D_e \left(1 - e^{-a(r-r_e)}\right)^2, \quad (1.9)$$

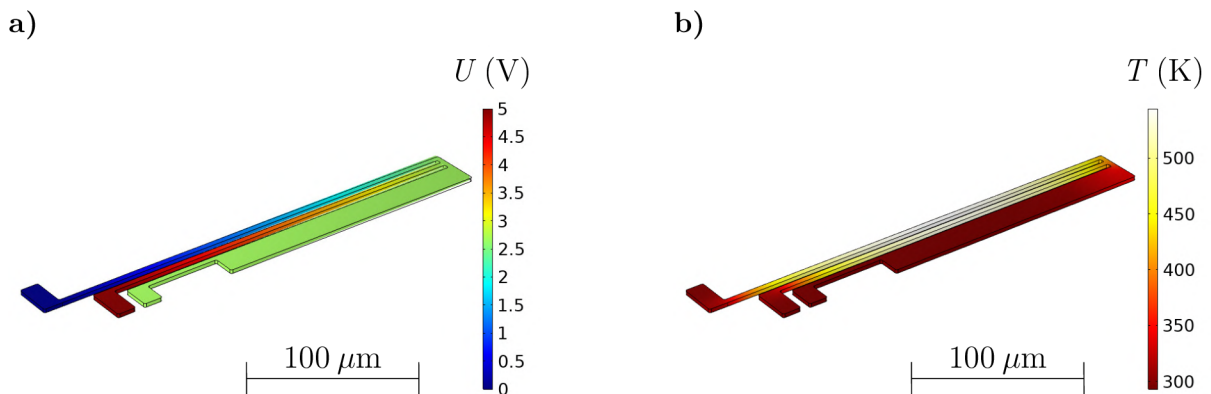
kde D_e je disociační energie, a je parametr související s šířkou jámy, r je meziatomová vzdálenost a r_e je rovnovážná meziatomová vzdálenost [17]. Pro n -tou energii harmonické aproximaci platí vztah:

$$E_n = \hbar\omega \left(n + \frac{1}{2}\right), \quad (1.10)$$

\hbar zde značí redukovanou Planckovu konstantu, ω úhlovou frekvenci kmitů a n je kvantové číslo dané energiové hladiny. Na obrázku 1.8 je patrné, že při vyšších energiových hladinách se hodnota vzdálenosti rovnovážné polohy zvětšuje. Dodané teplo způsobí obsazení vyšších energiových hladin a větší hodnota rovnovážné polohy zapříčiní teplotní roztažnost. Obrázek také ukazuje, že harmonická aproximace teplotní roztažnost nevysvětluje, protože nedochází ke změně rovnovážné polohy.

1.4. COMSOL Multiphysics

Počítačový program COMSOL Multiphysics (dále pouze Comsol) slouží k simulacím fyzikálních dějů a experimentů [18]. Proces simulace začíná vytvořením potřebné geometrie návrhu. Dále následuje volba materiálu z přednastavené knihovny v programu. Všechny materiály mají k sobě přiřazeny vlastnosti, ať už mechanické (Youngův modul, Poissonův poměr), elektrické (elektrická vodivost) nebo teplotní (tepelná vodivost). Poté se na model aplikují potřebné parametry pro zadanou simulaci. Comsol dokáže pomocí prostředí Multiphysics [19] do simulace zahrnout všechny zadané fyzikální veličiny.

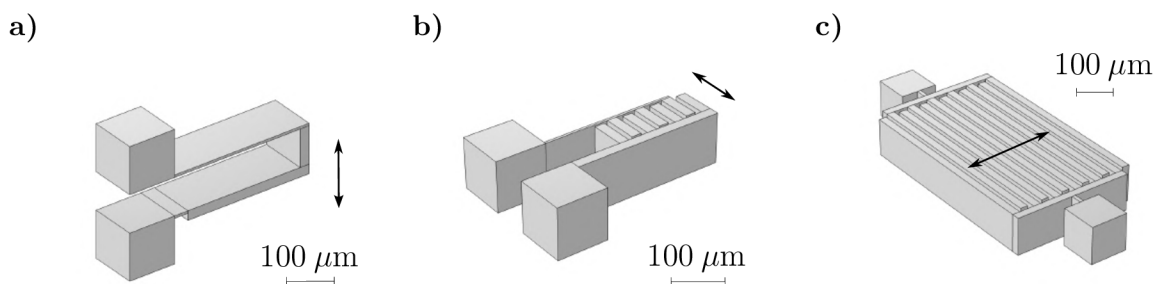


Obrázek 1.9: Simulace z knihovny vzorových modelů COMSOL Multiphysics, převzato z [20]: a) rozložení elektrického potenciálu modelu MEMS, b) rozložení teploty modelu MEMS.

Pro zobrazení výsledků je třeba zvolit typ provedené simulace, kde je na výběr mezi časově nezávislou a závislou studií. Po provedení studie program zobrazí relevantní výsledky, které vyhodnotí na základě zadaných parametrů. Kromě těchto výsledků lze ze simulace odečíst i množství dalších dat. Například pro výsledky deformace program dokáže vypočítat a zobrazit výchylku zvoleného bodu modelu nebo závislost výchylky na teplotě. Comsol také disponuje vlastní knihovnou vzorových modelů, které lze otevřít a nahlédnout do jejich nastavení. Na obrázku 1.9a) a 1.9b) jsou zachyceny výsledky termoaktuátoru, který pochází ze zabudované knihovny modelů v Comsolu.

1.4.1. Simulace MEMS v programu COMSOL Multiphysics

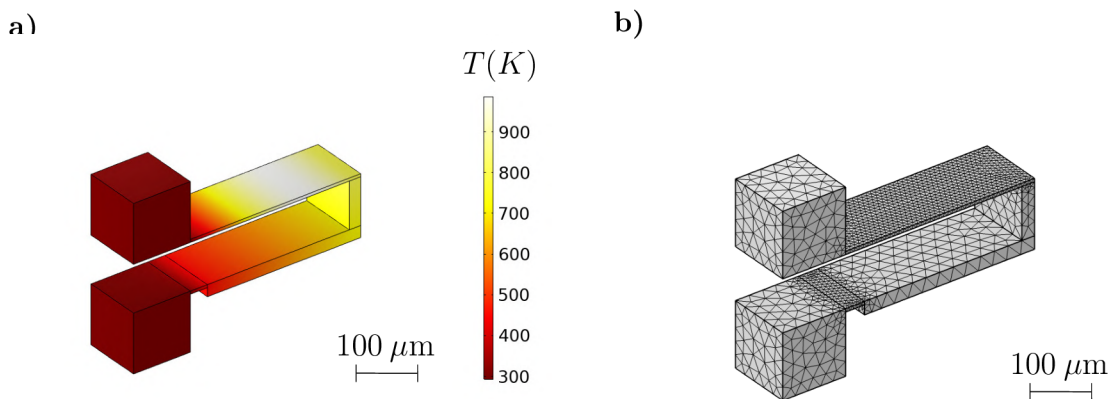
V této části práce bude popsáno krok za krokem nastavení simulací v Comsolu. Fyzikálnímu principu vlastních návrhů modelů a vytvořeným simulacím jsou věnovány sekce 2.1, 2.2 a 2.4. Vytvořené modely MEMS jsou celkem tři. Dva z nich reprezentují elektrostatické aktuátory a jeden termomechanický aktuátor. Modely na obrázcích 1.10a) a 1.10b) byly předlohou výrobního procesu. Model na obrázku 1.10c) byl vytvořen za účelem porovnání změny výchylky při ovlivnění funkční geometrie (zvýšení počtu zubů a zvětšení jejich plochy). Vytvořeným modelům byl vždy přidělen materiál ze zabudované knihovny Comsolu, který se nejvíce podobal použitému materiálu v procesu výroby. Pro elektrostatické modely bylo také zapotřebí vytvořit vnější oblast vyplněnou vzduchem, která sloužila pro určení hraničních podmínek nutných pro výpočet elektrického pole.



Obrázek 1.10: Vytvořené návrhy z programu COMSOL Multiphysics s šipkami značícími směr výchylky: a) termomechanický MEMS, b) první verze elektrostatického MEMS, c) druhá verze elektrostatického MEMS.

Následně byly geometrii modelu přiděleny potřebné fyzikální vlastnosti. V případech elektrostatických modelů se jednalo o balíček *Electrostatics* a *Solid mechanics*. U termomechanického aktuátoru přibyl *Heat transfer in solids*. Dále je důležité u obou modelů zapnout funkci *Multiphysics coupling*, která ve výsledné studii zahrne vzájemné vlivy aplikovaných fyzikálních nastavení. Na závěr byla programu zadána časově nezávislá studie pro výpočet. Pro účely aktuátoru je nejdůležitějším výsledkem celková výchylka. Rozbo-

rem výsledků simulací s výrobními parametry se věnují části 2.4.1 a 2.4.2. Na obrázku 1.11a) je zachyceno rozložení teploty v případě termomechanického aktuátoru⁶.



Obrázek 1.11: Výsledky studie termomechanického aktuátoru: a) rozložení teploty termomechanického aktuátoru pro napětí 80 V, b) Comsolem vytvořený *mesh* pro metodu konečných prvků.

1.4.2. Metoda konečných prvků

Comsol provádí výpočty pomocí metody konečných prvků, zkráceně MKP. Jedná se o metodu numerického řešení parciálních diferenciálních rovnic [21]. Tento proces nejprve analyzovanou oblast rozdělí na menší podoblasti (konečné prvky). Tyto prvky musí zahrnovat všechny body analyzované oblasti, nesmí se překrývat a parametry modelu v nich musí být konstantní. Splnění těchto podmínek je hlavním principem MKP. Rozdělení modelu na konečné prvky Comsol provádí tzv. *sítě* (anglicky *mesh*). Tu může uživatel nastavit sám, nebo ji Comsol určí podle vstupních parametrů. Na obrázku 1.11b) si lze všimnout toho, že *sítě* vygenerovaná Comsolem je zhuštěná kolem oblasti s očekávanou výraznou změnou hodnoty teploty⁷. Jemnější struktura *sítě* povede k přesnějšímu výsledku, ale za cenu delšího výpočetního času pro vyhodnocení výsledků. V provedených simulacích zhuštění *sítě* zvedlo výpočetní čas z půl minuty na pět až šest minut.

⁶V popisu obrázku je uvedena hodnota napětí. Ta je zde proto, že se jedná o nastavený vstupní parametr simulace. Hodnota napětí ovlivní hodnotu proudu a ten pak ovlivňuje rozložení teploty.

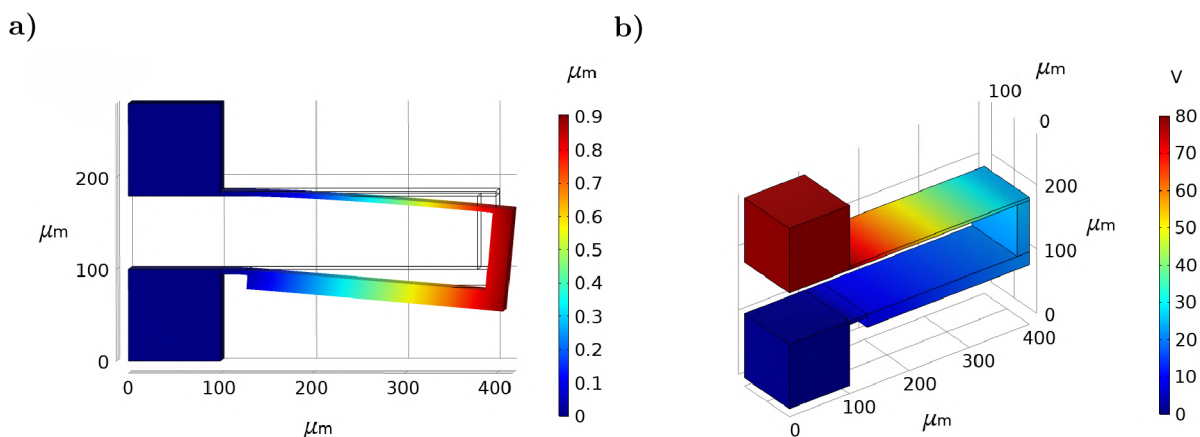
⁷Přesněji řečeno se jedná o spodní a vrchní tenké části termomechanického aktuátoru na obrázku 1.11b). Jelikož jsou zde části modelu o mnoho menší než v jiných oblastech, tak program očekává zvýšenou hodnotu teploty.

2. Vlastní návrh MEMS systému

Praktická část této bakalářské práce je věnována výrobě MEMS systémů, konkrétně dvou jejich typů. Jedná se o termomechanický aktuátor a elektrostatický aktuátor. Aktuátor (akční člen) je druh součástky, která převádí elektrický signál na mechanickou výchylku, jak již bylo naznačeno v části 1.2. Tyto dva typy byly zvoleny kvůli stejnému postupu výroby a odlišnému fyzikálnímu principu funkčnosti.

2.1. Termomechanický aktuátor

Návrh modelu termomechanického (termálního) aktuátoru využívá uspořádání s horkým a studeným ramenem ve tvaru písmene U. Princip vychýlení je založen na odlišné teplotní roztažnosti v různých částech akčního členu. Ramena jsou sériově zapojena do elektrického obvodu. Procházející proud v ramenech vytváří Jouleovo teplo. Vzhledem k různým tloušťkám ramen se v jedné části generuje více tepla než v druhé a dochází k rozdílné teplotní roztažnosti. To vede k deformaci celého aktuátoru ohybem směrem ke studenému rameni.



