



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV FYZIKÁLNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF PHYSICAL ENGINEERING

KONSTRUKCE ODMĚŘOVACÍHO SYSTÉMU PRO SYSTÉM REAKTIVNÍHO IONTOVÉHO LEPTÁNÍ

MECHANICAL DESIGN OF MEASUREMENT SYSTEM FOR REACTIVE ION ETCHING SYSTEM

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Tadeáš Maňka

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Mojmír Šerý, Ph.D.

BRNO 2016

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav fyzikálního inženýrství
Student: **Bc. Tadeáš Maňka**
Studijní program: Aplikované vědy v inženýrství
Studijní obor: Přesná mechanika a optika
Vedoucí práce: **Ing. Mojmír Šerý, Ph.D.**
Akademický rok: 2015/16

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 diplomové práce:

Konstrukce odměřovacího systému pro systém reaktivního iontového leptání

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Výroba mikro-elektro-mechanických systémů reaktivním iontovým leptáním (RIE) vyžaduje velmi kvalitní odměřovací a pozorovací systém. Typické velikosti detailů vyleptaných struktur se pohybují v příčném směru v řádech stovek nanometrů a v podélném směru i o řád nižší. Přesnost leptání v podélném směru nám dále znesnadňuje i komplexní systém leptané struktury, kdy jednotlivé vrstvy jsou složeny z materiálů s různou leptací rychlostí. Jednou z cest jak tento problém vyřešit je kvalitní zobrazovací systém pro pozorování leptaných struktur. V podélném směru nám řešení nabízí laserová interferometrie.

Náplní práce bude konstrukce interferometrické jednotky kombinované s pozorovacím systémem. Interferometrický modul využije předchozích návrhů jednotek zkonstruovaných na ÚPT a upravených pro požadovanou aplikaci na systém RIE. Modul pro pozorování se bude skládat z objektivu a CCD kamery s vysokým rozlišením. Kompletní zařízení bude umístěno na polohovacím systému pro zaměření na cílené místo vzorku. Funkce zařízení bude ověřena proměřeními různých typů vzorků.

Cíle diplomové práce:

- optický, mechanický a elektrický návrh odměřovacího systému
- příprava výkresové dokumentace a výběr dodavatele komerčně dostupných částí modulu (CCD kamera, polohovací mechanismy apod.)
- kompletace modulu ze zhotovených částí
- experimentální činnost a ověření funkce modulu na systému RIE

Abstrakt

Cílem této diplomové práce je zkonstruovat funkční odměřovací systém pro systém reaktivního iontového leptání (RIE). V práci je použit předchozí návrh Michelsonova interferometru vyvinutého na Ústavu přístrojové techniky, v.v.i. (ÚPT). Teoretická část práce se věnuje problematice interferenčních metod pro přesné měření délek. V další části je popsán proces leptání pomocí RIE. V praktické části je navržena testovací sestava z dílů firmy Thorlabs. Na ní je odzkoušena funkčnost a přesnost měření je porovnána s profilometrem. Dalším krokem je optimalizace navržené sestavy. Byla vytvořena technická dokumentace a vyrobena odměřovací aparatura na míru pro účely pracovníků ÚPT.

Summary

The aim of this work is to design fully working measuring system for the reactive ion etching system (RIE). The Michelson interferometer, previously developed in Ústav přístrojové techniky, v.v.i., is used in this work. The theoretical part is aimed at description of interferometric methods for precise measuring of length. In next part the etching proces with RIE is described. In practical part the testing system was constructed from the parts of Thorlabs company. The functionality was controlled with this system and the results of measuring were compared with the profilometer. In next step technical drawings were created and the whole system was made.

Klíčová slova

interferometrie, Michelsonův interferometr, reaktivní iontové leptání, RIE, přesné měření délek, kinematický držák

Keywords

interferometry, Michelson interferometer, reactive ion etching, RIE, precise measuring of length

MAŇKA, T. *Konstrukce odměřovacího systému pro systém reaktivního iontového leptání*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 42 s. Vedoucí Ing. Mojmír Šerý, Ph.D.

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval sám pod vedením Ing. Mojmíra Šerého, Ph.D. a že veškeré podklady, ze kterých jsem čerpal, uvádím v seznamu použité literatury.

Bc. Tadeáš Maňka

Děkuji Ing. Mojmiru Šerému, Ph.D. za vedení a cenné připomínky. Dále děkuji zaměstnancům Ústavu přístrojové techniky AV ČR, v. v. i. za pomoc při vytváření této práce. V neposlední řadě děkuji své rodině za velkou podporu během studia.

Bc. Tadeáš Maňka

Obsah

1	Úvod	2
2	Optika a interferometrie	3
2.1	Laserová interferometrie	3
2.1.1	Vlna a její popis	3
2.1.2	Interference vln	3
2.1.3	Koherence	4
2.1.4	Laserové interferometry	6
2.1.5	Přesné měření délek	9
3	Systém reaktivního iontové leptání	14
3.1	Plazmochemické leptání	14
3.1.1	Leptací proces	14
3.1.2	Bosch proces	16
4	Kinematický držák optických komponent	17
4.1	Princip kinematického držáku	17
4.2	Materiálové charakteristiky	18
4.2.1	Teplotní roztažnost	18
4.2.2	Tepelná vodivost	19
4.2.3	Materiálová nestabilita	19
4.2.4	Zhodnocení materiálů	19
5	Návrh testovací sestavy	21
5.1	Interferometr na ÚPT	21
5.2	Příprava vzorku	22
5.3	Testovací sestava	24
6	Měření	26
7	Optimalizovaná sestava	30
7.1	Vybrané konstrukční prvky	31
8	Závěr	35
9	Seznam použitých zkratk a symbolů	41
10	Seznam příloh	42
10.1	Skript pro prostředí Matlab	42
10.2	Výkresová dokumentace	42

1. Úvod

Optika je část fyziky, která se zabývá podstatou světla a zákonitostmi světelných jevů, které vznikají při šíření světla a při vzájemném působení světla a látky.

Optika má velice dlouhou historii a je vedle mechaniky jedním z nejstarších oborů fyziky. To je pravděpodobně způsobeno tím, že člověk získává zrakem více než 80 % informací o okolním světě. Optika také otevřela člověku pohled do mikrosvěta a do vzdálených těles ve vesmíru vynálezem mikroskopu a dalekohledu [7].

V posledních čtyřiceti letech prochází optika prudkým rozvojem, který je spojen především s vynálezem laseru. Vlastnosti laseru našly uplatnění v lékařství, v laboratorní technice, v měření a zásadním způsobem změnil výrobní technologie. Laser je součástí celé řady přístrojů, s nimiž se setkáváme v každodenním životě. Jako příklad uvedme laserové přehrávače optických médií nebo laserové tiskárny. [7].

Dalším oborem, který se neustále vyvíjí, je výroba mikro-elektro-mechanických systémů reaktivním iontovým leptáním (RIE). RIE spadá do kategorie takzvaného suchého leptání, kdy je k odstraňování materiálu použita chemicky reaktivní plazma. Tyto vysokoenergetické ionty reagují s povrchem leptaného materiálu a vytváří tak struktury, které jsou denně používány celou řadou přístrojů (uvedme např. čipy mikroprocesorů)

Motivací této práce je sestavit funkční prototyp laserového interferometru kombinovaného s pozorovacím systémem, který bude sloužit k měření hloubky vyleptané struktury na systému RIE. Výhoda tohoto řešení je, že budeme znát hloubku leptu v reálném čase a moci například leptací proces ukončit dříve, než dojde k příliš velkému úbytku materiálu nebo dokonce k destrukci vzorku. Celá sestava by měla být dobře ovladatelná, zajišťovat stabilní provoz a v poslední řadě by neměla být příliš drahá.

Na trhu samozřejmě takto integrované komerční systémy dávno existují. Jejich hlavní nevýhodou však není cena, jak by se mohlo na první pohled zdát, ale uzavřenost a mnohdy nepřesnost. Přesným měřením délek se již dlouhou dobu věnují vědci z Ústavu přístrojové techniky AV ČR, v.v.i. (ÚPT) a jsou považováni za špičku v tomto oboru. Úkolem této práce tedy bude co možná nejvíce využít těchto nabytých znalostí a vytvořit měřicí aparaturu přesně ušitou na míru pro práci se systémem reaktivního iontového leptání.

Celý systém pro měření se bude skládat z interferometru zkonstruovaném na ÚPT a modulu pro pozorování, složeného z objektivu a kamery s vysokým rozlišením. Funkcí pozorovacího modulu bude dávat uživateli zpětnou vazbu o místě, kde probíhá měření.

2. Optika a interferometrie

Princip laserové interferometrie je důležitý pro tuto diplomovou práci a je vysvětlen v následující kapitole. Je zde popsána světelná vlna a interference optického záření. Dále je sestaven seznam interferometrů, které se nejčastěji používají pro přesné měření délek. Nejvíce prostoru je věnováno Michelsonově interferometru, protože je základem praktické části této práce.

2.1. Laserová interferometrie

2.1.1. Vlna a její popis

Optickou vlnu v bodech homogenního, nedisperzního, izotropního a neabsorbujícího prostředí popisuje takzvaná vlnová rovnice

$$\Delta^2 \Psi(\vec{r}, t) = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \Psi(\vec{r}, t)}{\partial t^2}, \quad (2.1)$$

kde funkce $\Psi(\vec{r}, t)$ se nazývá vlnová funkce, \vec{r} je polohový vektor a t je čas. Veličina v má rozměr rychlosti a má význam takzvané fázové rychlosti [5].

Jedním z řešení vlnové rovnice může být rovinná monochromatická vlna

$$\Psi(\vec{r}, t) = a(\vec{r}) \exp[i\phi(\vec{r}) + i\omega t] = A(\vec{r}) \exp[i\omega t], \quad (2.2)$$

kde ω je úhlová frekvence a $a(\vec{r})$ a $\phi(\vec{r})$ jsou funkce polohy takové, že vlnová funkce vyhovuje vlnové rovnici 2.1. Funkci $A(\vec{r})$, která závisí pouze na polohových souřadnicích, nazýváme komplexní amplitudou vlny [13].

Při pozorování světelných jevů je ale daleko důležitější veličinou intenzita světla I , která je podle [16, s. 94] úměrná čtverci modulu komplexní amplitudy vlny

$$I(\vec{r}) = |A(\vec{r})|^2 = A(\vec{r})A^*(\vec{r}). \quad (2.3)$$

2.1.2. Interference vln

Z linearit vlnové rovnice vyplývá, že nacházejí-li se dvě vlnové funkce v jednom bodě prostoru, výsledná vlnová funkce bude součtem obou těchto funkcí.

Pro výslednou hodnotu amplitudy tedy platí

$$A(\vec{r}) = A_1(\vec{r}) + A_2(\vec{r}). \quad (2.4)$$

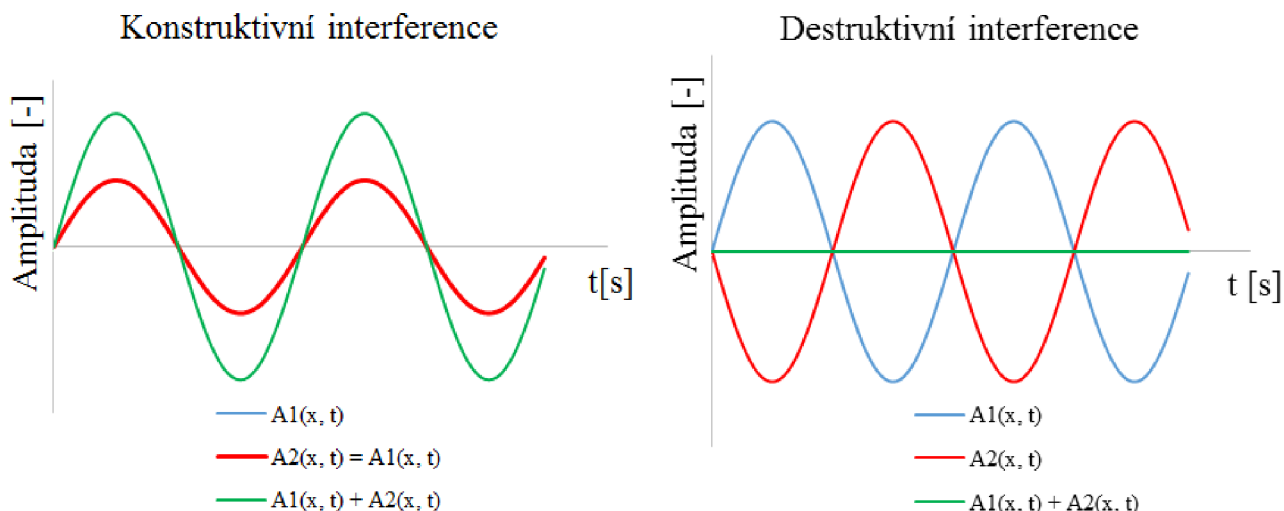
Pro intenzity dostaneme pomocí rovnice 2.3 interferenční zákon

$$I(\vec{r}) = I_1(\vec{r}) + I_2(\vec{r}) + 2\sqrt{I_1(\vec{r})I_2(\vec{r})} \cos(\Delta\varphi), \quad (2.5)$$

kde $\Delta\varphi$ je fázový rozdíl vln v poloze \vec{r} [4, s. 282].