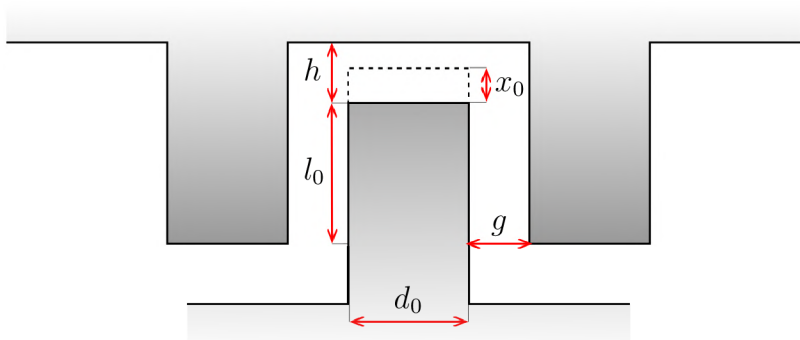
Obrázek 2.1: Studie z programu COMSOL Multiphysics pro termomechanický aktuátor: a) vykreslení deformace způsobené napětím 80 V se škálovacím faktorem zvětšení deformace 20, b) výsledné rozložení potenciálu pro napětí 80 V.

Hlavním využitím pro tento typ MEMS systému jsou oblasti mikromanipulace a nanomanipulace. Mikromanipulátory slouží pro výběr a umístění jednotlivých částic nebo biologických buněk. V případech vhodně navržené geometrie vyžadují elektrotermálně ovládané prvky k vytvoření velkého výstupního posunu řídicí napětí pouze v rozsahu několika voltů, na rozdíl od elektrostatických prvků, které potřebují desítky až stovky voltů. Další výhodou jsou jejich nízké náklady v porovnání s piezoelektrickými aktuátory [22].

Na obrázcích 2.1a) a 2.1b) jsou zobrazeny studie z Comsolu pro termomechanický a elektrostatický aktuátor s rozměry pro ukázkou principu funkčnosti. Studie s parametry použitými při výrobě jsou uvedeny v části věnované výsledkům 2.4. Důležitým pojmem v těchto studiích je škálovací faktor, který udává, jak moc dochází ke zkreslení reálné výchylky. Pro případ škálovacího faktoru 20 je reálná výchylka na vizualizaci dvacetkrát zvětšená.

2.2. Elektrostatický aktuátor

Verze elektrostatického aktuátoru připomínající tvar hřebene je jedním z nejběžnějších aktuátorů pro aplikace MEMS. Na model je opět přivedeno napětí, ale tentokrát nedochází k úplnému propojení elektrického obvodu a obvodem neteče proud. Namísto toho jsou jednotlivé větve přitahovány k sobě elektrostatickou silou. Hřebenová struktura je oproti jednoduchým rovnoběžným deskám využívána kvůli větším výchylkám [10]. Aplikacemi hřebenových aktuátorů jsou mikromanipulátory, gyroskopy a voltmetry v různých oblastech, jako je optická komunikace, bezdrátová komunikace a biomedicínské inženýrství [23].



Obrázek 2.2: 2D nákres rozměrů hřebenového elektrostatického aktuátoru.

Pro matematický popis elektrostatické síly vyjdeme ze vztahu pro elektrickou kapacitu kondenzátoru bočních stran zubů aktuátoru¹

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{S}{d} = 2\varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{l_0 t}{g}, \quad (2.1)$$

¹Elektrostatickou sílu odvozujeme z energie pro kapacitu boků zubu proto, jelikož v typických rozměrech hřebenových aktuátorů platí $l_0 \gg d_0$. Takle nerovnost ve vyráběném návrhu neplatí (z důvodu zachování srovnatelných rozměrů s termomechanickým aktuátorem) a na výsledné výchylce má výrazný podíl i tvar síly z rovnice 1.8, do které je třeba dosadit rozměr d_0 , t a h .

kde l_0 značí délku překrývající části zubů, t tloušťku aktuátoru a g mezeru mezi zuby. Výsledek dosadíme do vztahu pro energii a dostaneme výraz

$$E = \frac{1}{2}CU^2 = n\varepsilon_0\varepsilon_r \frac{l_0 t}{g} U^2. \quad (2.2)$$

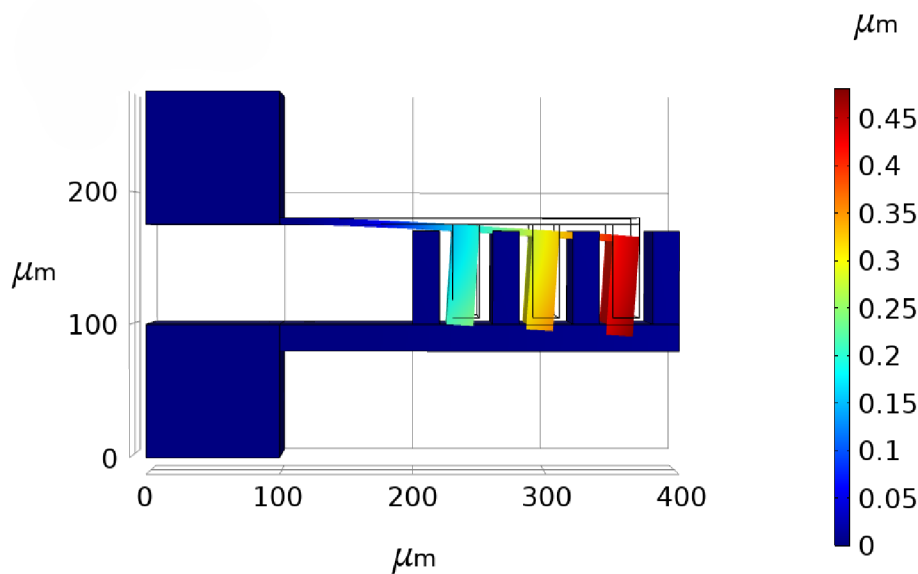
Proměnná n značí počet dvojic zubů, pro který platí popis situace jako na obrázku 2.2. Aplikace napětí způsobí vychýlení x_0 a energie se změní na

$$E = n\varepsilon_0\varepsilon_r \frac{(l_0 + x_0)t}{g} U^2. \quad (2.3)$$

Derivací energie podle směru vychýlení dostaneme výraz pro elektrostatickou sílu.

$$F_E = -\frac{\partial E}{\partial y} = -n\varepsilon_0\varepsilon_r \frac{t}{g} U^2 \quad (2.4)$$

Znaménko minus odpovídá přitažlivému charakteru síly. Z tohoto výsledného vztahu lze vidět, že zmenšení vzdálenosti mezi zuby g povede ke zvětšení elektrostatické síly, a tedy i větší výchylce. Na obrázku 2.3 je zobrazena studie z Comsolu s rozměry pro ukázání principu funkčnosti.



Obrázek 2.3: Studie výchylky z programu COMSOL Multiphysics pro elektrostatický aktuátor. Deformace je způsobena napětím 100 V. Ve skutečnosti k dotyku jednotlivých větví nedochází. Zobrazený dotyk je způsoben škálovacím faktorem zvětšení deformace, který je 30.

2.3. Výroba

V této části práce bude uveden popis všech kroků výroby od prvotní volby materiálu až po výsledný vzorek s MEMS systémy. Veškeré výrobní postupy byly provedeny v čistých prostorech třídy 100² v laboratořích CEITEC Nano. Výroba začíná u řezání křemíkového *wafery* a následuje lámání na jednotlivé vzorky. Ty se dále vyčistí od křemíkového prachu a pokryjí fotorezistem. Podrobnějšímu vysvětlení pojmů *wafery* a fotorezist jsou věnovány části 2.3.1 a 2.3.2. Následujícím výrobním krokem je optická litografie pro vytvoření vodičů. Po vyvolání jsou vzorky vyčištěny v plazmatu. Poté se na vzorky nanese kovová vodivá vrstva na evaporátoru. Po odstranění fotorezistu se proces s optickou litografií opakuje pro vytvoření jednotlivých MEMS. Dalším krokem je hloubkové reaktivní iontové leptání a opětovné odstranění fotorezistu. Během tohoto procesu je nutné proměřovat hloubku leptání na předem určených místech vzorku. Následně se vzorek leptá v kyselíně fluorovodíkové pro uvolnění pohyblivých částí MEMS od křemíkového substrátu. Na závěr je vzorek připojen k elektrickému obvodu se zdrojem napětí. Popis výrobního procesu je zakončen zobrazením MEMS elektronovým mikroskopem a shrnutím dosažených výsledků.

2.3.1. Křemíkový wafer, řezání na jednotlivé vzorky

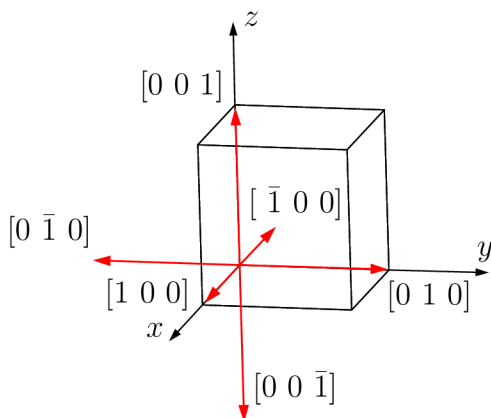
Jedním z hlavních materiálů používaných pro výrobu MEMS systémů je křemík. Mezi jeho hlavní pozitivní vlastnosti patří možnost anizotropního leptání díky orientaci krystalových rovin [25]. Křemík patří mezi polovodiče, které lze podle typu dopantu a nosiče náboje rozdělit na polovodiče typu n (negativní) a polovodiče typu p (pozitivní). V případě negativního polovodiče je křemík dopován fosforem, který má oproti křemíku jeden valenční elektron navíc. Nosičem náboje je tedy elektron s negativním nábojem. Pro křemík dopovaný borem mluvíme o polovodiči typu p. Bor má o jeden valenční elektron méně než křemík, a tím vznikne fiktivní částice, tzv. *díra*. Tato *díra* je nosičem pozitivního náboje [25].

Wafer je tenká deska kruhového průřezu, která slouží jako základ pro výrobu polovodičové součástky. Pro výrobu *wafery* se nejprve uměle vytvoří čistý monokrystal křemíku a následně se zbroúsí do požadovaného průměru [10]. Dále se rozřeže na tenké disky, které se lapují pro docílení požadované tloušťky. Řez monokrystalem je vedený podle požadované orientace krystalových rovin. Mechanické poškození po řezání se dále odstraňuje

²Čistý prostor třídy 100 může obsahovat maximálně 100 částic větších než 0,5 mikrometru ve stopě krychlové. Mezinárodní označení pro něj je ISO 5 [24].

leptáním a leštěním. Na závěr *wafery* projde kontrolou, kde se otestují vlastnosti vyrobené desky [26].

Pro výrobu MEMS systémů byl použit *wafery* typu křemík na izolantu³ od firmy onsemi⁴. Jedná se o *wafery* se strukturou křemík–izolant–křemíkový substrát. Vrstva izolantu (oxidu křemičitého) se při ponoření do kyseliny fluorovodíkové odleptá, čímž dojde k uvolnění pohyblivých částí MEMS vyrobených na vrchní vrstvě křemíku. Kyselina fluorovodíková křemík neleptá. Výroba SOI *wafery* spočívá ve spojení klasického křemíkového *wafery* s jiným tenčím *wafery*, který je pokrytý vrstvou oxidu. Toto spojení probíhá po vyčištění obou *wafery* za vysokých teplot, řádově v rozmezí 800–1100 °C a může trvat až několik hodin [2]. Nyní budou popsány základní vlastnosti a parametry použitého SOI *wafery*, které měly vliv na výrobní proces.



Obrázek 2.4: Grafické zobrazení skupiny směrů $\langle 100 \rangle$ Millerovými indexy.

Device layer
Implanted layer
Gettering layer
Oxide layer
Handle wafer

Obrázek 2.5: Struktura SOI *wafery*.

Schéma struktury SOI *wafery* je zobrazeno na obrázku 2.5. Nejdůležitější vrstvou je *device layer*. Jedná se o vrchní vrstvu *wafery*, na které dochází k výrobě samotných MEMS. Tloušťka této vrstvy je rovna výšce vyráběných MEMS. Její rezistivita se pohybuje v rozsahu 72–88 Ωcm a jde o polovodič typu n dopovaný fosforem. Pod *device layer* jsou vrstvy *implanted layer* a *gettering layer*. *Implanted layer* je vrstva obsahující dopovaný fosfor a slouží k vylepšení hodnoty vodivosti *device layer*. *Gettering layer* slouží jako izolant, který zabraňuje přechodu fosforu do spodní vrstvy izolantu. *Oxide layer* je vrstva oxidu křemičitého (SiO_2), což je v použité struktuře izolant oddělující vrstvy křemíku. Poslední částí je *handle wafer*, což je vrstva odpovídající zbytku substrátu. Všechny vrstvy mají krystalovou orientaci rovin popsanou souborem směrů $\langle 100 \rangle$ [28]. Grafický popis těchto směrů je zachycen na obrázku 2.4.

³Anglicky *silicon on insulator*, zkráceně jej značíme SOI.

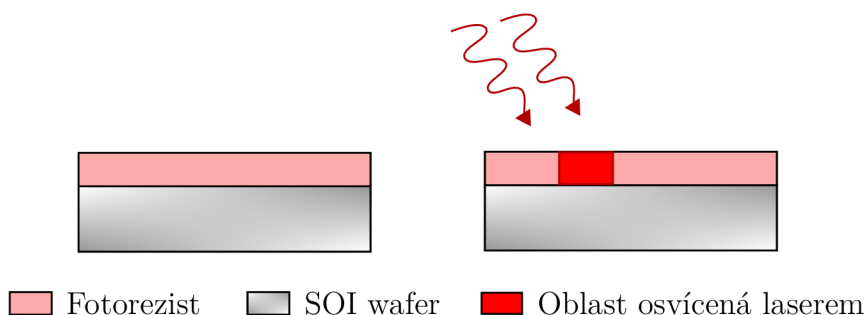
⁴Společnost onsemi s Ústavem fyzikálního inženýrství Fakulty strojního inženýrství úzce spolupracuje. V minulosti firma podpořila studentskou vědeckou činnost v rámci projektu LDDA [27].

Použitý typ SOI *wafery* měl průměr 150 mm. V sériové výrobě se kvůli efektivitě výrobní kroky provádějí na celém *wafery*, který se až na konci výroby rozdělí na jednotlivé kusy. V prováděném výrobním procesu je ale pro snazší manipulaci příhodnější *wafery* rozdělit na menší vzorky a pracovat následně s nimi. K tomuto kroku byl využit laser dicer⁵, který *wafery* nařezal na menší čtvercové vzorky o velikosti 3×3 cm². Nařezaný *wafery* byl poté pinzetami v čistých prostorách nalámán na jednotlivé vzorky.

2.3.2. Optická litografie

Nyní, když je křemíkový SOI *wafery* nalámán na čtvercové kusy, je možné pokročit ve výrobním procesu dále. V této části výroby je cílem vytvořit na vzorku kovové vodivé cesty, které poslouží jako vodič elektrického proudu pro jednotlivé MEMS. Tyto cesty jsou také důležité pro proces kontaktování, kterému se věnuje kapitola 2.3.7.

Nejprve se na vzorku vytvoří tenká souvislá vrstva fotorezistu. Fotorezist je světlo-citlivá kapalina, která po osvětlení světlem určité vlnové délky mění svoje chemické vlastnosti [10]. Pomocí optické litografie necháme laserem osvětlit ty části fotorezistu, které odpovídají požadovanému schématu vodičů. Oblast osvětlená laserem změní chemické složení a při ponoření do vývojky⁶ na bázi hydroxidu tetrametylamonného (TMAH) dojde k jejímu odstranění [29]. Vzorek se dále celý pokryje kovovou vrstvou na evaporátoru⁷. Během následného lift-off procesu se ze vzorku odstraní fotorezist, čímž na něm zůstane kov pouze na těch místech, kde po vyvolání žádný fotorezist nezůstal.



Obrázek 2.6: Schéma principu optické litografie.

Před nanesením fotorezistu je třeba vzorek vyčistit od křemíkového prachu zbylého po nařezání na laser diceru. Toto čištění bylo provedeno pomocí ultrazvukové čističky. Vzorek byl nejprve vložen do kádinky s acetonem. Aceton je silné organické rozpouštědlo,

⁵Celý název přístroje je Laser dicer Oxford Lasers A-Series.

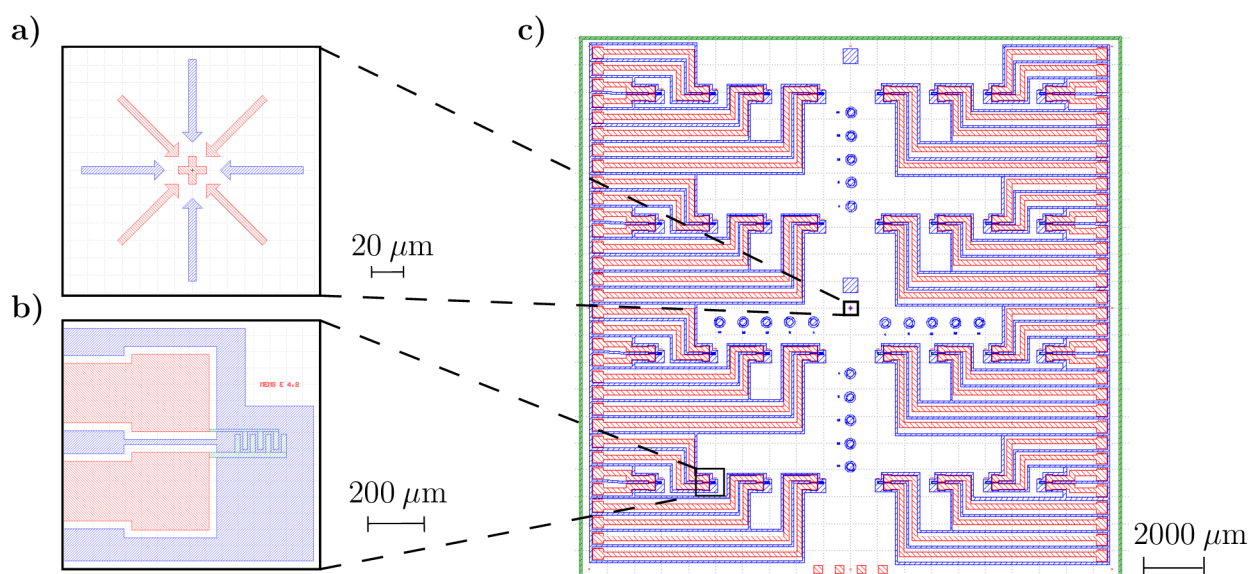
⁶Vývojka je vodný roztok pro rozpuštění exponovaného fotorezistu [10].

⁷Celý název přístroje je Electron beam evaporator BESTEC. Detailnější popis tohoto zařízení je v části 2.3.4.

kteří dokáže odstranit nečistoty typu křemíkového prachu. Dále byla kádinka vložena do ultrazvukové čističky s vodou. Ultrazvuk pracuje na vysokých frekvencích, vyšších než 20 kHz, a vytváří ve vodě mikroskopické bubliny. Ty rychle kolabují a přitom vytváří tlakové vlny [30]. Tyto vlny naráží do kádinky se vzorkem a zvyšují efektivitu čištění. Aceton se velmi rychle odpařuje a může zaschnout společně s již odstraněnými nečistotami [3]. Proto je nutné vzorek znovu vyčistit v kádince s isopropylalkoholem (IPA) a tím smýt veškeré zbytky acetonu.

Ještě před procesem nanesení fotorezistu byl vzorek vysušen na přístroji Hot Plate HP8. Dále byl použit přístroj Vapor Primer VP8. Ten na vzorek aplikuje hexametyldisilan (HMDS), což je látka podporující adhezi rezistu [31]. Použitý druh fotorezistu byl AZ 1514H. Pro vytvoření souvislé vrstvy fotorezistu byl využitý přístroj Lithographic wet-bench for coating (SUSS-LabSpin 6). Poté byl vzorek vložen na Hot Plate HP8 pro úplné zafixování rezistu.

Princip optické litografie na přístroji UV Direct Write Laser system Heidelberg Instruments (DWL) je zachycen na obrázku 2.6. V tomto výrobním procesu byl použit pozitivní fotorezist, což znamená, že laserem osvětlená oblast byla po ponoření do vývojky odebrána. V případě negativního fotorezistu by to bylo přesně naopak.



Obrázek 2.7: Masky vytvořené v programu KLayout: a) zarovnávací značka, b) elektrostatický MEMS s popisem, c) celkový design masky vzorku.

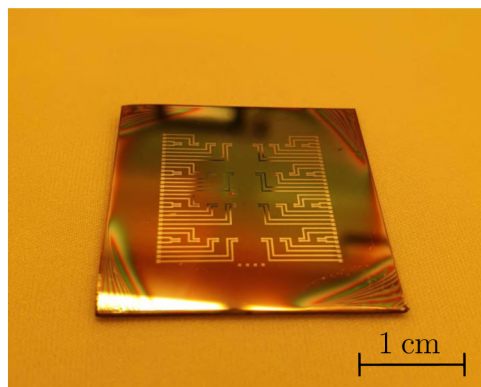
Informace týkající se oblasti, kterou má DWL osvětit laserem, je zadána pomocí masky vytvořené v programu KLayout [32]. Masky pro vzorky z výrobního procesu je zachycena na obrázku 2.7. Jednotlivé barvy na masce odpovídají vrstvám pro litografii

2.3.3 ČIŠTĚNÍ VZORKU V PLAZMATU

v různých fázích procesu výroby. Červená vrstva značí kovové vodiče, modré oblasti jsou pro leptání v plazmatu a zelená vrstva je pomocná. Kromě vodičů a jednotlivých MEMS s popisy jsou na masce i kontrolní oblasti pro zjištění hloubky leptání. Ty jsou ve středu vzorku a na jeho okraji. Dále jsou ve spodní části masky čtyři čtvercové oblasti pro nácvek kontaktování⁸. Ve středu vzorku, po jeho stranách a v rozích jsou zarovnávací značky, které slouží pro vyrovnání druhé litografie. Kruhové obrazce ve vrstvě vyznačené modrou barvou slouží ke sledování rychlosti leptání v kyselině fluorovodíkové a jejich bližšímu popisu se věnuje sekce 2.3.6.

2.3.3. Čištění vzorku v plazmatu

Na obrázku 2.8 si lze všimnout tmavé oblasti uprostřed vzorku. Jedná se o zbytky foto-rezistu, které byly nedokonale odstraněny během procesu vyvolání. Pakliže by na takový vzorek byla nanášena kovová vrstva, tak by došlo během lift-off procesu k odstranění kovového materiálu i v těch oblastech, kde by měl zůstat. Proto bylo přistoupeno k čištění v plazmatu na přístroji RIE by F Chemistry and PECVD of hard C-based films Oxford Instruments Plasma Technology PlasmaPro 80.



Obrázek 2.8: Vzorek po vyvolání a před vyčištěním v plazmatu.

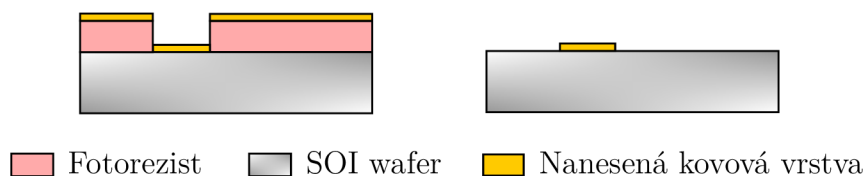
Plazma je druh skupenství hmoty a jedná se o ionizovaný plyn. Při vhodném nastavení procesu je leptání v plazmatu anizotropní, tedy není stejně rychlé ve všech směrech [33]. Této vlastnosti bylo využito, protože je požadováno leptání pouze zbylého fotorezistu a ne vzniklých kolmých stěn. Plyn vpuštěný do vakuové komory je ionizován elektromagnetickým polem. To je zde vytvořeno podložkou pro vzorek, která slouží jako elektroda, na kterou je napojen zdroj střídavého napětí (typicky o hodnotě 13,56 MHz) [34]. Ionizovaný plyn střídavým napětím v oblastech blízkých vakuové komoře porušuje kvazineutralitu mezi koncentrací elektronů a iontů. To vede k vytvoření přechodové oblasti, která vytváří

⁸Popisu a zavedení pojmu kontaktování je věnována část 2.3.7.

columbovskou potenciálovou bariéru odpuzující elektrony a přitahující ionty. K vnějšímu elektrickému obvodu je připojen blokuující kondenzátor, který brání průchodu stejnosměrného napětí. Tento druh vytváření plazmatu, kde je provázána rychlost dopadajících iontů a hustota plazmatu jedním zdrojem střídavého napětí, označujeme jako kapacitně vázané plazma. Urychlené ionty bombardují vzorek umístěný v přechodové oblasti. Při dopadu na vzorek dojde k chemické reakci, která je závislá na charakteru plynu ve vakuové komoře. V tomto výrobním procesu byl zvolen přednastavený recept PMMA ETCH 50W, při kterém do komory vpouštíme kyslík. Dobu tohoto leptacího kroku byla zvolena v závislosti na množství zbytků fotorezistu.

2.3.4. Naneseení vodivé kovové vrstvy

Uspořádání kontaktů a vodičů mezi okrajem vzorku a jednotlivými MEMS bylo navrženo za účelem rovnoměrného rozložení MEMS a maximálního využití plochy vzorku. Na vzorek vyčištěný v plazmatu byla naneseena tenká kovová vrstva za pomoci přístroje Electron beam evaporator BESTEC. Přesněji řečeno šlo o tenkou adhezivní vrstvu titanu o tloušťce 5 nm a na ni naneseenou vrstvu zlata s tloušťkou 100 nm. Parametry depozice byly následující: urychlovací napětí 8 kV, emisní proud 80 mA a depoziční rychlost $0,75 \text{ \AA} \cdot \text{s}^{-1}$ pro titan. Pro zlato bylo urychlovací napětí 10 kV, emisní proud 310 mA a depoziční rychlost $1,5 \text{ \AA} \cdot \text{s}^{-1}$. Naznačení tohoto výrobního kroku je na obrázku 2.9.