Analýzou rovnice 2.5 zjistíme, že mohou nastat dva extrémní případy. Pokud je argument funkce $\cos(\Delta\varphi)$ roven sudému násobku čísla π hovoříme o takzvané konstruktivní interferenci. Pokud je roven lichému násobku čísla π pak hovoříme o destruktivní interferenci. Oba případy popisuje pro amplitudy v jedné dimenzi obr 2.1.

2.1. LASEROVÁ INTERFEROMETRIE



Obrázek 2.1: Dva extrémní případy interference. Vlevo je fázový rozdíl roven sudému násobku čísla π , vpravo je roven lichému násobku π .

2.1.3. Koherence

V předchozích případech jsme uvažovali dokonale monochromatické vlny. Reálné zdroje ale nejsou nikdy dokonale monochromatické a vždy vyzařují více či méně náhodně. Podle koherence světla můžeme usoudit, jestli interferenci budeme pozorovat, nebo nikoliv a rozlišujeme ji na dva typy - časová a prostorová koherence [15].

Časová koherence

Charakterizuje průměrnou korelaci mezi optickou vlnou v daném bodě prostoru a vlnou zpožděnou o nějaký časový okamžik v tom samém bodě. Jinými slovy nám říká, jak moc je zdroj světla monochromatický a jak dobře bude vlna sama se sebou interferovat v jiný časový okamžik. Pokud budeme mít optickou vlnu v čase t a bodě \vec{r} popsanou funkcí $\psi(\vec{r}, t)$, pak pro popis podobnosti vlny v časech t a $t + \tau$ zavádíme podle [4, s. 570] normalizovaný komplexní stupeň koherence jako

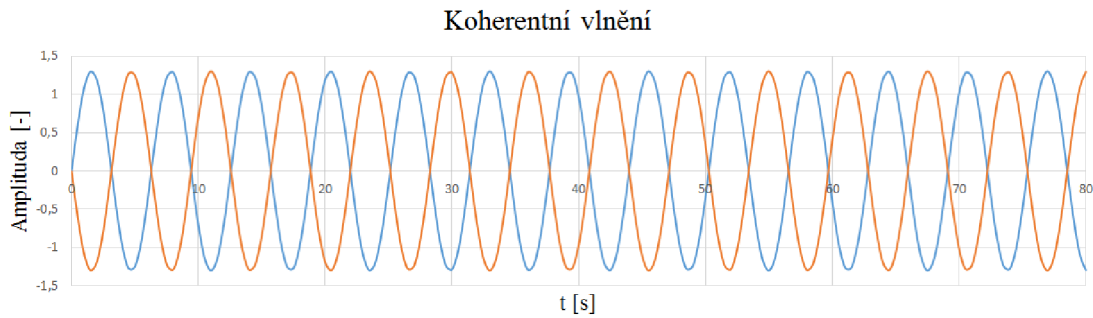
$$\Gamma(\tau) = \frac{\langle \psi^*(\vec{r}, t) \psi(\vec{r}, t + \tau) \rangle}{\langle \psi^*(\vec{r}, t) \psi(\vec{r}, t) \rangle}, \quad (2.6)$$

kde platí $0 \leq |\Gamma(\tau)| \leq 1$. Pro dokonale časově koherentní vlny je $|\Gamma(\tau)| = 1$. Pro dokonale časově nekoherentní vlny platí $|\Gamma(\tau)| = 0$. Pro jakýkoliv jiný případ je vlnění částečně koherentní. Pokud $|\Gamma(\tau)|$ klesá monotónně, pak časový okamžik, kdy nabyde předem definované hodnoty (typicky $\frac{1}{e}$ nebo $\frac{1}{2}$) nazýváme koherentní dobou τ_c . Vzdálenost

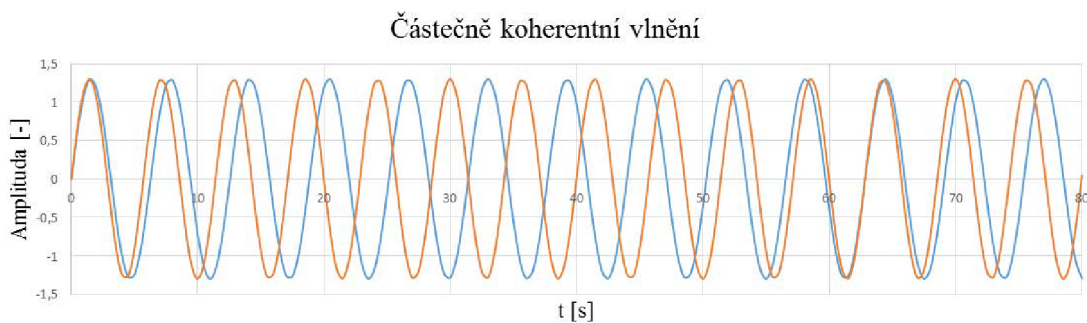
$$l_c = c\tau_c,$$

kteřou vlnění urazí za dobu τ_c , kde c je rychlost světla, nazýváme koherenční délkou. Pokud vlnění postupuje optickou soustavou jejíž délka je menší než l_c , pak říkáme, že je vlnění vůči této soustavě koherentní. Obrázek 2.2 ukazuje příklad dokonale koherentního

2. OPTIKA A INTERFEROMETRIE



Obrázek 2.2: Dvě vzájemně koherentní vlny. Fázový posuv je po celou dobu konstantní. Překresleno z [15]



Obrázek 2.3: Dvě částečně koherentní vlny. Fázový posuv není konstantní. Překresleno z [15]

vlnění, kde koherenční délka je $l_c = \infty$. Fázový posuv je po celou dobu šíření světla konstantní a vlny spolu interferují vždy, v tomto případě destruktivně [15].

Naproti tomu na obrázku 2.3 se fázový posuv mění a interference je omezená pouze na určitý časový okamžik.

S časovou koherencí úzce souvisí viditelnost V (někdy nazývaná jako kontrast). Jedná se o hloubku modulace interferenčního obrazce a platí pro ni vztah

$$V = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}}, \quad (2.7)$$

kde I_{max} a I_{min} je maximální, respektive minimální intenzita. Pokud jsou intenzity I_1 a I_2 z rovnice 2.5 stejné, pak podle [4, s. 571] platí

$$V = |\Gamma(\tau)|.$$

Časové koherence se měří na interferometrech s dělením amplitudy, typicky na Michelsonově interferometru, který bude popsán v další kapitole.

Prostorová koherence

Prostorovou koherenci popisujeme jako korelaci mezi optickou vlnou v určitý časový okamžik ve dvou rozdílných bodech prostoru. Jejím parametrem je koherentní plocha, na které můžeme interferenci pozorovat [15].

2.1. LASEROVÁ INTERFEROMETRIE

Dokonale prostorově koherentní zdroj je bodový. K tomu je zapotřebí nekonečně malá štěrbin. Bohužel nekonečně malým pinholem neprojde žádné světlo, tedy reálné zdroje mají vždy menší, než ideální prostorovou koherenci [3, s. 4].

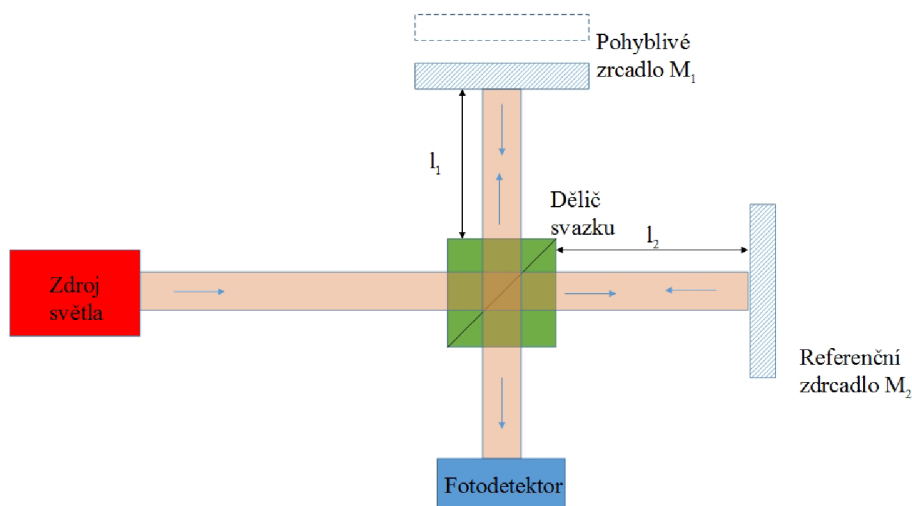
K měření prostorové koherence se používají interferometry s dělením vlnoplochy. Typickým zástupcem je Youngův interferometr také popsáný v následujícím textu.

2.1.4. Laserové interferometry

Tato kapitola popisuje základní typy světelných interferometrů. Rozdělujeme je na interferometry s dělením amplitudy a s dělením vlnoplochy. Z hlediska počtu interferujících vln je můžeme dále rozlišovat na dvousvazkové a vícesvazkové. Předmětem této práce je měření délek pomocí Michelsonova interferometru, který je popsán více detailněji.

Michelsonův interferometr

Jedná se o nejznámější dvousvazkový interferometr s dělením amplitudy, zkonstruovaný Albertem Abrahamem Michelsonem v roce 1881. Interferometr se skládá ze dvou zrcadel M_1 a M_2 a děliče svazku, tak jako na obrázku 2.4. Zdroj světla emituje světlo, které je děličem rozděleno na dvě větve. Referenční větev postupuje podél trasy l_1 a je odražena zpět zrcadlem M_1 , zatímco měřicí větev postupuje podél trasy l_2 a je odražena zrcadlem M_2 , které je pohyblivé. Tyto dvě odražené vlny se znovu spojí v děliči svazku a jsou zaznamenány fotodetektozem. Je-li rozdíl optických drah v referenční a měřicí větvi roven celočíselnému násobku vlnové délky, dojde ke konstruktivní interferenci (maxima intenzity). Je-li roven lichému násobku poloviny vlnové délky, dojde k destruktivní interferenci (minima intenzity) 13.



Obrázek 2.4: Schéma Michelsonova interferometru. Překresleno podle [3].

Za předpokladu koherentního světla o známé vlnové délce λ a lineární polarizace, dostaneme z rovnice 2.5 fázový rozdíl

$$\Delta\varphi = k(2l_2 - 2l_1) = \frac{2\pi}{\lambda} 2(\Delta l), \quad (2.8)$$

2. OPTIKA A INTERFEROMETRIE

kde k je vlnové číslo [15]. Pro konstruktivní interferenci (maxima intenzity) tedy platí

$$\frac{2\pi}{\lambda}2\Delta l = 2n\pi, \quad (2.9)$$

kde n je celé číslo a po vyjádření dráhového rozdílu Δl dostaneme

$$\Delta l = \frac{n\lambda}{2}. \quad (2.10)$$

Pro destruktivní interferenci (minima intenzity) pak

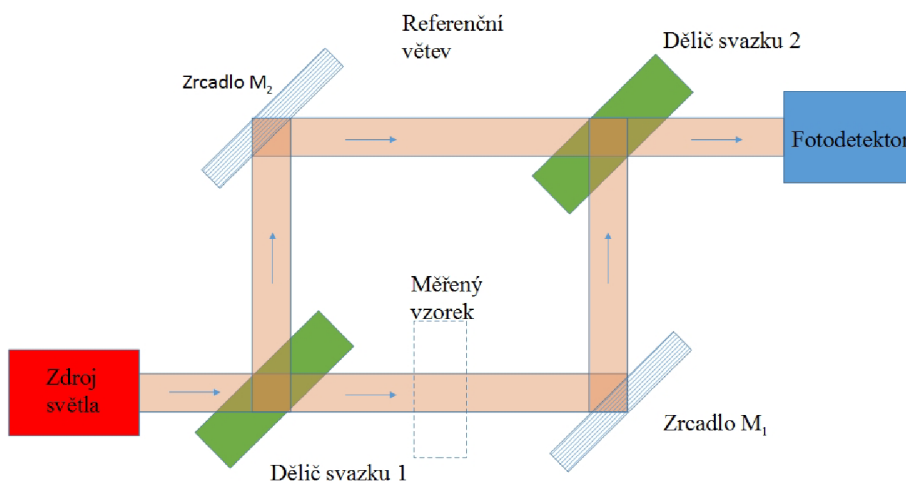
$$\Delta l = \left(n + \frac{1}{2}\right)\frac{\lambda}{2}. \quad (2.11)$$

Je zřejmé, že schéma Michelsonova interferometru je ekvivalentní vzduchové mezeře vzniklé mezi zrcadly M_1 a M_2 . Pomocí pohyblivého zrcadla je možno tuto tloušťku snižovat nebo zvyšovat. V tomto případě hovoříme o tzv. seřízení interferometru na nekonečnou šířku proužku. Sklonem zrcadel M_1 a M_2 lze vrstvu měnit z paralelní na klínovou. Interferometr je poté seřízen na konečnou šířku proužku [12].

Interferometr se používá pro přesné měření délek, v optické koherenční tomografii nebo k měření časové koherence.