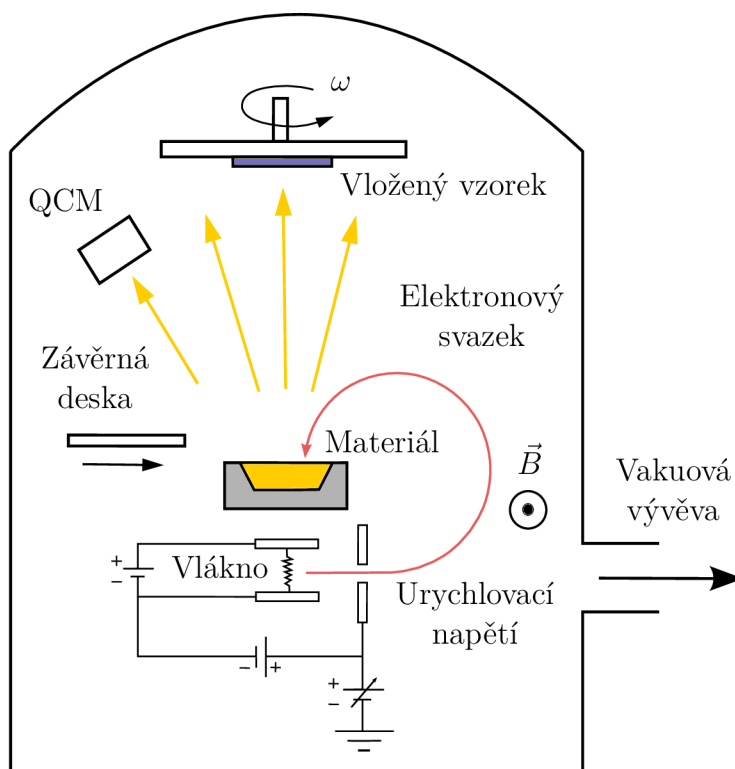


Obrázek 2.9: Schéma procesu nanášení kovové vrstvy a následného lift-off procesu.

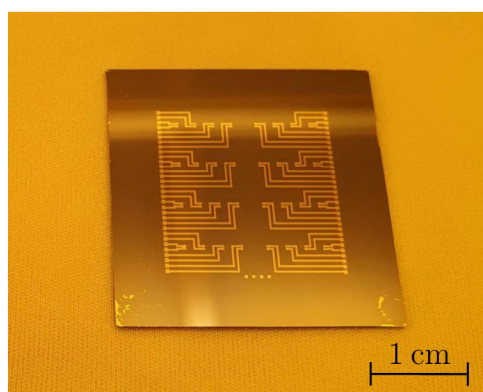
Napařování je druh fyzikálního procesu, při kterém dochází k zahřátí nanášeného materiálu, který se vypařuje a následně kondenzuje na povrchu vzorku [35]. Zahřátí materiálu na potřebnou teplotu probíhá pomocí elektronového svazku. Ten je fokusován magnetickým polem. Emise elektronů je způsobena vysokým napětím na extrakční mřížce, které zároveň slouží jako urychlovací napětí. Nutnou podmínkou procesu napařování je prostředí vakuové komory s hodnotou tlaku okolo 10^{-6} mbar. Vakuum zaručuje absenci zbytkové atmosféry a zvyšuje hodnotu střední volné dráhy napařovaných částic. Pro zlepšení stejnoměrnosti naneseené vrstvy držák vzorku během depozice rotuje. Součástí přístroje je závěrná deska (anglicky *shutter*), která umožňuje přesně ovládat začátek a konec

2.3.4 NANESENÍ VODIVÉ KOVOVÉ VRSTVY

depozice. Pro měření tloušťky se využívá křemenná krystalová mikrorovnováha⁹. Jedná se o kruhovou křemennou destičku, která je umístěná před vzorkem a osciluje na rezonanční frekvenci. Dopad částic deponovaného materiálu na destičku způsobí její změnu hmotnosti a tedy i změnu její rezonanční frekvence. Díky této změně lze měřit depoziční rychlost. Schéma popsaného procesu napařování je zachyceno na obrázku 2.10.



Obrázek 2.10: Schéma principu napařování tenké vrstvy.



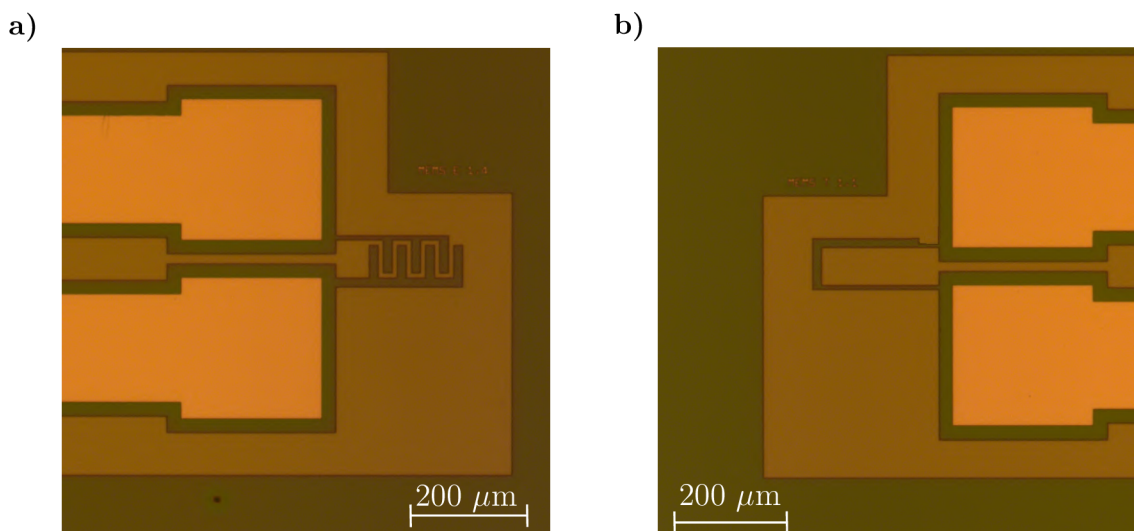
Obrázek 2.11: Vzorek s nadeponovanou tenkou vrstvou po lift-off procesu.

⁹Anglicky *quartz crystal microbalance*, zkráceně QCM.

Lift-off proces spočívá v odstranění fotorezistu ze vzorku. Tímto krokem na vzorku zůstanou pouze kontakty a vodiče určené maskou na obrázku 2.7, kde jsou vyznačeny červenou barvou. Kroky procesu jsou téměř identické s původním čištěním vzorku, tedy pětiminutové čištění vzorku ultrazvukem v acetonu a pětiminutové čištění v isopropylalkoholu. Jediným rozdílem bylo použití kádinek již kontaminovaných kovovým materiálem. Obrázek 2.11 zachycuje vzorek po lift-off procesu.

2.3.5. Hlubkové reaktivní iontové leptání

Nyní, když jsou na vzorku potřebné vodiče pro přivedení elektrického proudu k jednotlivým MEMS, je třeba vytvořit pohyblivé části aktuátorů popsané v simulacích na obrázcích 1.10a) a 1.10c). Tento krok byl proveden metodou hlubkého reaktivního iontového leptání¹⁰ v plazmatu. Leptání probíhalo na přístroji Deep reactive ion Oxford Instruments Plasma Technology PlasmaPro 100. Toto leptání odebírá materiál z vrchní vrstvy SOI *wafery* a je nutné zakrýt plochy, na kterých je odebírání nežádoucí. Toho dosáhneme opětovným pokrytím vzorku fotorezistem a následnou optickou litografií včetně vyvolání. Plochy zakryté fotorezistemem se leptají výrazně pomaleji než odkrytý křemík. Tyto výrobní procesy byly popsány v sekci 2.3.2. Hlavním rozdílem oproti prvotní litografii je osvětlení jiné části masky z programu KLayout, a to vrstvy vyznačené modrou barvou na obrázku 2.7. Výsledky druhé optické litografie jsou zachyceny na obrázcích 2.12a) a 2.12b).



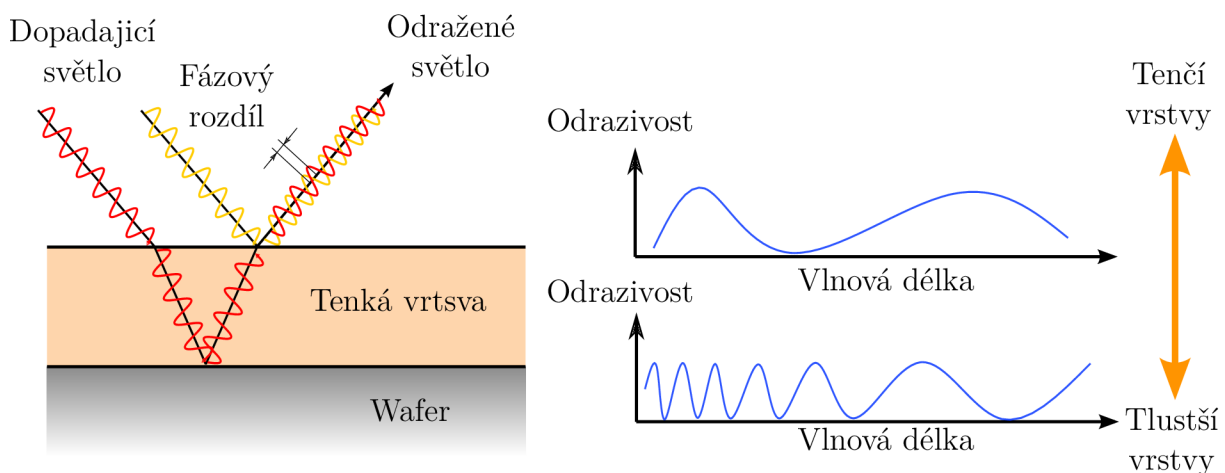
Obrázek 2.12: Zobrazení výsledků druhé optické litografie z optického mikroskopu: a) výsledná struktura elektrostatického MEMS, b) výsledná struktura termomechanického MEMS.

¹⁰Anglicky *Deep Reactive Ion Etching*, zkráceně DRIE.

2.3.5 HLOUBKOVÉ REAKTIVNÍ IONTOVÉ LEPTÁNÍ

Ještě před leptáním je třeba změřit tloušťku vrstvy fotorezistu. Je důležité, aby kovové vodivé cesty zůstaly během celého procesu zakryté. Jakmile by došlo k jejich odkrytí, tak by odhalený kov měl negativní vliv na celý proces a stav přístroje pro DRIE proces. Ze znalosti hodnoty tloušťky fotorezistu a rychlosti jeho leptání lze vypočítat maximální počet leptacích cyklů pro zamezení odhalení kovu. Leptání bylo tedy prováděno tak dlouho, dokud nedošlo k úplnému proleptání vrchní vrstvy křemíku, anebo k odhalení kovových cest.

Pro získání hodnoty tloušťky vrstvy fotorezistu byl využit přístroj Spectroscopic reflectometer Ocean Optics NanoCalc 2000. Tento reflektometr dokáže změřit tloušťku transparentní tenké vrstvy. Funguje na principu interference světla na této vrstvě. Pro určité vlnové délky dochází ke konstruktivní interferenci a pro jiné k destruktivní. Tímto způsobem dojde ke střídání maxim a minim v závislosti odrazivosti na vlnové délce. Pro tlustší vrstvy je počet vlnových délek, které konstruktivně interferují, vyšší než u tenkých vrstev. Je to z toho důvodu, že pro ně existuje větší počet vlnových délek, jejichž celočíselný násobek je roven fázovému rozdílu [36]. Pro měření je třeba přístroji zadat rozmezí očekávané tloušťky vrstvy a program vytvoří křivku s vypočtenou hodnotou tloušťky tak, aby se co nejvíce podobala naměřenému signálu odrazivosti. Nákres principu funkčnosti reflektometru je na obrázku 2.13.

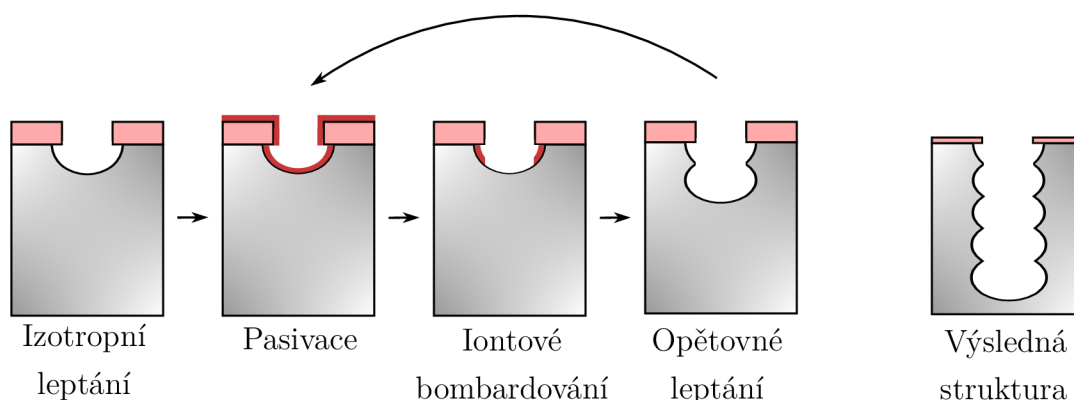


Obrázek 2.13: Princip měření tloušťky transparentní tenké vrstvy.

Hlavním rozdílem mezi procesy DRIE a RIE je hloubka samotného leptání. U RIE se lze proleptat řádově do vyšších jednotek až desítek mikrometrů a s DRIE procesem se vyleptaná hloubka pohybuje až ve stovkách mikrometrů. Hloubky a leptací rychlosti jsou závislé na leptaném materiálu a druhu zvoleného procesu pro leptání. DRIE využívá plazmatu o vyšší hustotě (vyšší počet ionizovaných částic na jednotku objemu), což zvyšuje počet dopadajících iontů, a tedy způsobuje vyšší rychlost leptání [2, 37]. Vyšší

hustoty se dosahuje metodou indukčně vázaného plazmatu¹¹. Plazma při této metodě vzniká za pomoci cívky, která je obtočena kolem vakuové komory a je připojena ke zdroji střídavého napětí. Tímto způsobem je indukováno elektromagnetické pole, které ionizuje částice plynu. Nezávisle na tomto obvodu je k podložce vzorku zapojen jiný, druhý zdroj střídavého napětí, stejně jako u RIE procesu. Takto jsme schopni nezávisle na sobě ovládat hustotu plazmatu a rychlost dopadajících iontů [38]. Existují dva hlavní druhy DRIE procesů, a to:

- **kryogenní proces**, při kterém je vzorek ochlazený na teplotu $-110\text{ }^{\circ}\text{C}$. Odkrytý povrch vzorku, který je bombardován ionty, se zahřívá a leptá. Po vytvoření kolmých stěn začne docházet ke kondenzaci plynu na těchto stěnách¹², protože nejsou zahřívány dopadáváním iontů. Tyto z kondenzované plyny jsou málo reaktivní, a tak dochází k anizotropnímu leptání. Nevýhodou tohoto typu procesu je negativní působení na fotorezist, který vlivem nízkých teplot praská [1, 10]. Proto byl ve výrobním procesu použit *Bosch* proces.
- **Bosch proces** se skládá z leptacích a pasivačních cyklů. Nejprve dojde k izotropnímu leptání pomocí fluoridu sírového (SF_6). Dále následuje pasivační cyklus, kdy se vyleptaná oblast a povrch vzorku pokryje vrstvou fluorouhlíkových polymerů, které strukturou připomínají teflon. Dno vyleptané oblasti se poté bombarduje těžkými ionty, čímž dojde k odstranění pasivační vrstvy. Následuje opětovné izotropní leptání. Pro tento druh procesu je typické vroubkování kolmých stěn vzorku (anglicky *scalloping*). Schematický náčrt leptacích a pasivačních cyklů je na obrázku 2.14. Tyto kroky se opakují tak dlouho, dokud nedojde k proleptání do požadované hloubky [1, 10, 37].



Obrázek 2.14: Kroky hloubkového reaktivního iontového leptání *Bosch* procesem.

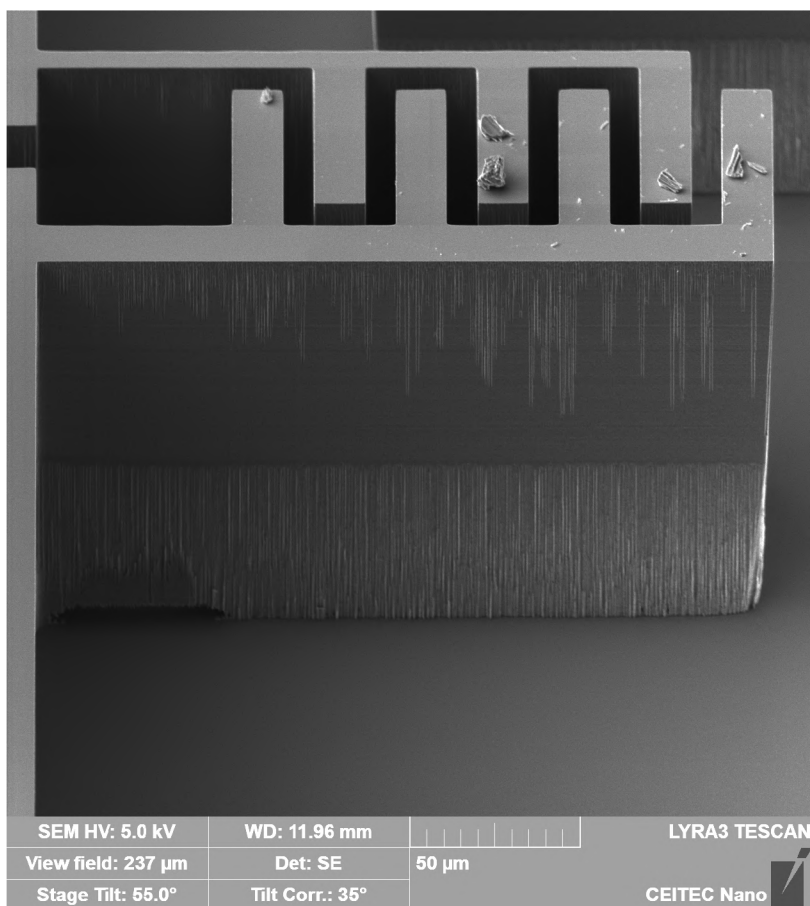
¹¹U metody RIE, popsané v části 2.3.3, se využívá kapacitně vázaného plazmatu.

¹²Použitím plynů fluoridu sírového (SF_6) a kyslíku (O_2) vzniká vrstva oxyfluoridu křemíku (SiO_xF_y).

2.3.5 HLOUBKOVÉ REAKTIVNÍ IONTOVÉ LEPTÁNÍ

K měření hloubek vyleptaných oblastí během DRIE procesu byl využit přístroj Mechanical profilometer Bruker Dektak XT. Měření probíhá přeježděním diamantového hrotu po povrchu vzorku. Poloha hrotu ve směru osy z je zaznamenávána a výsledkem je informace o topografii povrchu vzorku. Nastavením cesty hrotu skrze vyleptanou oblast dostaneme informaci o vyleptané hloubce. K tomuto účelu slouží čtvercová oblast uprostřed vzorku znázorněná modrou barvou na obrázku 2.7.

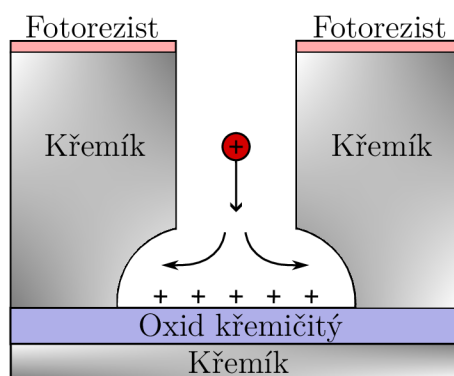
Dalším indikátorem dostatečně proleptané hloubky je vizuální kontrola. Jakmile se hloubka vyleptané oblasti dostane k vrstvě oxidu křemičitého, světlo na této vrstvě začne interferovat. Interference způsobí, že tyto oblasti jsou vidět v odstínech fialové až zelené barvy. Pokud by proleptaná hloubka byla stále v oblasti čistého křemíku, tak by nedocházelo k interferenci a vidět by byl pouze charakteristický stříbrný povrch.



Obrázek 2.15: Vyleptaná struktura elektrostatického MEMS. Znatelný přechod mezi světlou a tmavou oblastí na kolmé stěně značí začátek vlivu podleptávání v blízkosti vrstvy oxidu.

Ve výrobním procesu byl použit recept typu „leptání skrz křemík“¹³. Recept TSV křemík leptá plazmatem fluoridu sírového (SF_6). Pasivační vrstva vzniká plynem oktafluorocyklobutanu (C_4F_8). Při kontrole výsledných vyleptaných struktur na elektronovém mikroskopu bylo vidět (obrázek 2.15), že čím blíže se vyleptaný MEMS přibližoval k vrstvě oxidu křemičitého, tím více docházelo k podleptávání kolmé stěny.

Tento jev je popsán v článku *Modeling and simulation of Footing effect in DRIE process* [39]. Dochází k němu kvůli nabíjení oxidu kladným nábojem, který pochází z iontového bombardování. Ve vrstvě křemíku k nabíjení nedochází, protože je křemík vodivý. Oxid ale vodivý není, a tak při přiblížení leptaných oblastí k oxidu dochází k nabíjení. Takto vzniklé elektrické pole se postupně zvětšuje a odpuzuje ionty na boční stěny vzorku. Zobrazení tohoto jevu je na obrázku 2.16.



Obrázek 2.16: Princip podleptávání křemíku v SOI *wafere* vlivem nabíjení oxidu.

Řešením tohoto problému je použití receptu s nízkou frekvencí¹⁴ zdroje střídavého napětí (380 kHz) [39], který je napojený na podložku se vzorkem. Nízká frekvence zdroje střídavého napětí vytvoří plazma o nižší hustotě s tlustší přechodovou oblastí. Jelikož je potenciál na okraji plazmatu nejnižší, tak jsou k okraji urychlovány kladné ionty. Ionty musejí projít přechodovou oblastí a čím je tato oblast širší, tím více v ní dochází ke vzájemným srážkám. Tyto srážky zapříčiňují úbytek energie a ionty odpuzené na kolmé stěny nezpůsobují tak silné podleptávání [40]. Nevýhodou LF receptů je vyšší leptací rychlost fotorezistu. Zatímco u TSV byla leptací rychlost křemíku oproti fotorezistu 76krát větší, u LF byla pouze 14krát větší.

Nanesení fotorezistu AZ 1514H vedlo k vytvoření vrstvy o tloušťce $1,4 \mu\text{m}$. LF recept vyžadoval výrazně tlustší vrstvu pro zachování zakrytí kovových vodičů. Proto byl použit jiný druh fotorezistu, a to AZ 12XT. Tento fotorezist vytváří díky své vysoké viskozitě výrazně tlustší vrstvy [41]. Po změření tloušťky vrstvy na NanoCalcu (obrázek 2.13) byla

¹³Anglicky *through silicon via*, zkráceně TSV.

¹⁴Takové recepty označujeme zkratkou LF z anglického *low frequency*.

2.3.6 LEPTÁNÍ V KYSELINĚ FLUOROVODÍKOVÉ

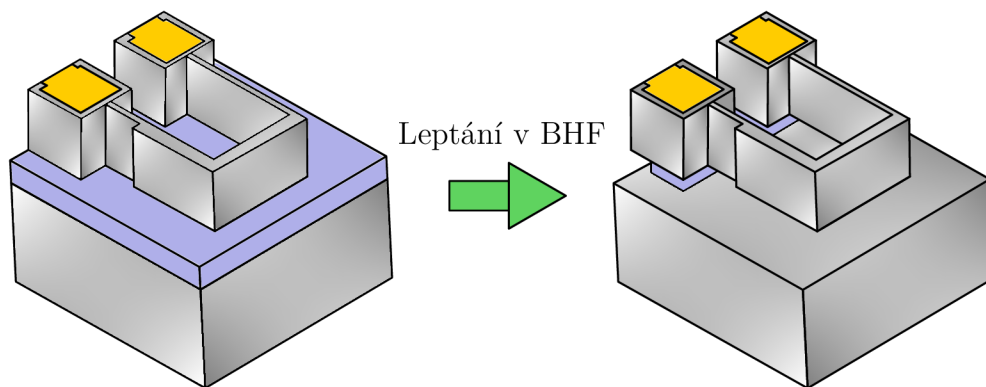
naměřena hodnota $8,3 \mu\text{m}$. Parametry procesu pro proleptání vrchní vrstvy křemíku jsou zachyceny v tabulce 2.1.

Typ receptu	Počet cyklů	Leptací rychlost křemíku ($\mu\text{m}/\text{cyklus}$)	Leptací rychlost fotorezistu (nm/cyklus)	Vyleptaná hloubka (μm)
TSV	160	0,44	5,8	70
LF	56	0,36	25,9	105

Tabulka 2.1: Tabulka použitých parametrů hloubkového iontového leptání.

2.3.6. Leptání v kyselině fluorovodíkové

Pro uvolnění pohyblivých částí MEMS je zapotřebí odstranit spodní vrstvu oxidu křemičitého, která spojuje vyleptané struktury se zbylou částí vzorku. Nákres tohoto výrobního kroku je na obrázku 2.17. K tomuto kroku byla použita kyselina fluorovodíková (HF), přesněji řečeno tlumená kyselina fluorovodíková¹⁵. BHF je využívána především kvůli stejnoměrné kontrole leptací rychlosti na různých místech vzorku. Další její pozitivní vlastností je menší leptací rychlost adhezivní vrstvy titanu oproti HF [42]. V této práci byla použita BHF v poměru 5:1 (5 dílů 40% NH_4F ku 1 dílu 49% HF).

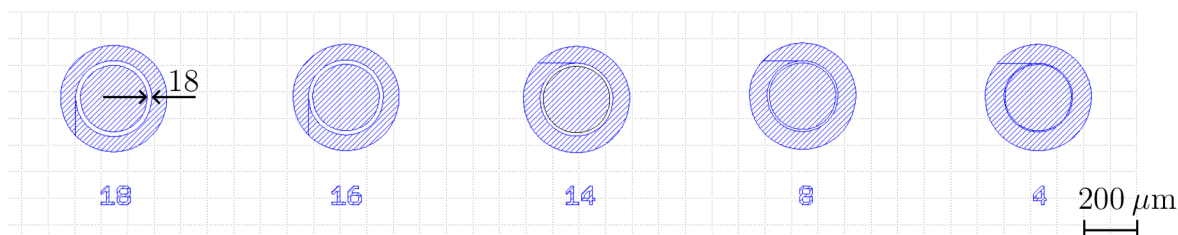


Obrázek 2.17: Schematické naznačení procesu podleptání vrstvy oxidu křemičitého kyselinou fluorovodíkovou. Oblasti vyznačené modrou barvou představují vrstvu oxidu, stříbrné části značí křemík a jasně žlutá místa odpovídají kovovým vodičům. Obrázek neodpovídá skutečným rozměrům.

Kyselina nepodleptává pouze pohyblivé části MEMS, ale i části vzorku, na kterých jsou kovové vodiče. Proto bylo důležité, aby při návrhu designu byly oblasti s vodiči výrazně širší. Tímto způsobem se širší oblasti podleptají pouze mírně ze stran a většina struktury zůstane pevně spojena se spodní vrstvou vzorku.