Mach-Zenderův interferometr

Opět se jedná o dvousvazkový interferometr s dělením amplitudy. Skládá se ze soustavy dvou zrcadel a dvou děličů svazku tak jako na obrázku 2.5. Prvním děličem je vstupní vlna rozdělena na dvě - měřicí a referenční. Obě větve postupují podél stejných drah přes zrcadla na druhý dělič svazku, kde jsou opět spojeny do jedné větve. Pokud je optická délka drah stejná, uvidíme na fotodetektoru maximum intenzity (konstruktivní interference). Jestliže dojde ke změně optické dráhy v jedné z větví, dojde k posuvu fáze jedné z interferujících vln a tudíž i ke změně intenzity na fotodetektoru.



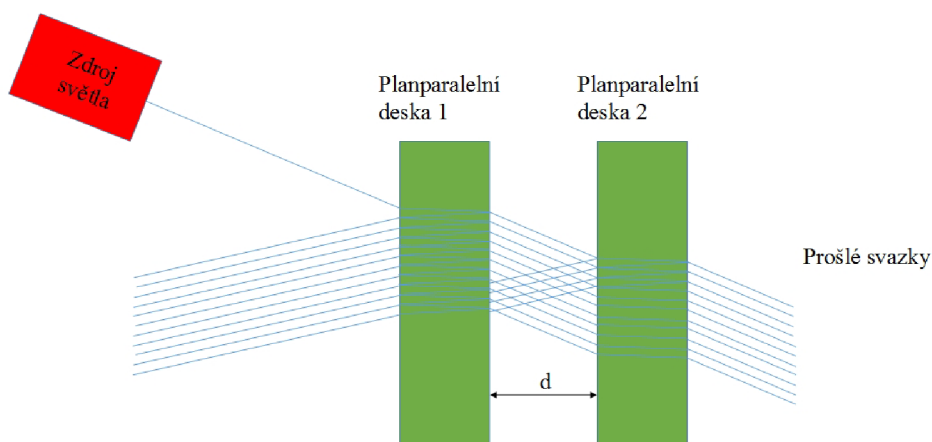
Obrázek 2.5: Schéma Mach-Zenderova interferometru. Překresleno podle [3].

2.1. LASEROVÁ INTERFEROMETRIE

Tento interferometr je vhodný ke zkoumání průhledných materiálů nebo ke sledování teplotních polí [12].

Fabry-Perrotův interferometr

Jedná se o hlavního představitele mnohosvazkového interferometru. Srdcem tohoto interferometru jsou dvě planparalelní skleněné desky s vysokou odrazivostí umístěné tak, jako na obrázku 2.6. Vstupní světelná vlna je několikanásobně odražena mezi planparalelními deskami. Pokud na detektoru zaznamenáme maximum intenzity, znamená to, že došlo ke konstruktivní interferenci a tudíž vzdálenost mezi deskami d je rovna celočíselnému násobku poloviny vlnové délky světla. Tento interferometr je základem většiny laserů a používá se též pro měření spektrálního složení zdroje světla [13].



Obrázek 2.6: Schéma Fabry-Perrotova interferometru. Překresleno podle [3].

Youngův interferometr

Představitel interferometru s dělením vlnoplochy. Kolimovaný svazek dopadá na desku, ve které jsou dva otvory P_1 a P_2 mezi nimiž je vzdálenost d . Z Heygensova principu se tyto otvory stávají dvěma zdroji kulových vln. Tyto vlny spolu interferují a vytváří na stínítku interferenční obrazec. Schéma Youngova interferometru je na obr. 2.7 [4, s. 393].

Pokud je $a \gg d$ a zároveň $a \gg x, y$, pak pro dráhový rozdíl přibližně platí

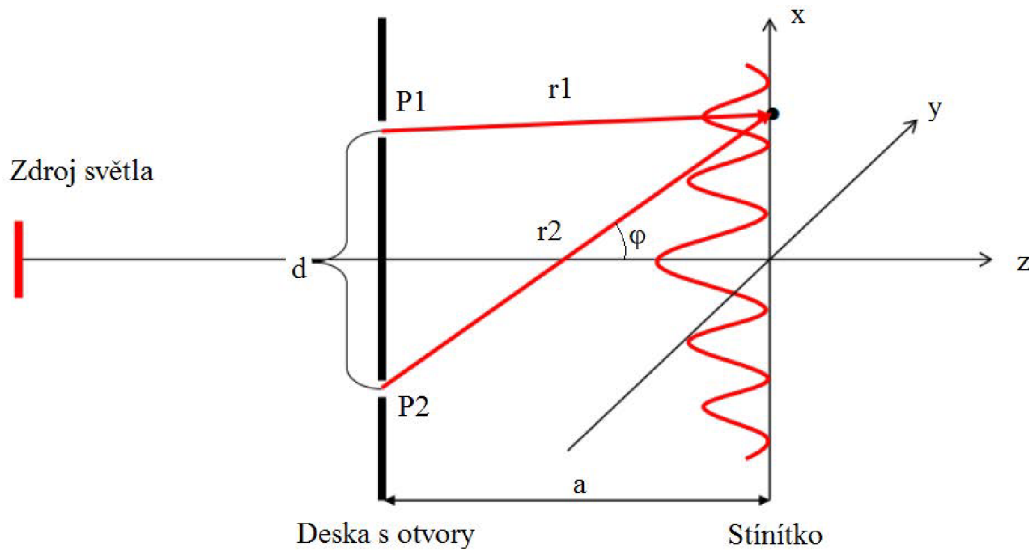
$$r_2 - r_1 \approx d \sin(\varphi) \approx d \frac{x}{a}. \quad (2.12)$$

Jestliže chceme zjistit polohu interferenčního maxima, musí být dráhový rozdíl roven celočíselnému násobku vlnové délky λ . Pro polohu m -tého maxima pak tedy platí

$$x_m \approx \frac{a}{d} m \lambda, \quad (2.13)$$

kde m je celé číslo [4, s. 394].

Tento interferometr se používá ke měření vlnové délky použitého světla a také k měření prostorové koherence.



Obrázek 2.7: Schéma Youngova interferometru. Překresleno podle [4].

Ostatní interferometry

Samozřejmě existuje ještě celá řada interferometrů, lišících se jak konstrukcí, tak účelem jejich použití. Zmínit můžeme například Twyman-Greenův interferometr, Fizeauův interferometr nebo Sagnacův interferometr. Pro potřeby této práce si ale vystačíme s výše uvedenými.

2.1.5. Přesné měření délek

Z principu Michelsonova interferometru vyplývá, že pokud známe vlnovou délku použitého záření, můžeme měřit změnu polohy měřícího zrcadla. Nejjednodušším způsobem měření polohy je počítání proužků, přičemž platí, že vzdálenost mezi dvěma po sobě jdoucími maximy odpovídá polovině vlnové délky světla. Tato metoda má ovšem značné nevýhody. Pouze z detekce intenzity nejsme schopni určit směr posuvu a zároveň nelze snadno rozlišit dvě polohy měřícího zrcadla. Touto metodou tedy nelze dosáhnout lepšího rozlišení než $\lambda/4$ [13].

Metody k zpřesnění měření délek a v některých případech dokonce určení směru posuvu, popisuje následující text.

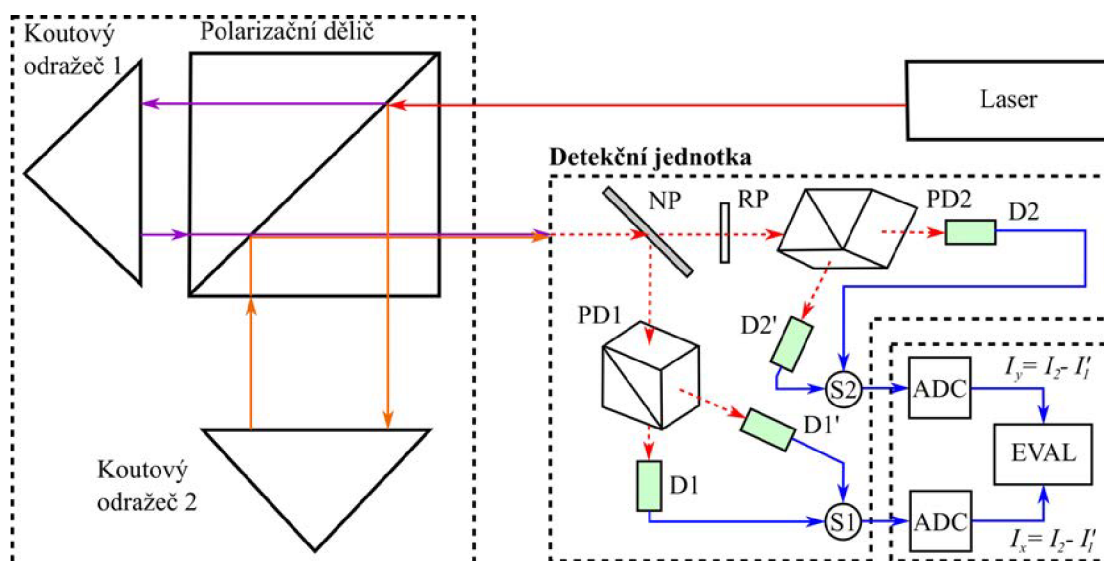
Metoda homodynní detekce

Tato metoda používá k interferenci laserové svazky o stejné frekvenci.

Obrázek 2.8 ukazuje Michelsonův interferometr v klasickém uspořádání. Laserový svazek s lineární polarizací vstupuje do polarizačního děliče pod úhlem 45° . To způsobí rozdělení svazku na dva, ovšem jejich polarizace jsou navzájem kolmé. Toto uspořádání se liší od klasického Michelsonova interferometru, protože po odrazu těchto vln od koutových odražečů 1 a 2 nedojde k interferenci, ale pouze ke složení vln s vertikální a horizontální polarizací. Takto složená vlna dále vstupuje do detekční jednotky.

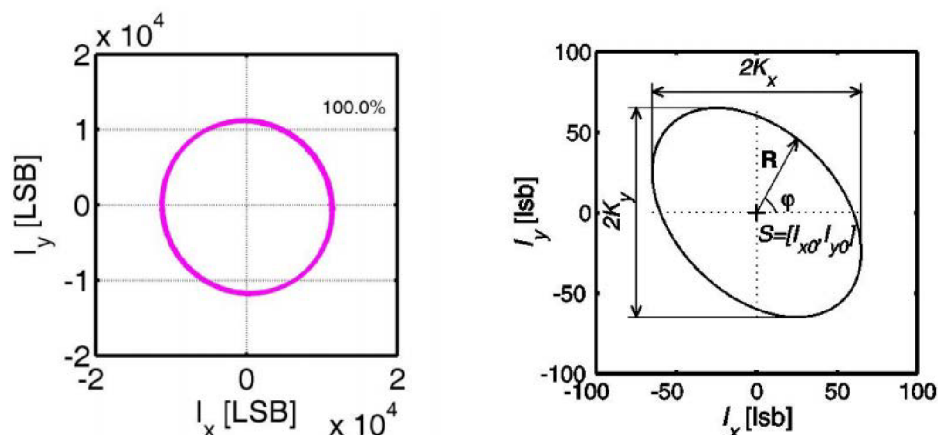
V detekční jednotce je vlna rozdělena na dvě větve pomocí polopropustné desky NP . V každé větvi je opět umístěn polarizující dělič ($PD1$ a $PD2$) natočený vůči polarizacím

2.1. LASEROVÁ INTERFEROMETRIE



Obrázek 2.8: Schéma Homodynní detekce Michelsonova interferometru. Překresleno podle [2].

obou vln o 45° . To způsobí stočení obou rovin polarizace do jedné a ke vzniku interference (teprve v tuto chvíli je splněna podmínka interference - stejná polarizační rovina). Ve větvi s odraženou vlnou lze na detektoru $D1$ vyhodnotit amplitudu interference, stejně tak i na detektoru $D1'$. Na detektoru $D1'$ je ovšem fázově posunuta o π . Příčina tohoto posuvu je způsobena skládáním interferencí na děliči $PD1$. Pokud je vypočten rozdíl signálu z detektorů $D1$ a $D1'$ pomocí rozdílového zesilovače $S1$, získá se sinusový průběh amplitudy interference I_x s nulovou střední hodnotou. Ve větvi s prošlou vlnou je situace stejná jako ve větvi s odraženou vlnou. Jediný rozdíl spočívá v zařazení zpěťovací $\lambda/4$ desky za desku NP , která způsobí fázový rozdíl jedné z vln o $\pi/2$. Na výstupu rozdílového zesilovače $S2$ tedy vznikne signál I_y stejný, jako ve větvi s odraženou vlnou, ale fázově posunutý o 90° . Pokud oba signály vyneseme do kartézských souřadnic, vznikne obecně kuželosečka. Tu lze parametrizovat do polárních souřadnic (obr. 2.9), kde úhel φ vyjadřuje změnu optické dráhy v měřící větvi [2, 13].



Obrázek 2.9: Průběh interferenčního proužku pomocí homodynní detekce. Převzato z [2].