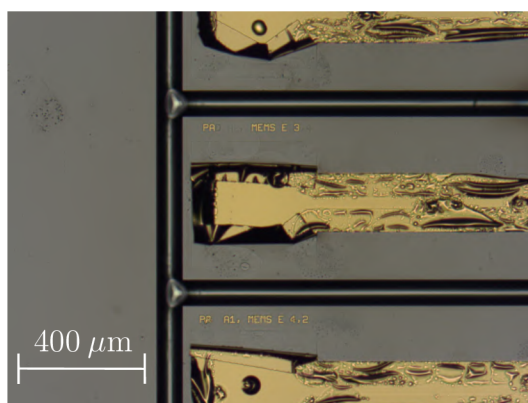
¹⁵Anglicky *buffered hydrofluoric acid*, zkráceně BHF. Jedná o směs HF a tlumícího činidla, jako je například fluorid amonný (NH_4F) [2].

Pro zjištění leptací rychlosti BHF byly v designu navrženy značky, které jsou na obrázku 2.18. Oblasti vyplněné modrou barvou se během DRIE procesu sniží až k vrstvě oxidu křemičitého. Při ponoření do BHF se nevyleptaný prstenec začne laterálně podleptávat a po jeho uvolnění lze zjistit, kolik oxidu se odleptalo. Tato struktura je na vzorku celkem čtyřikrát a vždy jsou prstence tlusté od 4 do 18 mikronů. Nejdůležitějším z nich je prstenec o tloušťce 16 mikronů, protože to je zároveň největší šířka pohyblivé části MEMS. Vzorek byl v BHF ponořen po dobu 2 hodin a 7 minut. Leptací rychlost byla 63 nm/min.



Obrázek 2.18: Značky pro zaznamenání rychlosti leptání oxidu křemičitého pomocí BHF z programu KLayout. Čísla pod značkami odpovídají tloušťce daného prstence v mikrometrech, jak je naznačeno na prstenci vlevo.

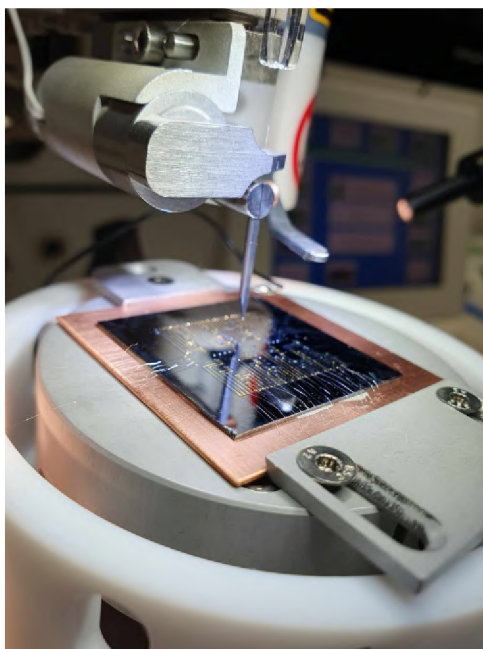
Při kontrole výsledků leptání na optickém mikroskopu bylo vidět znatelné poničení zlatých vodivých cest, které je zobrazeno na obrázku 2.19. Tento fakt se dá vysvětlit dvěma způsoby: došlo k odleptání spodní adhezivní vrstvy titanu, nebo se při čištění v plazmatu před nanesením kovové vrstvy na vzorku vytvořila vrstva oxidu, která měla negativní vliv na výsledek leptání v BHF. Pro odstranění těchto nedostatků lze použít místo titanu chrom, o kterém se dá v literatuře zjistit, že ho BHF neleptá [42]. Dále by bylo zapotřebí zvýšit intenzitu záření laserového paprsku při optické litografii tak, aby se nemuselo přistupovat k čištění v plazmatu a zabránilo se vzniku oxidu. Tyto kroky nebyly v rámci této bakalářské provedeny práce z důvodu časového omezení.



Obrázek 2.19: Poničené zlaté vodivé cesty zobrazené optickým mikroskopem.

2.3.7. Kontaktování

Při procesu kontaktování dochází k propojení kontaktních ploch kovovým drátkem o průměru od 18 do 75 mikronů. Kontakt mezi povrchem a drátkem se zajišťuje třemi hlavními metodami: ultrazvukovým, termokompresním a termosonickým spojováním. V tomto výrobním procesu bylo kontaktování prováděno na přístroji Wire bonder TPT HB 16. Použit byl hliníkový drátek a spojování probíhalo ultrazvukovou metodou. Při ní bondovací hlava tlačí drátek na povrch kontaktní plošky a současně drátek rozkmitává mechanickými vibracemi s vysokou frekvencí (20–60 kHz). Tyto vibrace způsobují tření na atomární úrovni, což vede k lokálnímu ohřevu a plastické deformaci povrchu drátku a kontaktní plošky. Tím dochází k difuzi atomů mezi drátkem a povrchem, což vytváří pevný a elektricky vodivý spoj. Po vytvoření prvního spoje najede nástroj s drátkem na jiné místo, vytvoří druhý spoj a drátek poté odtrhne [43].

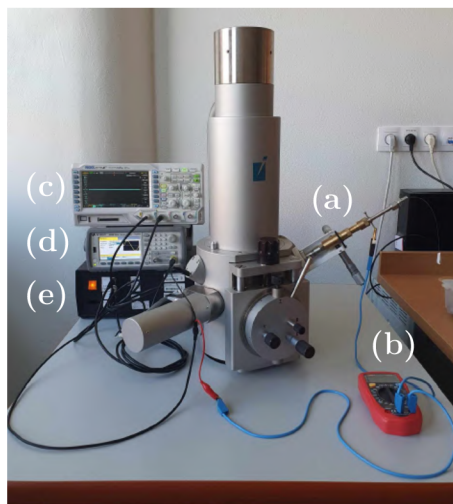


Obrázek 2.20: Vzorek během procesu kontaktování.

Jedna větev vyráběných MEMS systémů má být vždy uzemněna. Na druhou bude přiváděno elektrické napětí pomocí manipulátoru v komoře elektronového mikroskopu. Cílem kontaktování je tedy pouze uzemnění. Vzorek byl přilepen vodivou stříbrnou barvou na měděnou destičku, ke které byl napájen vodivý drát. Tento drát se později připevnil ke komoře elektronového mikroskopu, čímž došlo k uzemnění měděné destičky. Kontaktováním zlatých vodivých cest s měděnou destičkou došlo k požadovanému uzemnění. Obrázek 2.20 zobrazuje vzorek během procesu kontaktování.

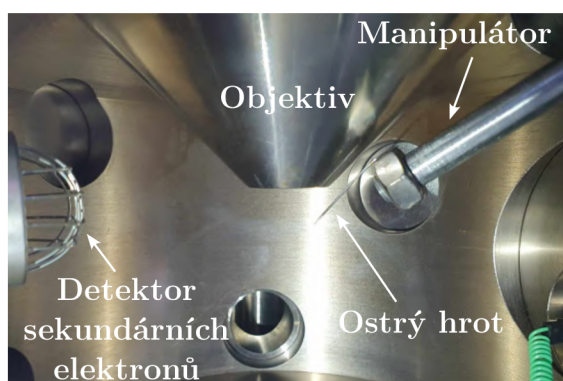
2.4. Výsledky

Tato část práce se věnuje ukázce vytvořených MEMS systémů, popisu experimentální aparatury pro pozorování výchylek pohyblivých částí a srovnání experimentu se simulacemi. Toto srovnání je rozděleno do dvou částí, z nichž se každá věnuje jednomu návrhu vyrobeného MEMS systému.



Obrázek 2.21: Experimentální aparatura pro měření výchylek MEMS systémů. Uprostřed fotografie je elektronový mikroskop TESCAN VEGA se zabudovaným manipulátorem (a) spojeným s ampérmetrem (b). Vlevo za ním je osciloskop (c), generátor funkcí (d) a napěťový zesilovač (e).

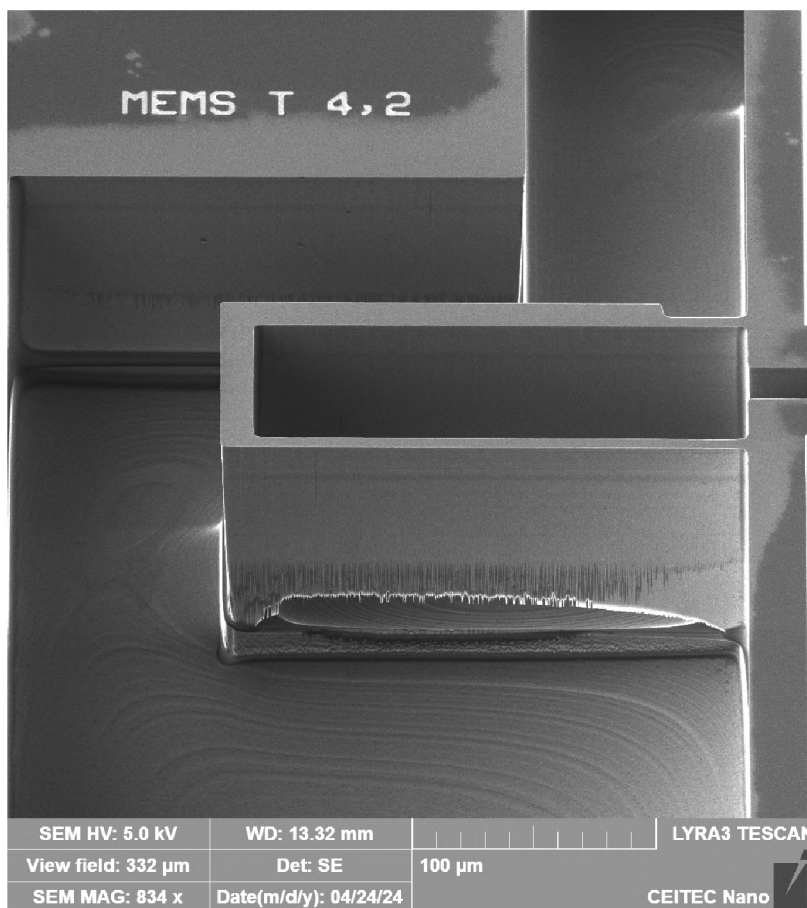
Pro měření výchylek byl vzorek umístěn na držáku do komory elektronového mikroskopu. Vodivý drát spojený s měděnou destičkou se připevnil k uzemněné části mikroskopu. Dále se na manipulátor v komoře našroubovala matice s přivařeným ostrým hrotem. Takto bylo možné ostrým hrotem manipulovat během pozorování vzorku. Pro přivedení elektrického napětí a kontrolu hodnoty protékajícího proudu byl součástí experimentální sestavy také ampérmetr, napěťový zesilovač, generátor funkcí a osciloskop. Fotografie experimentální sestavy je na obrázku 2.21 a vnitřek komory elektronového mikroskopu je zachycen na obrázku 2.22.



Obrázek 2.22: Manipulátor uvnitř komory elektronového mikroskopu.

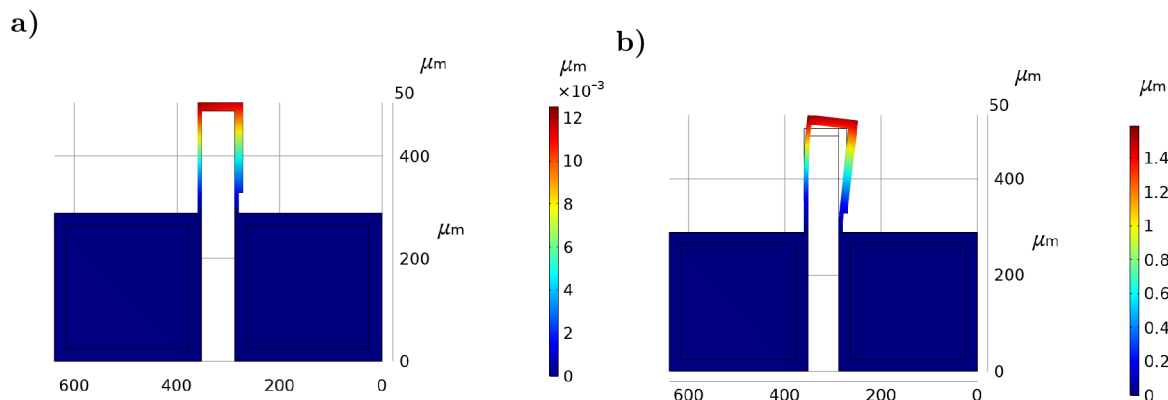
2.4.1. Termomechanický aktuátor

Výsledný vyrobený termomechanický aktuátor i přes optimalizaci procesu DRIE podléhá ve spodní části tenké větve vlivu podleptávání. Použití LF procesu přineslo v tomto směru výrazné zlepšení, dokonalejší odstranění podleptávání by vyžadovalo optimalizaci dalších parametrů procesu DRIE, jakými jsou tlak v komoře, objem plynů anebo výkon zdroje střídavého napětí.