2. OPTIKA A INTERFEROMETRIE

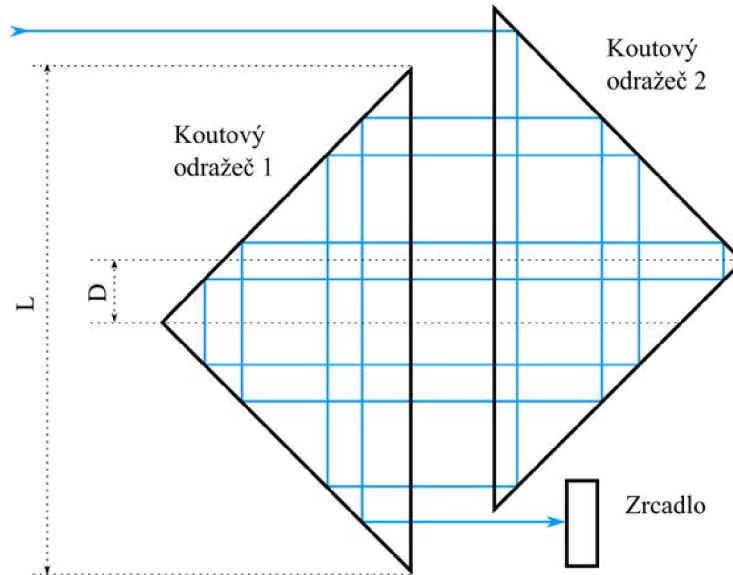
Rozlišení takto získaného signálu lze ještě několikanásobně zvýšit pomocí víceprůchodové metody. Princip je vysvětlen na obr.2.10, kde D je vzdálenost mezi odražeči a L je velikost přepony odražeče. Pomocí koutových odražečů 1 a 2 je paprsek několikanásobně odražen a měřenou vzdálenost tedy neprojde pouze jednou, ale obecně N krát. Podle [14] platí, že počet průchodů N je roven

$$N = \frac{L}{D} + 1 \quad (2.14)$$

a fázový rozdíl je tedy

$$\Delta\varphi = N \frac{4\pi\Delta l}{\lambda}. \quad (2.15)$$

Víceprůchodový Michelsonův interferometr tedy N krát zvyšuje citlivost detekce [14].



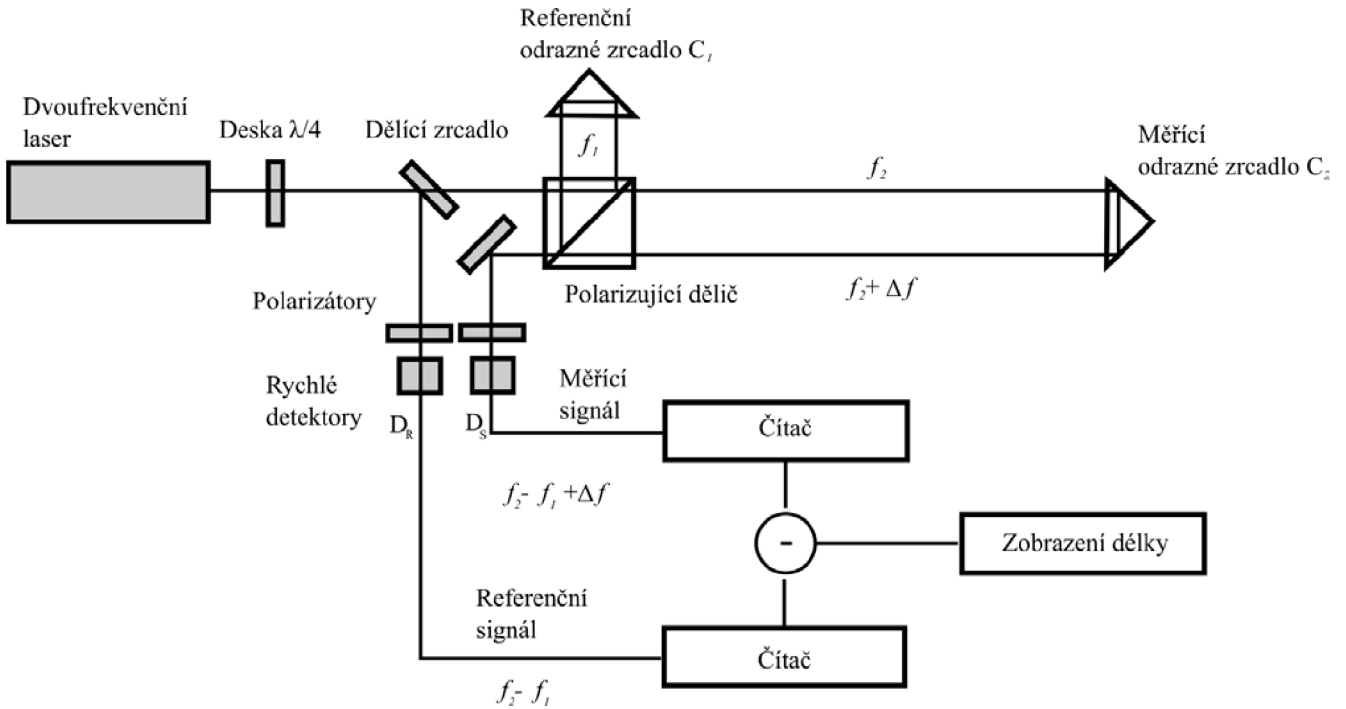
Obrázek 2.10: Paralelní multiprůchodová jednotka se dvěma koutovými odražeči. d ; průměr paprsku, KT: koutový odražeč, L ; velikost přepony koutové odražeče, D ; vzdálenost mezi odražeči, M ; zrcadlo. Překresleno podle [14].

Metoda heterodynní detekce

Na obr.2.11 je Michelsonův interferometr s heterodynní metodou detekce signálu. Hlavním rozdílem proti homodynní detekci je nutnost použití laseru, který generuje dvě optické frekvence f_1 a f_2 [1, 2].

Tyto vlny projdou $\lambda/4$ deskou, která má funkci optického izolátoru. Následně jsou vlny rozděleny pomocí polarizujícího děliče, kde je vlna s frekvencí f_1 odrazena do referenční větve a pomocí koutového odražeče C_1 vrácena zpět na dělič, kde se odrazí do výstupní trasy interferometru. Vlna s optickou frekvencí f_2 projde polarizujícím děličem přímo do měřící větve, kde je odrazena zpět za pomocí koutového odražeče C_2 a prochází přímo do výstupní trasy interferometru. Jelikož není splněna podmínka interference (stejná polarizační rovina), tak nedochází k interferenci. Tato komplexní vlna dále prochází polarizátorem, který svírá s paprskem úhel 45° . Dojde tak ke stočení obou rovin

2.1. LASEROVÁ INTERFEROMETRIE



Obrázek 2.11: Schéma Michelsonova interferometru s heterodynní detekcí. Převzato z [2].

polarizace do jedné a ke vzniku interference a zánějový signál je možné detekovat na detektoru D_S . Pokud se měřící zrcadlo C_2 nepohybuje pak podle [2] je zánějová frekvence rovna rozdílu optických frekvencí

$$f_s = f_2 - f_1. \quad (2.16)$$

Pohyb měřícího zrcadla C_2 však způsobí dodatečné fázové zrychlení, či zpoždění. Tato změna se projeví na změně optické frekvence měřící vlny o Δf . Pro identifikace této změny frekvence (která odpovídá změně vzdálenosti měřícího zrcadla) je nutné mít k dispozici referenční zánějový signál nezávislý na změně měřícího zrcadla C_2 . Na obr.2.11 je tento signál získán pomocí dělicího zrcadla. Po průchodu polarizátorem je na detektoru D_R opět získána zánějová frekvence [2].

Pro výpočet Δf jsou tedy k dispozici tyto rovnice

$$\begin{aligned} f_s &= f_2 - f_1 + \Delta f \\ f_r &= f_2 - f_1, \end{aligned} \quad (2.17)$$

kde f_s je zánějová frekvence v měřící větvi a f_r je zánějová frekvence v referenční větvi. Pokud tyto dvě frekvence od sebe odečteme, získáme změnu zánějové frekvence

$$f_s - f_r = (f_2 - f_1 + \Delta f) - (f_2 - f_1) = \Delta f. \quad (2.18)$$

Přepočet Δf na vzdálenost se provede integrací přes element času, například pomocí inkrementačních sčítačů, tak jako na obr.2.11 [2].

Srovnání obou metod

V principu nelze říci, která ze dvou uvedených metod je přesnější, protože obě dosahují rozlišení několika nanometrů. Metoda homodynní detekce obsahuje mnohem více optických prvků. Na druhou stranu, kvůli nutnosti použití vysokofrekvenčních obvodů a rychlých čítačů, je metoda heterodynní detekce mnohem náročnější na elektronické zpracování. Obě metody se v současnosti velice často používají v průmyslu i laboratořích [2].

3. Systém reaktivního iontové leptání

Protože měřicí sestava navržená v této práci bude použita na systému reaktivního iontového leptání (Plasmalab System 100 od společnosti Oxford Instrument), tak v následující kapitole stručně popíši princip tohoto zařízení. Interferometr je nicméně použitelný všude, kde je přesné měření vzdáleností potřeba.

Opracování různých materiálů hraje klíčovou roli při výrobě mikro a nanostruktur. Kvůli miniaturizaci, především v nanotechnologiích, jsou kladeny vysoké nároky na přesnost vyrobených struktur. Za jednu z klíčových metod pro zápis těchto struktur je dnes považována elektronová litografie. K zpracování mikro a nanostruktur lze dále využít techniky suchého leptání, využívající plazmy¹. Leptání plazmou je založeno na chemické reakci mezi plazmou (leptadlem) a atomy leptaného materiálu. Jelikož je tento proces silně selektivní, jeví se tato metoda jako nejvhodnější pro výrobu mikro a nanostruktur. V některé literatuře se též můžeme setkat s pojmenováním plazmochemické leptání [17].

3.1. Plazmochemické leptání

Pokud se v plazmě setká elektron s atomem/molekulou a pokud má dostatečné množství energie, dokáže z tohoto atomu/molekuly vyrazit jiný elektron. Při tomto disociativním procesu vzniknou 2 elektrony a iont. V závislosti na energii vstupujícího elektronu může mít tato kolize za následek i vznik záporného iontu. Jakmile se excitovaný elektron vrátí zpět do svého základního stavu, vyzaří foton o přesně dané frekvenci. Protože jsou vzdálenosti mezi energiovými stavy pro každý prvek jiné, bude každý plyn emitovat záření o jiné frekvenci [18].

Na obrázku 3.1 je vidět typický systém pro plazmochemické leptání. Napětí je přivedeno buď na horní, nebo na dolní elektrodu (ve speciálních případech na stěny reaktoru) o typické frekvenci 13,56 MHz.

Pokud je frekvence přivedeného střídavého elektrického pole v rozmezí 1 MHz až 100 MHz, dokáží relativně lehké elektrony na toto pole reagovat a získat tak energii ve stovkách eV. Na druhé straně těžké ionty (mnohem těžší než elektrony) na toto pole téměř nereagují, protože v tomto rozmezí nemá elektrické pole dostatečnou sílu k tomu, aby tyto ionty rozkmitalo. Energie těchto iontů je tedy dána převážně okolní teplotou a pohybuje se v setinách eV. K tomu, aby se elektrony pohybovaly, je zapotřebí tlak v reaktoru od několika mTorrů do setin mTorů [17].

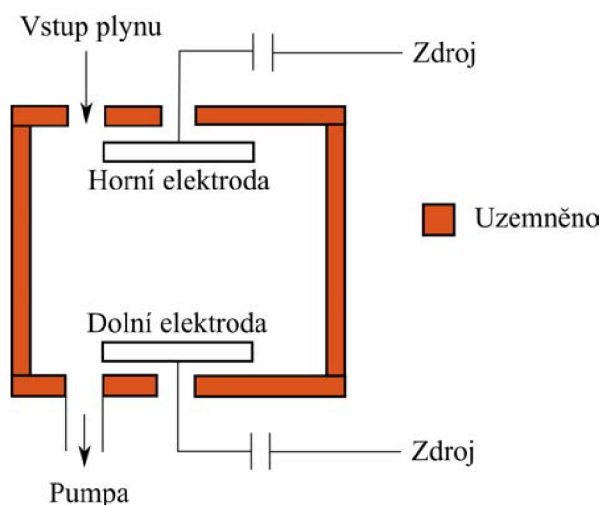
3.1.1. Leptací proces

Plazmochemické leptání lze rozdělit do sedmi kroků:

1. vytvoření reaktivních částic (takzvaných radikálů) srážkami plynu s elektrony
2. přivedení radikálů k povrchu leptaného materiálu
3. adsorpce radikálů na povrchu

¹Plazma je ionizovaný plyn.

3. SYSTÉM REAKTIVNÍHO IONTOVÉ LEPTÁNÍ

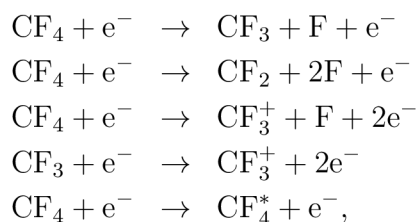


Obrázek 3.1: Schéma jednoduchého plazmochemického reaktoru [8].

4. chemisorpce radikálů a vytvoření chemické vazby
5. vytvoření molekuly produktu
6. desorpce molekuly produktu
7. odstranění molekuly produktu z reaktoru.

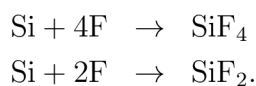
Nejdůležitějším krokem je bod 6, protože mnoho typů radikálů poměrně snadno reaguje s leptaným materiálem, ale pokud nedojde za daných podmínek k desorpci, leptání se zastaví. Jako příklad uveďme leptání křemíku pomocí CF_4 [17].