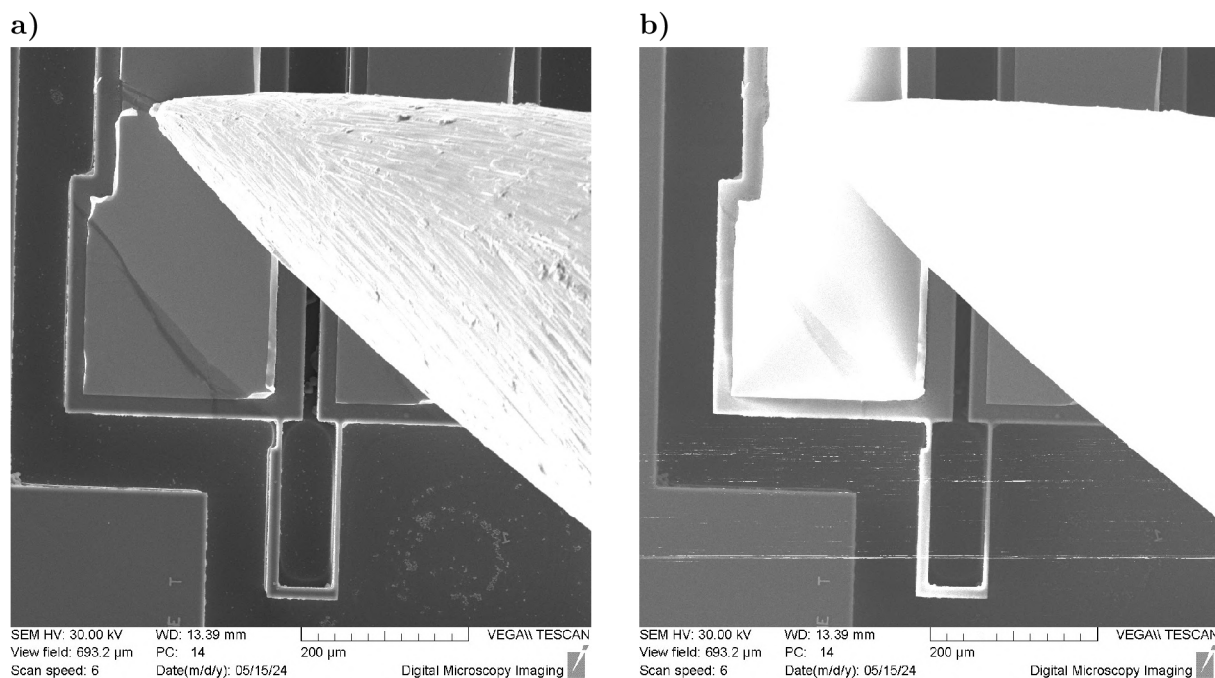


Obrázek 2.23: Fotografie vyrobeného termomechanického aktuátoru z elektronového mikroskopu. Ve spodní části kolmé stěny tenké větve je vidět vliv podleptávání.

Do simulací z Comsolu pro termomechanický aktuátor byly dosazeny rozměry z výrobního procesu a technické parametry odpovídající použitému SOI *wafere*. Po provedení simulací se výchylka pohybovala v řádu nanometrů. Tato velmi malá hodnota je způsobena vysokou rezistivitou SOI *wafere*, která se pohybovala v rozmezí 72–88 Ωcm . Čím je hodnota rezistivity vyšší, tím hůře materiál vede proud. V rámci této bakalářské práce, která se zabývá optimalizací výrobního procesu, byl použit SOI *wafere*, který byl již k dispozici od firmy onsemi. Pro budoucí aplikace je možné použít SOI *wafere* s nižší rezistivitou, který je běžně dostupný [44]. Vliv změny rezistivity na výslednou výchylku je ukázán na obrázcích 2.24a) a 2.24b).



Obrázek 2.24: Studie z programu COMSOL Multiphysics pro termomechanický aktuátor s výrobními parametry: a) vykreslení deformace způsobené napětím 100 V se škálovacím faktorem zvětšení deformace 20 pro materiál s rezistivitou $88 \Omega\text{cm}$, b) stejná studie s pozměněnou hodnotou rezistivity na $0,04 \Omega\text{cm}$.



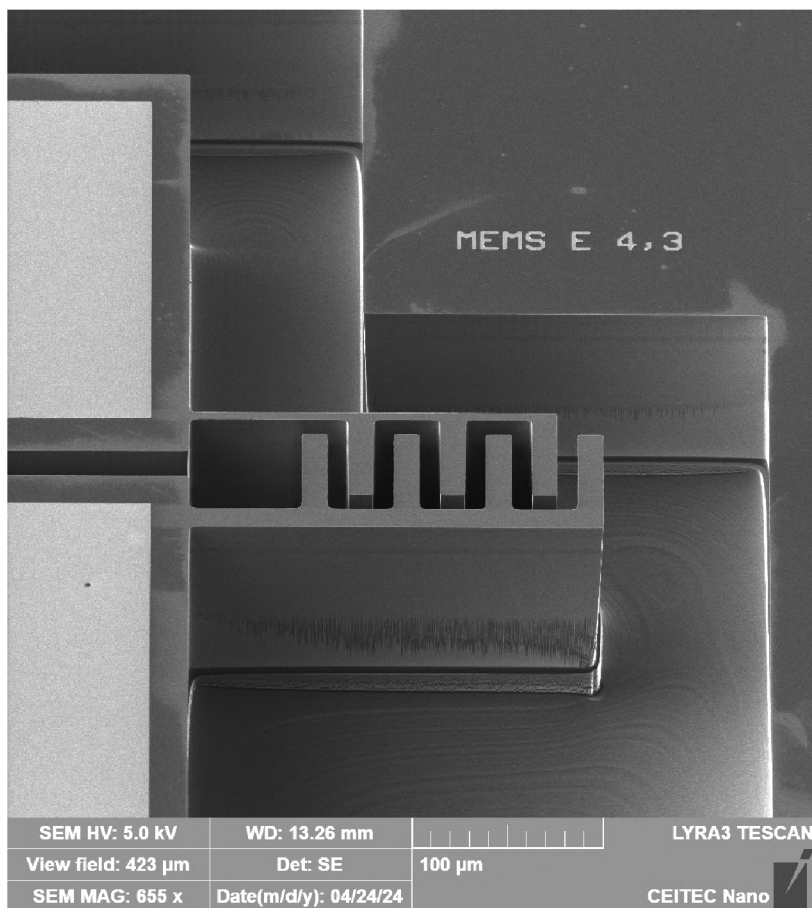
Obrázek 2.25: Snímky zkoumání možného vychýlení termomechanického MEMS z elektronového mikroskopu: a) ostrý hrot s termomechanickým MEMS bez přivedeného napětí, b) stejná situace s přivedeným napětím o hodnotě 320 V.

Pro pozorování případné výchylky se hrot manipulátoru dotýkal zlaté vodivé cesty jedné větve MEMS systému. Druhá větev byla uzemněna. Na hrot bylo vyzkoušeno aplikovat maximální možné napětí, pro které mikroskop ještě dokázal vytvořit obraz. Na obrázku 2.25b) je vidět, že ani napětí o hodnotě 320 V nevytvořilo pozorovatelnou výchylku a že již způsobovalo rušení při vytváření obrazu.

2.4.2. Elektrostatický aktuátor

V případě elektrostatického aktuátoru se vliv podleptávání přistoupením na LF proces projevil značně méně než u přechozího termomechanického aktuátoru. Vyrobená struktura je zachycena na obrázku 2.26.

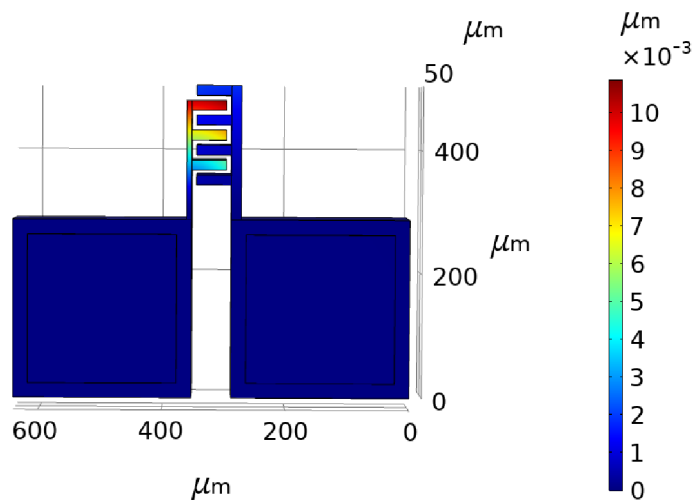
Také pro elektrostatický aktuátor byla provedena aktualizace simulací z Comsolu pro výrobní parametry. Výchylka se zde opět pohybuje řádově v nanometrech. Pro zvýšení této hodnoty se v praxi elektrostatické aktuátory vyrábějí s výrazně vyšším počtem zubů. Počet zubů pak přímo zvětšuje působící sílu a tedy i zvyšuje výchylku, což je ukázáno v rovnici 2.4. V této práci byl počet navržených zubů nízký za účelem dodržení podobných rozměrů jako u termomechanického aktuátoru. Tímto způsobem došlo k získání srovnatelných výsledků po provedení DRIE procesu.



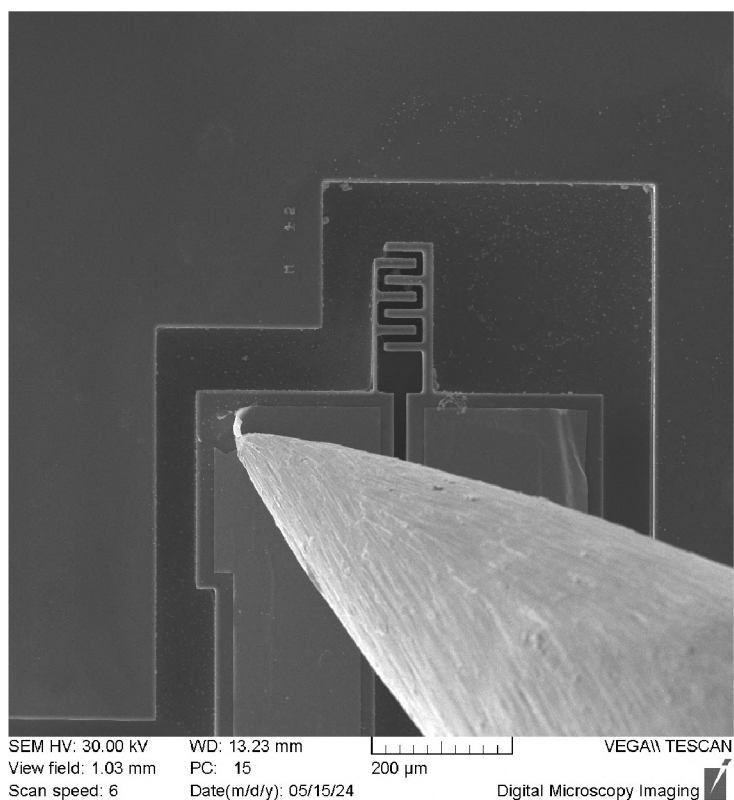
Obrázek 2.26: Vyrobený elektrostatický aktuátor zobrazený elektronovým mikroskopem. Ve spodní části kolmé větve aktuátoru je vidět částečné odstranění vlivu podleptávání.

Experimentální ověření simulací z Comsolu probíhalo stejným způsobem jako u termomechanického aktuátoru. Jediným rozdílem zde bylo to, že na ampérmetru nebyl zaznamenán žádný proud. To potvrdovalo, že mezi jednotlivými větvemi hřebenového ak-

tuátoru působila elektrostatická síla. Její velikost ovšem nebyla dostatečná na to, aby vyvolala viditelnou výchylku.



Obrázek 2.27: Studie z programu COMSOL Multiphysics pro elektrostatický aktuátor s výrobními parametry. Deformace je způsobená napětím 100 V se škálovacím faktorem zvětšení deformace 30.



Obrázek 2.28: Zobrazení experimentu pozorování možné výchylky elektrostatického MEMS při aplikovaném napětí 100 V elektronovým mikroskopem.

Závěr

Tato bakalářská práce byla zaměřena na možnosti vývoje a výroby mikroelektromechanických systémů. Cílem bylo vytvořit návrh a prověřit možnosti výroby navrženého MEMS systému. Přínos této práce spočívá především v kompletním a uceleném popisu výrobních kroků, které vedou k vytvoření mikroelektromechanického systému, pro laboratorní podmínky laboratoří CEITEC Nano. Jednotlivé kroky výroby se v literatuře popisují zpravidla odděleně a kombinace provedených výrobních postupů s vytvořeným návrhem je originálem.

Začátek práce byl věnován představení mikroelektromechanických systémů. Dále bylo poukázáno na široký aplikační potenciál s konkrétními případy včetně propojení MEMS systémů a mikroskopů atomárních sil. Jelikož se technologie mnoha MEMS systémů vyznačuje použitím různých fyzikálních principů, tak zde byly rozebrány tři nejčastěji využívané: elektrostatická síla, piezoelektrický jev a termoelektrický jev. U návrhu termomechanického aktuátoru se vyskytuje teplotní roztažnost, proto zde byl popsán její princip na atomové úrovni.

Proces vlastního návrhu začal u vytvoření simulací v programu COMSOL Multiphysics. V práci byl program nejprve obecně představen a poté byly ukázány vytvořené návrhy MEMS systémů. Dále následoval popis postupu práce v programu včetně krátké části týkající se metody výpočtu simulací.

Druhá část práce se zabývala vlastním návrhem MEMS systému. V ní došlo nejprve k přechodu od obecného popisu simulací ke konkrétním návrhům a byly zde představeny modely termomechanického i elektrostatického aktuátoru. V obou těchto případech byl charakterizován princip funkčnosti, který byl v případě elektrostatického aktuátoru doprovázen odvozením tvaru působící elektrostatické síly.