Neutrální molekuly plynu vstupují do reaktoru, ale protože nejsou dostatečně reaktivní, nemohou chemicky reagovat se substrátem. Plazma je ovšem schopna disociovat tyto molekuly na radikály. V našem případě:



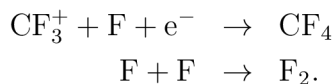
kde CF_4^* je ionizovaná molekula plynu. Pro leptací proces jsou nejdůležitější první tři reakce, protože při nich vznikají radikály fluoru, které způsobují leptání křemíku [17].

Tyto radikály jsou následně adsorbovány na povrchu křemíku kde dojde k jedné z následujících reakcí:



3.1. PLAZMOCHEMICKÉ LEPTÁNÍ

Bohužel tyto radikály nereagují pouze s atomy křemíku, ale i s různými ionty, které vznikají během celého procesu. Dokonce mohou reagovat i samy se sebou



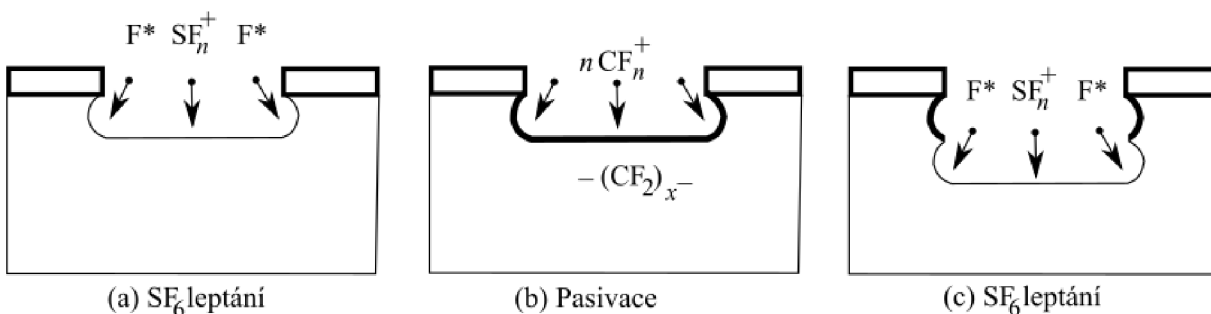
To má za následek pokles koncentrace radikálů a zpomalení leptacího procesu [17].

3.1.2. Bosch proces

Bosch proces je pojmenován podle německé společnosti Robert Bosch GmbH, která také vlastní patent na tuto metodu. Z tohoto důvodu také není možné uvést mnoho detailů tohoto procesu. Někdy je nazýván pulzním nebo TMDE leptáním (z anglického time-multiplex deep etching), kdy se opakovaně alternuje mezi dvěma módy [9].

První mód je standardní, téměř isotropní plazmochemické leptání, které bylo popsáno v předchozím textu. Doba trvání tohoto módu většinou nepřesáhne 12 sekund. Druhý mód je depozice chemicky inertní pasivační vrstvy (například plyn C_4F_8 vytvoří substancí podobnou teflonu). Doba trvání je většinou menší než 10 sekund a je kratší, než první mód. Pasivační vrstva chrání substrát od dalších chemických reakcí a zabraňuje tím dalšímu leptání. Když znovu nastane leptací mód tak směrové ionty jsou účinné pouze na dně leptané struktury (nikoliv po stěnách), kde pasivační vrstvu naruší a vystaví tím substrát znovu leptacímu procesu. Tyto leptacně-deponující kroky jsou několikrát opakovány a způsobují, že takovéto leptání je silně anizotropní. Pro proleptání 0,5 mm tlustého křemíkového waferu je nutné těchto kroků učinit 100 až 1000 [9].

Tento dvoumódový proces způsobuje vlnitost bočních stěn s amplitudou zhruba 100 až 500 nm, přičemž dobu cyklu lze samozřejmě měnit. Obecně platí, že pro krátké cykly dosáhneme hladších stěn a dlouhé cykly přináší větší leptací rychlost (viz obr. 3.2) [19].

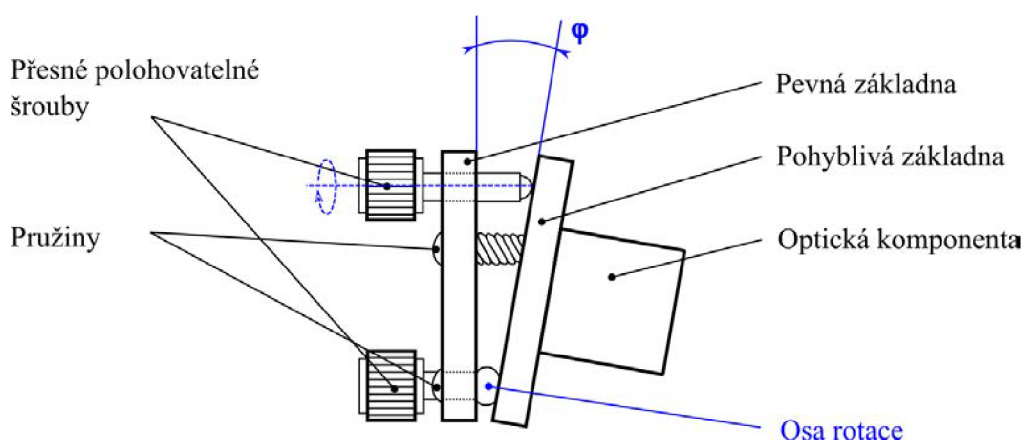


Obrázek 3.2: Jednotlivé módy v Bosch procesu. Překresleno podle [19].

4. Kinematický držák optických komponent

Protože navržená sestava vyžaduje přesné polohování citlivých optických komponent, tak v následující kapitole popíši mechanismus optického držáku. Tyto držáky používají k posuvům velice přesné mikrometrové šrouby a v poslední době bývají dokonce i motorizovány za použití lineárního aktuátoru.

Obrázek 4.1 ukazuje zdaleka nejpoužívanější typ - kinematický držák. Skládá se z nepohyblivé základny, dvou nebo tří přesných mikrometrových šroubů, dvou a více pružin a z pohyblivé základny, která pohybuje optickými komponentami [11].



Obrázek 4.1: Boční pohled na typický kinematický držák zrcadla. Překresleno z [11].

4.1. Princip kinematického držáku

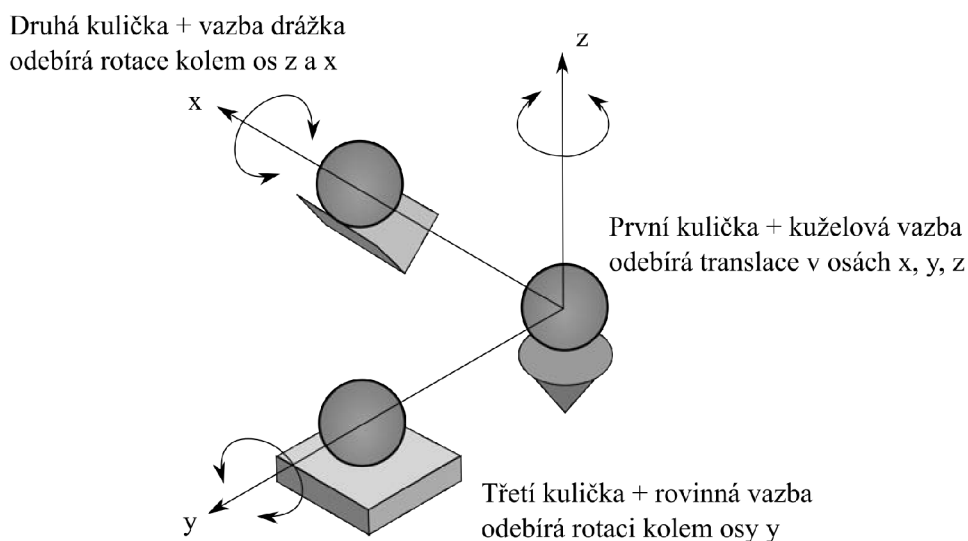
Každý objekt v prostoru může být popsán pomocí šesti nezávislých souřadnic (tři translačních a tři rotačních) vzhledem k libovolnému fixnímu souřadnicovému systému. K zamezení pohybu se využívají kinematické vazby. Pokud je každý z šesti stupňů volnosti plně zavazben, je těleso nepohyblivé. Pro plné zavazbení je nutné zajistit šest bodových kontaktů mezi rozhraními. Nejpoužívanější držáky využívají vazby mezi koulí a rovinnou (ubírá 1 stupeň volnosti), mezi koulí a drážkou (ubírá 2 stupně volnosti) a na konec mezi koulí a kuželem (ubírá 3 stupně volnosti), schematicky popsané na obr. 4.2 [11, 20].

Takto navrženým systémem nelze zatím přesně polohovat. K rozpohybování se ke druhé a třetí kuličce připevňují šrouby s velmi jemným stoupáním (většinou menším, než 0,25 mm/ot). Při pohybu těchto šroubů dochází k úhlovým náklonům pohyblivé základny vzhledem k nepohyblivé základně. Pokud je šroub připevněn i k první kuličce, je možné pohyblivou základnou manipulovat i translačně v ose z [11].

K vyvolání předpětí mezi komponentami (např. mezi kuličkou a rovinou) a tím pádem ke zvýšení tuhosti celého systému se používají pružiny. Pružiny by měly být umístěny přímo ve vazbách, aby nedocházelo k deformacím a nechtěným pohybům. Toho většinou nelze dosáhnout a proto jsou umístěny co možná nejbliže k těmto vazbám [11].

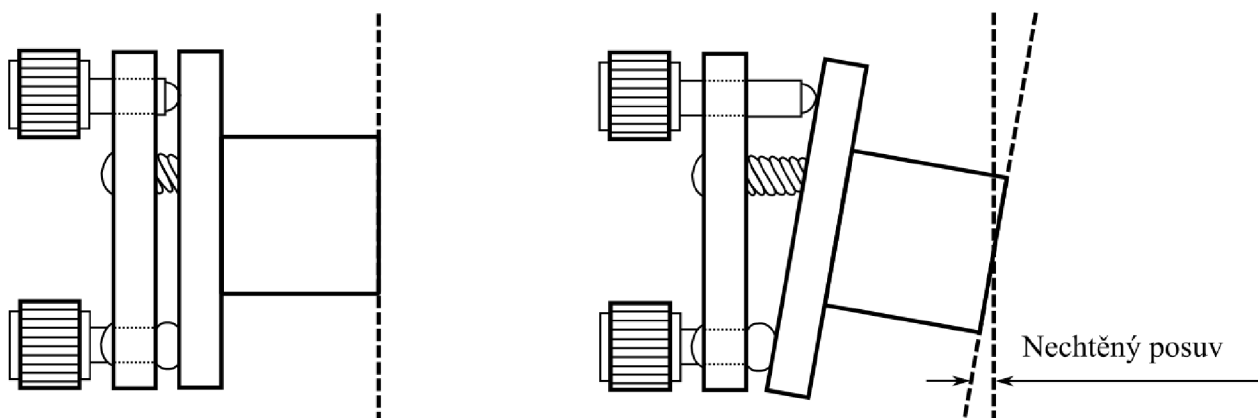
Hlavní předností kinematického držáku je univerzálnost, vysoká stabilita a relativně nízká cena (ta je dána především velikostí komponent a pohybuje se v desítkách až stov-

4.2. MATERIÁLOVÉ CHARAKTERISTIKY



Obrázek 4.2: Popis nejčastěji používaných vazeb pro kinematické držáky. Překresleno z [11].

kách euro za kus). Mezi jeho hlavní nevýhodu patří omezený úhlový posuv (na obrázku 4.1 značený jako φ), který se pohybuje většinou okolo $\pm 10^\circ$ kvůli fyzikálním limitacím pružin a šroubů. Další nevýhodou je umístění os rotace a translace až za optickou komponentu. Pokud tedy chceme s komponentou například pouze rotovat, není to možné a tento rotační pohyb bude doplněn i o nechtěný translační (obr. 4.3). I přes tyto nevýhody je tento mechanismus vhodný pro drtivou většinu experimentů [21].



Obrázek 4.3: Vznik nechtěné translace při náklonu pohyblivé základny. Překresleno z [11].

4.2. Materiálové charakteristiky

4.2.1. Teplotní roztažnost

Teplotní změny mají za následek změny velikosti a tvaru optických součástí. Velikost a tvar změny je závislá na velikosti komponenty, změně teploty a na materiálu. Rovnice popisující změnu velikosti v závislosti na teplotě je ve tvaru

4. KINEMATICKÝ DRŽÁK OPTICKÝCH KOMPONENT

$$\Delta l = \alpha l \Delta T, \quad (4.1)$$

kde Δl je změna velikosti, α je koeficient teplotní roztažnosti, l je délka komponenty a T je termodynamická teplota. Například nerezová ocel má zhruba dvakrát menší koeficient roztažnosti, než hliník. Je tedy dvakrát méně citlivá na změnu tepelných podmínek. To může hrát důležitou roli při použití těchto materiálů při laserové interferometrii [11].

4.2.2. Tepelná vodivost

Tepelná vodivost je schopnost látky vést teplo a je charakterizována součinitelem tepelné vodivosti λ . Podle rovnice

$$\vec{q} = -\lambda \vec{\nabla} T, \quad (4.2)$$

je λ definován jako koeficient úměrnosti mezi hustotou tepelného toku \vec{q} a záporně vzatým gradientem teploty T [11].

Hliník vykazuje zhruba desetkrát větší tepelnou vodivost, než nerezová ocel. Tato vlastnost je dobrá, pokud teplota komponent není zcela uniformní.

Délková a tvarová změna zapříčiněná změnami neuniformní teploty je úměrná podílu koeficientu teplotní roztažnosti a koeficientu tepelné vodivosti. Hliník je v tomto ohledu zhruba dvakrát stabilnější, než nerezová ocel. Všechny tyto závislosti popisuje tabulka 4.1.

Materiálová charakteristika	Dural	Nerez. ocel	Měď
Hustota [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]	2800	7850	8900
Youngův modul pružnosti [10^6Pa]	71	210	123
Koeficient teplotní roztažnosti α [10^{-6}K^{-1}]	23,8	11	17
Koeficient tepelné vodivosti λ při 20 ° Celsia [$\text{Wm}^{-1} \text{K}^{-1}$]	221	50	393
$\frac{\alpha}{\lambda}$ [$10^{-7} \text{W}^{-1} \text{m}$]	1,07	2,2	43,25

Tabulka 4.1: Vybrané materiálové charakteristiky některých kovů. Převzato z [6, 10].

4.2.3. Materiálová nestabilita

Materiálová nestabilita je definována jako změna velikosti komponenty s časem (někdy je označována jako tečení). U duralu i nerezové oceli je doba potřebná pro pozorování tohoto jevu v řádu měsíců až roků [11].

Obvykle však nestabilitu způsobuje v mnohem větší míře samotný design součásti, než volba materiálu. Jako příklad uveďme mazání mikrometrového šroubu. Olej může difundovat do materiálu a zapříčinit tím lehký posuv původně přesného šroubu.

4.2.4. Zhodnocení materiálů

Každý materiál používaný v přesném polohování optických komponent má své výhody i nevýhody. Bohužel materiál, který by kombinoval všechny požadavky potřebné pro dokonalý kinematický držák, neexistuje. Níže je uveden výčet vlastností, výhod i nevýhod pro dural a nerezovou ocel.

4.2. MATERIÁLOVÉ CHARAKTERISTIKY

Dural

Dural je odolný materiál, který dobře odolává tečení a přestože je velice lehký, tak je pevný. Vyznačuje se poměrně velkým koeficientem teplotní roztažnosti. Na druhou stranu koeficient tepelné vodivosti je také velký, což z něj dělá dobrého kandidáta v aplikacích, kde nastávají velké gradienty teplot, nebo kde je zapotřebí rychlá adaptivnost na změnu teplot. Dural se dobře obrábí, je relativně levný a široce používaný konstrukční materiál. Navíc se vyznačuje vysokou korozivzdorností a to i bez dodatečných povrchových úprav. Jeho vlastnosti lze ještě zlepšit eloxováním. To má bohužel ale za následek vytvoření pórů na povrchu a zabraňuje tím použití ve vakuu. Ve vakuu je tedy nutné používat pouze čistý, neupravený hliník [11].

Nerezová ocel

Ocel má vysoký Youngův modul pružnosti a tím pádem i vysokou pevnost (téměř třikrát větší než hliník) a dobrou materiálovou stabilitu. Zároveň má téměř poloviční koeficient tepelné roztažnosti oproti duralu, což z ní dělá kandidáta na použití v laboratořích, kde je uniformní změna teploty. Opracovatelnost oceli je ale mnohem horší než u duralu, což se promítá i do konečné ceny komponenty. Dalším problémem je nízká odolnost vůči korozi. Slitiny z nerezové oceli tento problém částečně řeší a jsou dobře použitelné i ve vakuu [11].

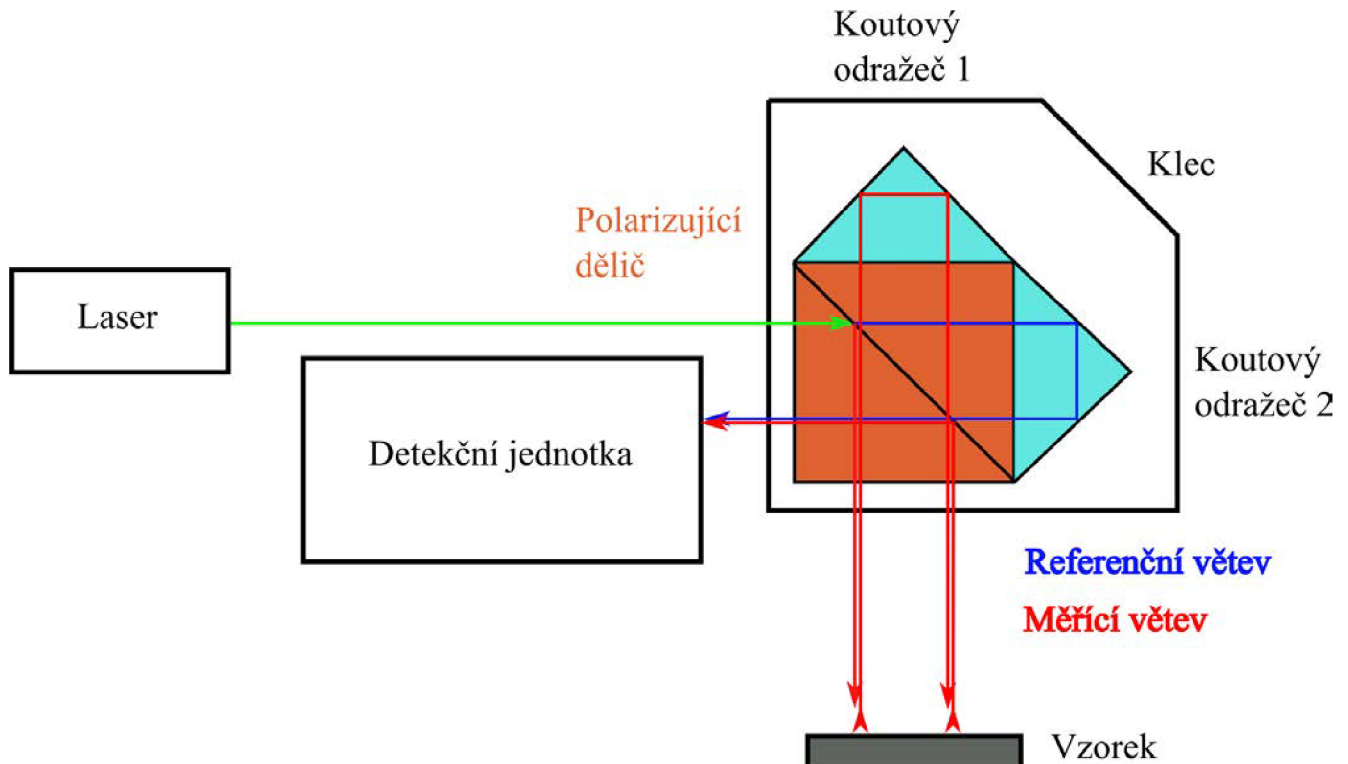
5. Návrh testovací sestavy

K odzkoušení funkce interferometru na systému reaktivního iontového leptání, byl nejdříve sestaven základní model, převážně z univerzálních dílů od firmy Thorlabs. Jako zdroj světla posloužil pevnolátkový laser Oxixus Samba, jehož frekvenční stabilita byla převedena na páry jódu o vlnové délce 532 nm. Na této sestavě byla odzkoušena funkčnost interferometru, zatím bez použití kamery.

V následujícím textu bude nejdříve popsán interferometr vyvinutý na ÚPT, jeho nastavení a následné odzkoušení na systému RIE. Dále bude popsána příprava vzorků.

5.1. Interferometr na ÚPT

Na obrázku 5.1 je schéma Michelsonova interferometru navrženém na ÚPT. Laserový svazek dopadá na polarizující dělič, kde je rozdělen na dva. Referenční větev je odražena od koutového odražeče 2 zpět k děliči a prochází přímo do detekční jednotky. Měřicí větev je nejprve odražena od polarizujícího děliče ke vzorku a poté ještě jednou pomocí koutového odražeče 1. Následně je odražena do detekční jednotky. Interferometr je navržen jako dvouprůchodový. Detekční jednotka je fyzicky oddělena od klece koutových odražečů. V navržené sestavě je nutné přesně polohovat jak klec koutových odražečů, tak detekční jednotkou. K tomu slouží několik kinematických držáků od firmy Thorlabs.



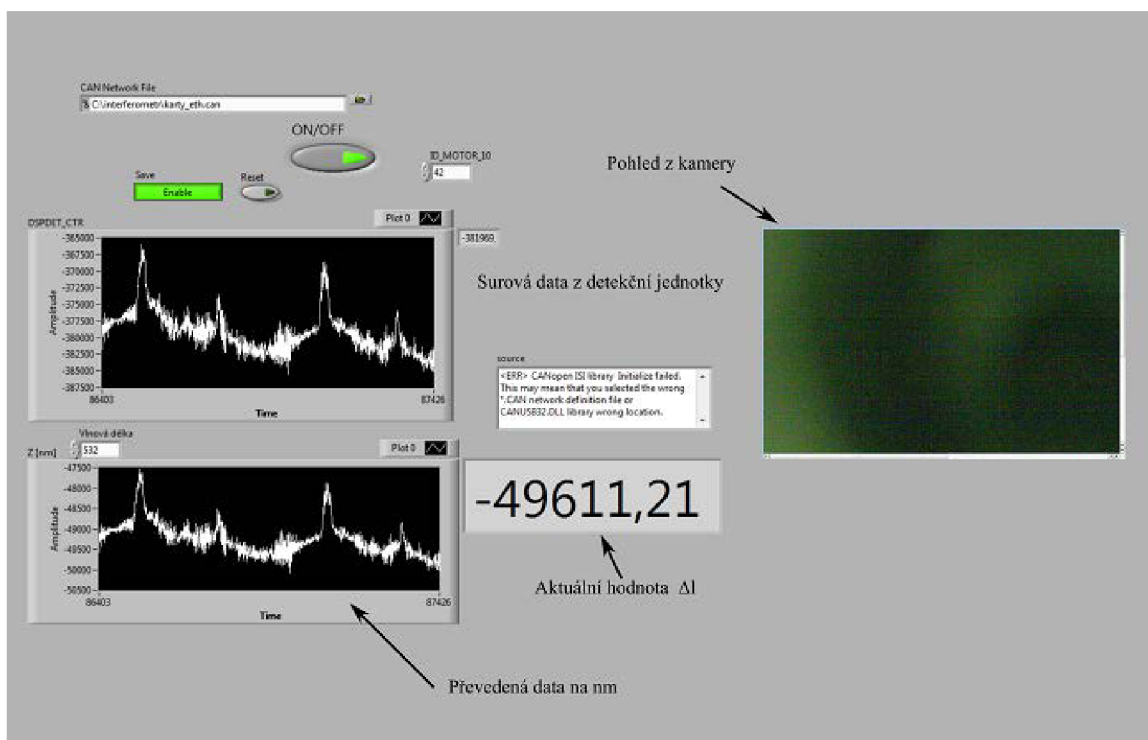
Obrázek 5.1: Schéma Michelsonova interferometru vyvinutého na ÚPT.

Pro vyhodnocení změny vzdálenosti Δl v rovnici 2.8 v reálném čase je použita A/D převodní deska umístěná v racku. Jednotka komunikuje s převodníkem USB přes průmys-

5.2. PŘÍPRAVA VZORKU

lovou sběrnici CAN. Sestava interferometru je ovládána z počítače pomocí programu v LabView.

Proces spuštění interferometru je následující: nejdříve je nutné spustit laser (obr. 5.4). Následně spustit program NETCANS a LISVIEW. NETCANS se stará o síťovou komunikaci mezi počítačem a rackem. Program LISVIEW zobrazuje reálná data z detekční jednotky v grafickém provedení (viz obr. 5.3). Tvar a velikost červeného kroužku lze měnit změnou polohy detekční jednotky, klece koutových odražečů nebo změnou vstupního úhlu svazku z kolimátoru. Pro optimální seřízení interferometru je nutné, aby byl kroužek co nejvíce vystředěn a jeho tvar se podobal kružnici. Velikost kroužku je úměrná intenzitě dopadajícího světla. Po seřízení interferometru je možné spustit program v LabView, který zpracovává data z detekční jednotky a zobrazuje je na monitor počítače (viz obr. 5.2).



Obrázek 5.2: Program napsaný v prostředí LabView zpracovávající data z interferometru.