Dále byl v práci rozebrán provedený výrobní proces. Nejprve byl popsán použitý SOI *wafers*, jeho rozřezání na menší vzorky a čištění těchto vzorků. Následovala charakterizace procesu optické litografie s vytvořenou maskou v programu KLayout. Další části textu byly věnovány čištění vzorku v plazmatu a nanesení kovové vodivé vrstvy. Protože byl výrobní krok hloubkového reaktivního iontového leptání jedním ze stěžejních, tak mu byla věnována rozsáhlejší část textu, ve které je jak popis samotného procesu leptání a doprovodných měření, tak i optimalizace provedeného postupu. Poté byly v práci uvedeny závěrečné výrobní kroky, a to leptání v tlumené kyselině fluorovodíkové a kontaktování.

Poslední část této práce byla zaměřena na dosažené výsledky. Zde byly prezentovány fotografie vytvořených MEMS systémů z elektronového mikroskopu s komentáři

provedené optimalizace DRIE procesu. Také zde byla ukázána experimentální aparatura pro pozorování výchylky pohyblivých částí navržených aktuátorů. V rámci prováděných experimentů nedošlo k pozorování vizuálních vychylek, což odpovídalo upraveným simulacím s výrobními parametry. V posledních částech textu byly diskutovány příčiny těchto výsledků, včetně rozboru nutných změn při budoucích aplikacích pro dosažení výraznějšího vychýlení.

Mezi hlavní poznatky pro optimalizaci obdobného výrobního procesu lze zařadit vyhnutí se čištění vzorku v plazmatu před nanesením kovové vrstvy, použití chromu jako adhezivního materiálu namísto titanu a provádění celého výrobního procesu se SOI *wafere*m vyznačujícím se nižší hodnotou rezistivity.

Přestože vyrobené aktuátory nevykazují dostatečnou výchylku, tak lze cíle práce považovat za úspěšně splněné. Výroba MEMS systémů je komplexní problém, který by i pro člověka se zkušenostmi s výše popsanými výrobními metodami představoval kvůli jejich provázanosti nelehký úkol. Samozřejmě způsobů a metod, jak se dostat k finálnímu výsledku, je více, ať už se jedná o zvolení jiných druhů fotorezistů, změnu leptacích procesů anebo zcela odlišné navržení struktury masky pro optickou litografii. Proto tato bakalářská práce představuje jednu z mnoha verzí realizace vývoje a výroby mikroelektromechanických systémů.

Seznam použité literatury

- [1] LINDROOS, Veikko, Ari LEHTO, Markku TILLI a Teruaki MOTOOKA. *Handbook of Silicon Based MEMS Materials and Technologies* [online]. Elsevier, 2010. ISBN 978-0-8155-1594-4. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/C2009-0-19030-X>
- [2] GAD-EL-HAK, Mohamed. *The MEMS handbook*. Boca Raton: CRC Press, 2002. ISBN 0-8493-0077-0.
- [3] BANKS, Danny. *Microengineering, MEMS, and Interfacing A Practical Guide*. 2006. Taylor & Francis Group, 2006. ISBN 978-0-8247-2305-7.
- [4] VOIGTLÄNDER, Bert. *Atomic Force Microscopy*. Druhé vydání. Springer, 2019. ISBN 978-3-030-13653-6.
- [5] YANG, Chih-Wen, Ing-Shouh HWANG, Yen Fu CHEN, Chia Seng CHANG a Din Ping TSAI. *Imaging of soft matter with tapping-mode atomic force microscopy and non-contact-mode atomic force microscopy*. Nanotechnology. 2007, 18(8). ISSN 0957-4484. Dostupné z: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0957-4484/18/8/084009>
- [6] ITO, Shingo, Johannes SCHLARP, Mathias POIK a Georg SCHITTER. *Atomic Force Microscopy Breaking Through the Vertical Range-Bandwidth Tradeoff*. IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2021, 68(1), 786-795.
- [7] YONG, Y. K., A. G. FOWLER, A. MOHAMMADI a S. O. R. MOHEIMANI. *Control of a MEMS Nanopositioner for Atomic Force Microscopy*. The International Federation of Automatic Control. 2013, 46(5), 375-382.
- [8] ALEMANSOUR, Hamed, Mohammad MAROUFI, Afshin ALIPOUR a S.O. Reza MOHEIMANI. *A Feedback Controlled MEMS Probe Scanner for On-chip AFM*. *International Federation of Automatic Control* [online]. 2019, 52(12), 295-300 [cit. 2024-03-23]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896319316817>
- [9] MAROUFI, Mohammad, Hamed ALEMANSOUR, M. Bulut COSKUN a S. O. Reza MOHEIMANI. *An adjustable-stiffness MEMS force sensor: Design, characterization, and control*. Mechatronics. 2018, 56, 198-210.
- [10] MALUF, Nadim a Kirt WILLIAMS. *An Introduction to Microelectromechanical Systems Engineering*. Druhé vydání. Artech House, 2004. ISBN 1-58053-590-9.

- [11] GARDENER, Julian W., Vijay K. VARADAN a Osama O. AWADELKHARIM. *Microsensors, MEMS, and Smart Devices*. John Wiley & Sons, 2001. ISBN 0-471-86109X.
- [12] XIA, Dunzhu, Cheng YU a Lun KONG. *The Development of Micromachined Gyroscope Structure and Circuitry Technology*. Sensors. 2014(14), 1394-1473.
- [13] SYDENHAM, Peter H. a Richard THORN, *Handbook of Measuring System Design*. Třetí vydání. Wiley, 2005. ISBN 9780471497394.
- [14] BAO, Minhang. *Analysis and Design Principles of MEMS Devices*. Elsevier B.V., 2005. ISBN 0 444 51616 6.
- [15] PETRŽÍLKA, Václav a Josef Bartoloměj SLAVÍK. *Piezoelektrina a její použití v technické praxi*. V Praze: Jednota českých matematiků a fyziků, 1940. Dostupné také z: <https://www.digitalniknihovna.cz/mzk/uuid/uuid:7ad1e070-6bf2-11e4-8991-005056827e51>
- [16] ARAR, Steve. *Thermocouple Principles – the Seebeck Effect and Seebeck Coefficient*; [online]. 2022 [cit. 2024-03-31]. Dostupné z: <https://shorturl.at/qtXT7>
- [17] BENASSI, Enrico. *The Zero Point Position in Morse's potential and accurate prediction of thermal expansion in metals*. Chemical Physics. 2018, 515, 323–335.
- [18] COMSOL Multiphysics® v. 6.2. COMSOL AB, Stockholm, Sweden. Dostupné z: <https://www.comsol.com/>
- [19] COMSOL, COMSOL multiphysics reference guide, COMSOL Multiphysics® v. 6.2. COMSOL AB, Stockholm, Sweden. 2024 Dostupné z: https://doc.comsol.com/5.5/doc/com.comsol.help.comsol/COMSOL_ReferenceManual.pdf
- [20] COMSOL multiphysics application library, COMSOL Multiphysics® v. 6.2. COMSOL AB, Stockholm, Sweden. 2024
- [21] RAIDA, Zbyněk. *Multimediální učebnice – elektromagnetické vlny, mikrovlnná technika*, [online]. FEE, VUT Brno, 2010. Dostupné z: https://www.radio.feec.vutbr.cz/raida/multimedia/index.php?nav=def&src=metoda_konecných_prvku&bck=8
- [22] POTEHNKINA A a C. WANG. *Review of Electrothermal Actuators and Applications*. Actuators. 2019, 8(4). Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/act8040069>

- [23] BANEES, Adam. *Fabrication of a MEMS Comb Drive Actuator*. Microelectronic Engineering Conference. 2016, 34. Dostupné z: <https://repository.rit.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1510&context=ritamec>
- [24] MECART CLEANROOMS. *Cleanroom clasification*, [online]. 2016 [cit. 2024-03-12]. Dostupné z: <https://shorturl.at/cRSV8>
- [25] SZE, S. M. a M. K. LEE. *Semiconductor Devices Physics and Technology*. Třetí vydání. John Wiley, 2012. ISBN 978-0470-53794-7.
- [26] SUMCO. *Wafer forming process*, [online]. 2017 [cit. 2024-03-13]. Dostupné z: https://www.sumcosi.com/english/products/process/step_02.html
- [27] STŘÁLKOVÁ, Lenka. ONSEMI. *Onsemi podporuje studentskou vědeckou činnost* [online]. [cit. 2024-05-22]. Dostupné z: https://kariera-onsemi.cz/studentska_ved_cinnost/
- [28] OHL, Brandon. *Miller Indices for Crystal Directions and Planes*, Materials Science & Engineering Student, [online]. 2022 [cit. 2024-02-14]. Dostupné z: <https://mstudent.com/miller-indices/>
- [29] MICROCHEMICALS, *Development*, [online]. 2024 [cit. 2024-01-27]. Dostupné z: https://www.microchemicals.com/downloads/application_notes.html
- [30] UNIVERSITY WAFER. *Silicon Wafers Ultra-Sonic Cleaning Process*, [online]. 2023 [cit. 2024-01-27]. Dostupné z: <https://www.universitywafer.com/ultrasonic-cleaning.html>
- [31] MICROCHEMICALS, *Substrate Pretreatment: Cleaning and Adhesion Promotion*, [online]. 2024 [cit. 2024-01-27]. Dostupné z: https://www.microchemicals.com/downloads/application_notes.html
- [32] KLAYOUT. *KLayout - Your Mask Layout Friend* [online]. [cit. 2024-05-22]. Dostupné z: <https://www.klayout.de/>
- [33] UEHARA Takuya, Nobuya HIROSHIBA, Masaru NAKAGAWA a Shoichi KUBO. *Anisotropic Oxygen Reactive Ion Etching for Removing Residual Layers from 45 nm-width Imprint Patterns*. Journal of Photopolymer Science and Technology. 2016, 29(2), 201-208. ISSN 1349-6336.
- [34] MKS INSTRUMENTS. *Reactive Ion Etching* [online]. 2024 [cit. 2024-03-20]. Dostupné z: <https://www.mks.com/n/reactive-ion-etching>

- [35] AMADI, Eberechukwu Victoria, Anusha VENKATARAMAN a Chris PAPADOPOULOS. *Nanoscale self-assembly: Concepts, applications and challenges*. *Nanotechnology*. 2022, 33(13).
- [36] GILMORE, John. PHOTONICS SPECTRA. *Emerging Applications Signal New Opportunities for Spectroscopy* [online]. 2020 [cit. 2024-03-03]. Dostupné z: https://www.photonics.com/Articles/Emerging_Applications_Signal_New_Opportunities/a66451
- [37] BINKOVÁ, Petra. *Výroba a testování částí MEMS zařízení pro mikromanipulace*. Brno, 2020. Diplomová práce. Vysoké Učení Technické.
- [38] VERMA, Ankita, Marc WEBER, Joshah JENNINGS a K. G. LYNN. *Fabrication of 3D charged particle trap using through-silicon vias etched by deep reactive ion etching* *Journal of Vacuum Science & Technology B*. 2013, (31).
- [39] WANG Yisong, GUO Yunxia a ZHANG Haixia, *Modeling and simulation of footing effect in DRIE process*, 2007, 7th IEEE Conference on Nanotechnology (IEEE NANO), Hong Kong, 2007. Strany 1135-1138, dostupné z: <https://doi.org/10.1109/NANO.2007.4601383>.
- [40] WASILIK Matthew a PISANO Albert P. *Low-frequency process for silicon-on-insulator deep reactive ion etching*, *Proc. SPIE 4592, Device and Process Technologies for MEMS and Microelectronics II*, 2001. Dostupné z: <https://doi.org/10.1117/12.449003>.
- [41] MERCK KGAA. *Technical datasheet AZ[®]12XT-20PL Series*. 2021. Dostupné z: https://www.microchemicals.com/products/photoresists/az_12xt.html.
- [42] WILLIAMS K. R., K. GUPTA a M. WASILIK. *Etch rates for micromachining processing-Part II*, *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2003, 12 (6). Strany 761-778, dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1257354>.
- [43] HARMAN, George. *Wire Bonding in Microelectronics*. Třetí vydání. The McGraw-Hill Companies, Inc., 2010 ISBN 978-0-07-164265-1. Dostupné z: <https://www.accessengineeringlibrary.com/content/book/9780071476232>
- [44] SIEGERT WAFER GmbH. *Silicon Wafers* [online]. [cit. 2024-05-22]. Dostupné z: https://www.siegertwafer.com/datenbankauf_ruf_silicon.php?v=suche&l=en&p=1

Seznam zkratek

MEMS	mikroelektromechanické systémy
MKP	metoda konečných prvků
SOI	křemík na izolátoru (<i>silicon on insulator</i>)
IPA	isopropylalkohol
HMDS	hexametyldisilan
DWL	přímé osvětlení laserem (bezmasková litografie) (<i>direct write laser</i>)
TMAH	hydroxid tetrametylamonný
RIE	reakivní iontové leptání (<i>reactive ion etching</i>)
QCM	křemenná krystalová mikrorovnováha (<i>quartz crystal microbalance</i>)
DRIE	hloubkové reaktivní iontové leptání (<i>deep reactive ion etching</i>)
TSV	skrze křemík prostřednictvím (<i>through silicon via</i>)
LF	nízkofrekvenční (<i>low frequency</i>)
HF	kyselina fluorovodíková (<i>hydrofluoric acid</i>)
BHF	tlumená kyselina fluorovodíková (<i>buffered hydrofluoric acid</i>)

Seznam příloh

Přílohou této bakalářské práce je komprimovaná složka, která obsahuje tyto soubory:

- ElStat_mems_100V_vyrobmodel.mph,
- ElStat_mems_100V_vzor.mph,
- Termo_mems_100V_vzor.mph,
- Termo_mems_vyrobmodel_100V.mph,
- MEMS_optickalitografie.gds.