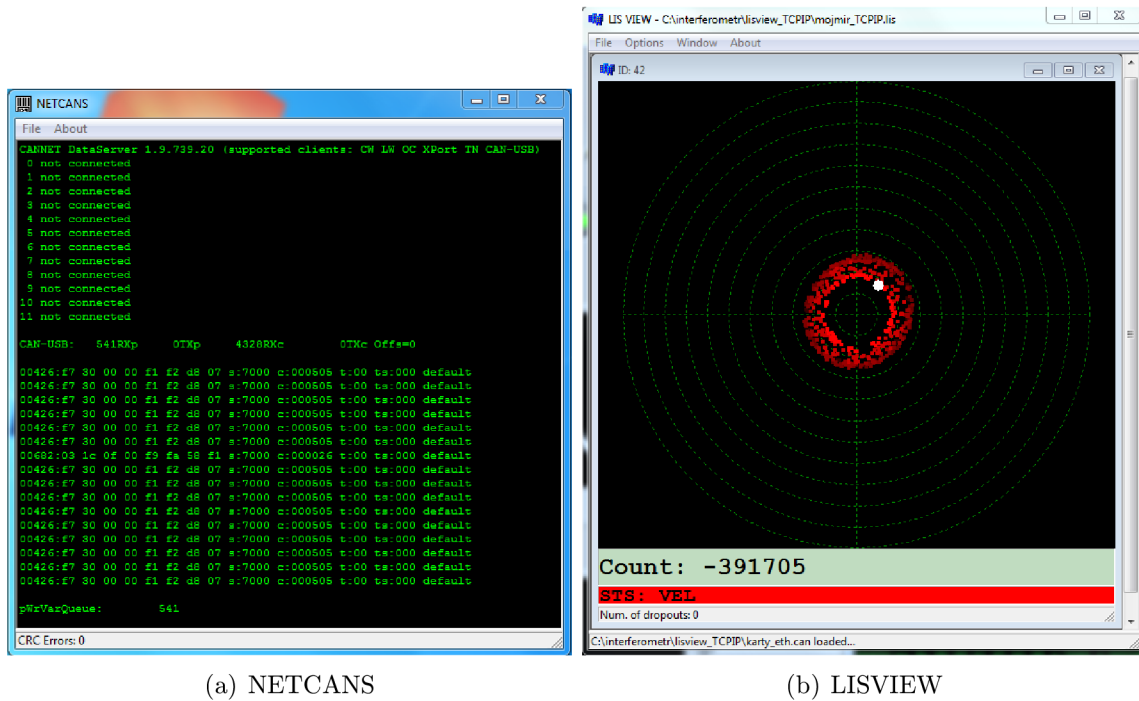
5.2. Příprava vzorku

Příprava vzorků je jedna z nejdůležitějších částí litografie. Její kvalita se výrazně poděpíše na výsledné vyleptané struktuře hlavně čistotou a homogenitou. Skládá se z několika kroků, které budou popsány v následujícím textu.

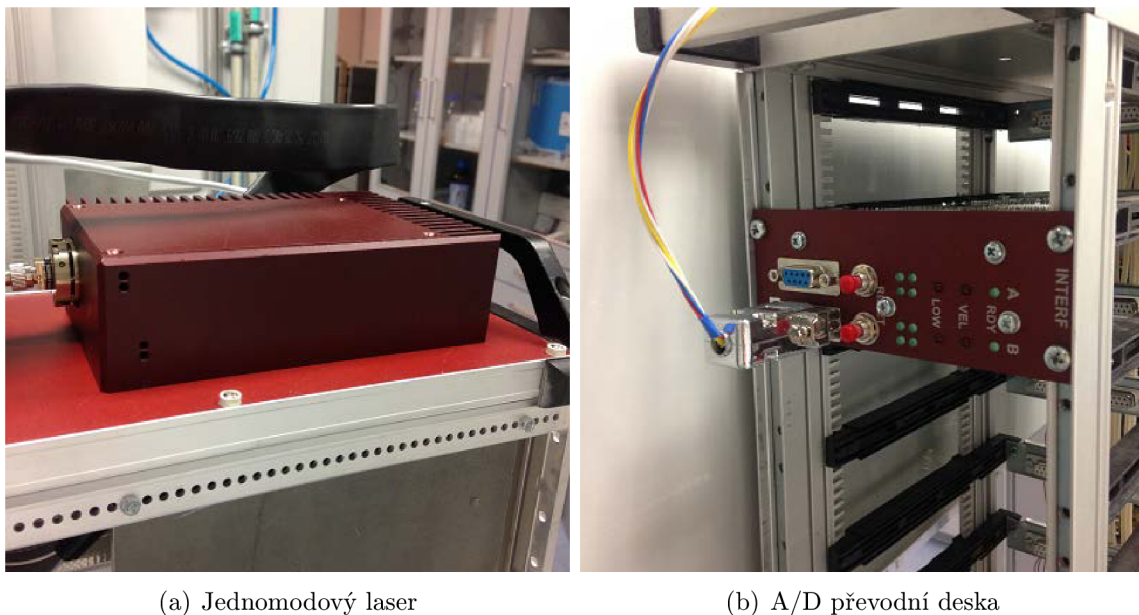
Pro měření byl použit standardní křemíkový wafer krystalografické orientace $\langle 100 \rangle$ o tloušťce 0,55 mm do kterého byla během testů vyleptána čtvercová struktura. Postup přípravy schematicky ukazují obr. 5.6.

Nejprve je na wafer nutné nanést pomocí injekční stříkačky fotorezist, v našem případě byl zvolen SU-8. Jedná se o negativní polymer na bázi epoxidu citlivý na UV záření. Negativní znamená, že po osvitě tento polymer ztvrdne. K rozprostření SU-8 na wafer jsme použili zařízení Spin-Coater WS-400BX-6NPP, což je kotouč, na který se vakuově

5. NÁVRH TESTOVACÍ SESTAVY



Obrázek 5.3: Programy, které slouží k „oživení“ a základnímu nastavení interferometru.



Obrázek 5.4: Laser o vlnové délce 532 nm vyvinutý na ÚPT a A/D převodní deska umístěná v racku, která komunikuje s počítačem.

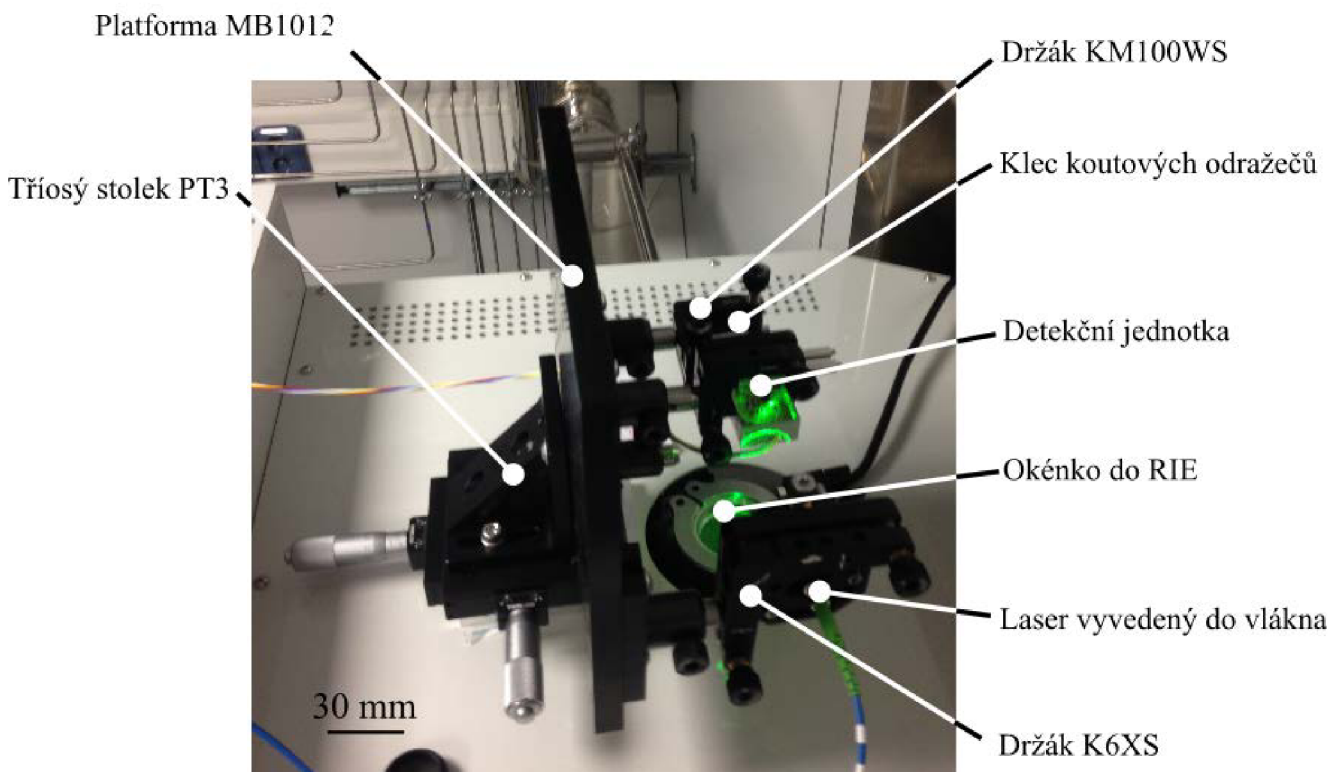
přisaje křemíkový wafer. Kotouč se začne otáčet a díky vzniklé odstředivé síle se fotorezist rovnoměrně rozprostře po celém povrchu waferu. V našem případě byl vybrán mód, kdy se kotouč otáčí 3000 ot/min po dobu 1 min. Důležité je, aby ve fotorezistu nezůstaly žádné vzduchové bubliny po aplikaci injekční stříkačkou. Tyto bubliny by způsobovaly artefakty ve výsledné struktuře. Následně je nutné fotorezist teplotně aktivovat. To se

5.3. TESTOVACÍ SESTAVA

provede zahřátím na 95° Celsia po dobu 3 minut na sklokeramické desce. Nyní lze vzorek osvitit pomocí UV záření. Na vzorek se položí připravená maska a celý wafer se zasune do soukrytovacího zařízení SUSS MicroTec MA/BA6. V místech, kde je maska průhledná je wafer ozářen a polymer může ztvrdnout. Po osvitě se vzorek vytvrdí zahřátím na 80° Celsia po dobu 3,5 minuty. Nevyvolaný rezist se odstraní vývojkou mr-dev600 a opláchne v isopropylalkoholu. Takto připravený vzorek se už jen usuší a je připraven k leptání.

5.3. Testovací sestava

Na obrázku 5.5 je složená sestava celého interferometru bez namontované pozorovací kamery. Kromě klece koutových odražečů a samotné detekční jednotky jsou všechny díly od firmy Thorlabs. Klec koutových odražečů a detekční jednotka jsou umístěny na kinematických držácích KM100WS. Laserový svazek je přiveden pomocí optického vlákna, zakončeného kolimátorem TC06APC-543. Kolimátor je namontován do kinematického držáku K6XS. Všechny držáky jsou připevněny k platformě MB1012. Celou platformou lze pohybovat ve třech osách pomocí mikrometrového stolku PT3. Interferometr měří skrz okénko v RIE, které je umístěno přímo nad waferem.

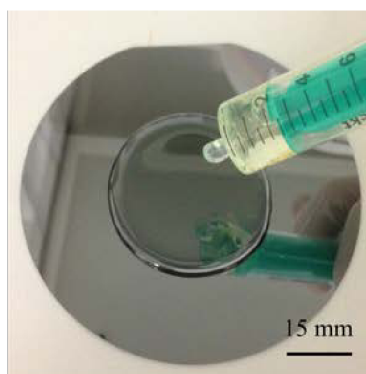


Obrázek 5.5: Testovací sestava interferometru, na které byla odzkoušena funkčnost.

5. NÁVRH TESTOVACÍ SESTAVY



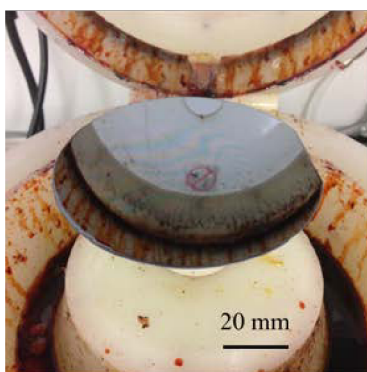
(a) Fotorezist SU-8



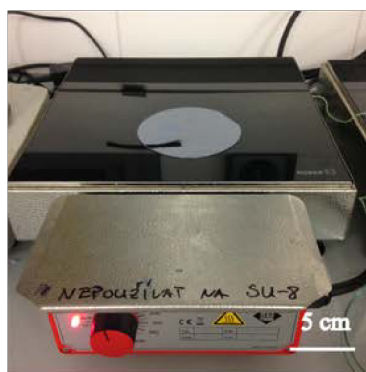
(b) Nanesení SU-8 na wafer



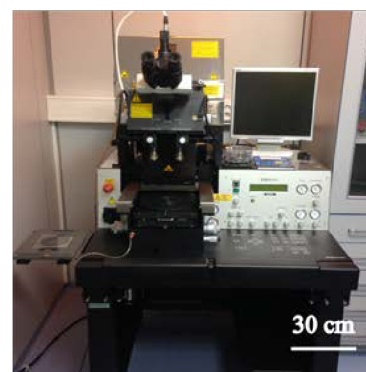
(c) Spin-Coater



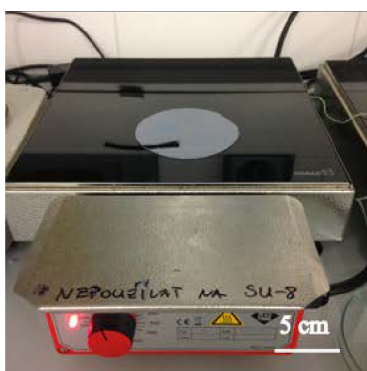
(d) Rozptření SU-8 po povrchu



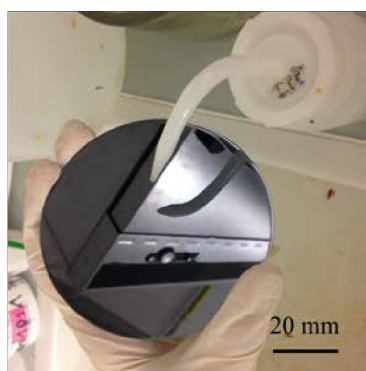
(e) Teplotní stabilizace



(f) SUSS MicroTec MA/BA6



(g) Teplotní stabilizace

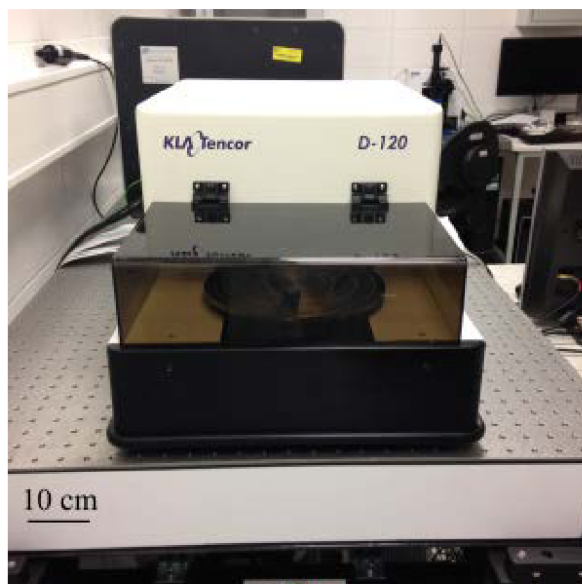


(h) Omytí waferu

Obrázek 5.6: Postup přípravy vzorku pro litografii.

6. Měření

Měření probíhalo během leptání Bosch procesu, popsaného v předešlém textu. Ověřovací experiment jsme provedli do křemíkového waferu krystalografické orientace $\langle 100 \rangle$ o průměru 100 mm a tloušťce 0,55 mm. V procesu byl nastaven leptací čas na 7 sekund a deponovací čas na 5 sekund. Leptáno bylo plynem SF_6 a deponováno plynem C_4F_8 . Celý cyklus byl stokrát opakován a následně pro srovnání změřen na profilometru KLA Tencor D-120 (viz obr. 6.1).



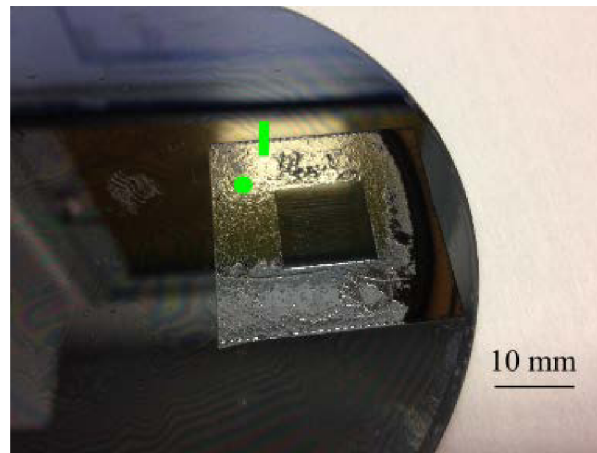
Obrázek 6.1: Profilometr KLA Tencor D-120, na kterém byla provedena porovnávací měření.

V obrázku 6.2 je zelenou čarou vyznačeno místo, kde jsem provedl měření profilometrem. Tečka značí místo, kde měřil interferometr. Měření začalo být zaznamenáváno na začátku leptacího procesu a běželo po celou dobu leptu. Vyleptaná struktura po jedenácti leptacích procesech je přibližně $390 \mu\text{m}$ hluboká

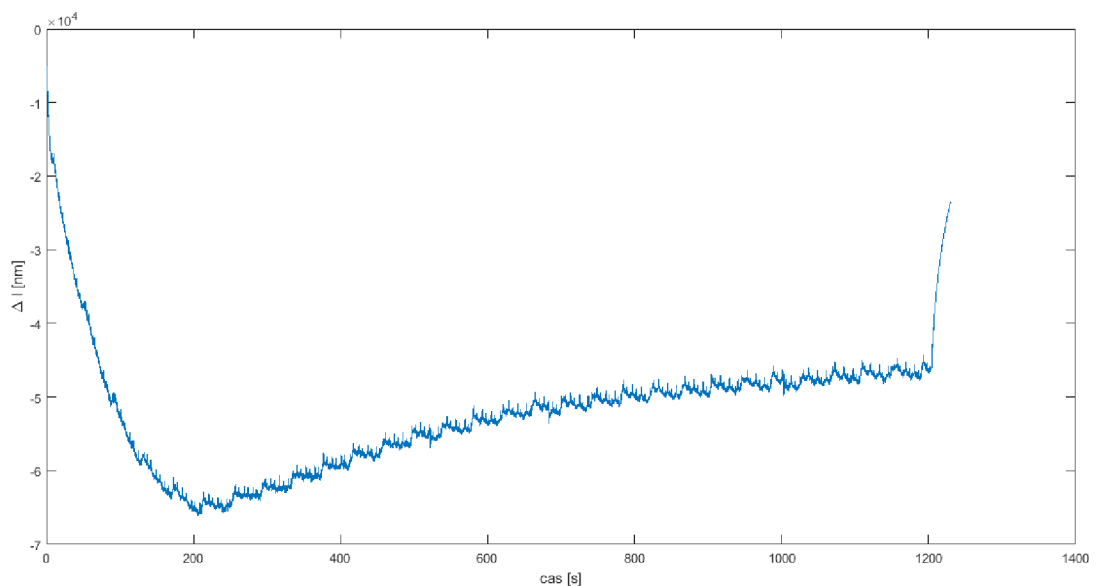
Interferometr ukládá surová data do textového souboru, který je rozdělen do dvou sloupců. První sloupec je čas v sekundách a druhý jsou naměřené změny délky v nm. Naměřená data jsou zpracována pomocí skriptu v programu Matlab (viz příloha) a vynesena do grafu - viz obr. 6.3. Celý proces byl jedenáctkrát opakován, aby byl získán dostatečně velký statistický soubor.

První čeho si lze všimnout je prudký pokles na začátku a strmý vzestup vzdálenosti na konci grafu. Tyto skoky značí začátek a konec leptacího procesu, které jsou zároveň signalizovány softwarem ovládajícího RIE. Do měření nepatří a je nutné je odstranit. Počáteční pokles jsem odstranil nalezením minima grafu a nastavením této hodnoty jako počáteční. Z grafu je ale vidět, že Bosch proces probíhá už při tomto o tyto data tedy přijdeme. Strmý vzestup dat na konci jsem odstranil ručně. Zajímavostí je, že hloubka leptu neroste lineárně. To je pravděpodobně způsobeno deponovacím módem Bosch procesu, který snižuje rychlost leptání nárůstem netěkavých radikálů v komoře.

Z dat lze dále vidět, že měření je ovlivněno poměrně velkým šumem. To může mít několik vysvětlení. Podstatná část interferometru pracuje v prostředí, kde je v těsné blízkosti klimatizace. Vzniklé fluktuace a proudění vzduchu můžou měnit index lomu vzduchu a tím



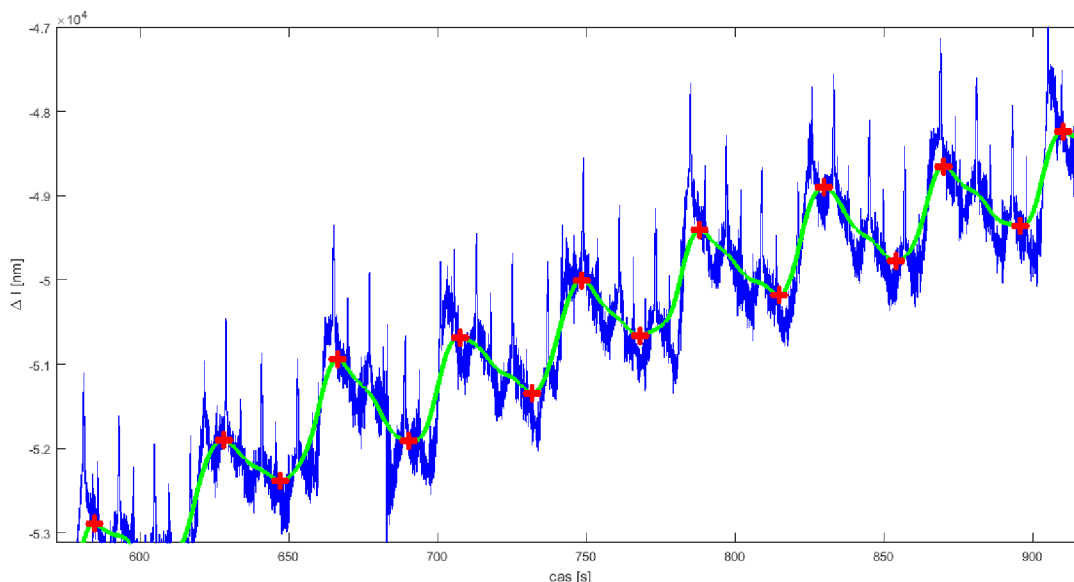
Obrázek 6.2: Křemkový wafer po jedenácti Bosch procesech. Vyleptaná struktura je přibližně $390 \mu\text{m}$ hluboká. V obrázku je zelenou čarou označeno místo měření profilometrem. Zelená tečka značí místo měření interferometrem.



Obrázek 6.3: Záznam jednoho z měření. Signál obsahuje spoustu šumu (způsobenou především změnami tlaku v chladícím okruhu RIE) a nežádoucí vysoké hodnoty na začátku a na konci, které je potřeba odstranit.

znepřesnit měření. Nejjednodušším řešením tohoto problému je celý odměřovací systém zakrytovat. Druhým typem chyby mohou být vibrace celého systému. Ty jsou převážně způsobeny neustálým připouštěním leptacích a deponovacích plynů, hořením plazmy atd. Kvůli nutnosti vakua se navíc vedle systému RIE nachází rotační turbo-vakuová pumpa s rychlostí otáček lopatek až 38000 ot/min . Z tohoto důvodu bylo před měření vzorků naměřeno nejdříve pozadí. Výsledná chyba všech těchto vlivů byla stanovena na 230 nm . Velkou měrou se na šumu bude podílet i rozptyl laserového svazku v plazmě. Při procesu leptání však bylo zjištěno, že za největší nepřesnosti (v řádech jednotek mikrometrů)

může vodní chladicí systém vakuové komory RIE. Tento systém neustále cyklicky mění teplotu leptací komory napouštěním tlakované vody do chladicího okruhu. Náhlá změna teploty způsobí délkovou dilataci a interferometr ji zaznamená jako náhlý nárůst vzdálenosti - viz obr. 6.4. Toto nežádoucí chování bude odstraněno přesným regulačním ventilem a úpravami chladicího okruhu. V této práci je ovšem nutné s tímto chováním počítat.



Obrázek 6.4: Detail na část měření. Zelená křivka je vyhlazený signál pomocí Gaussovy funkce, červené body jsou lokální extrémy. Modrá jsou původní data.

Při vyhodnocování dat byl naměřený signál nejdříve vyhlazen pomocí Gaussova filtru. Z tohoto důvodu byl pro prostředí Matlab vytvořen skript „smoothing.mat“. Ten přijme jako argument šířku Gaussovy funkce a spočte konvoluci této funkce s naměřeným signálem. Výsledek je vidět na obr. 6.4. Dosáhli jsme tím vyhlazení signálu a zvýraznění částí, které způsobuje chladicí systém. Pokud nyní nalezneme lokální minima tohoto vyfiltrovaného signálu, zjistíme přibližnou hloubku leptu.



Obrázek 6.5: Schéma řezu křemíkovým waferem. Vzdálenost p měří profilometr. Vzdálenost i měří interferometr.

Vzorek byl měřen na profilometru KLA Tencor d-120, který umožňuje získat profil povrchu podél úsečky vyznačené na obr. 6.2. Výrobce udává vertikální rozlišení 1 nm při zvoleném nejmenším rozsahu pod 1 mm a 100 nm při zvoleném rozsahu 1,2 mm. Profilometr ovšem neměří stejnou hodnotu vzdálenosti jako interferometr, jelikož při leptacím

procesu dochází i k odstraňování rezistu - viz obr. 6.5. Správnou hodnotu úbytku křemíku nám tedy dává pouze interferometr. Výrobce rezistu udává, že poměr úbytku rezistu vůči křemíku je přibližně 1:20. Tato hodnota není přesná, protože na wafer byla na počátku nanášena vrstva rezistu o tloušťce $15 \mu\text{m}$. Průměrná hloubka leptu křemíku z dat interferometru je ovšem $30,8 \mu\text{m}$. Rezist by tedy měl být z waferu zcela odstraněn již při desátém měření, což se nestalo. Veškeré výsledky shrnuje tabulka 6.1.

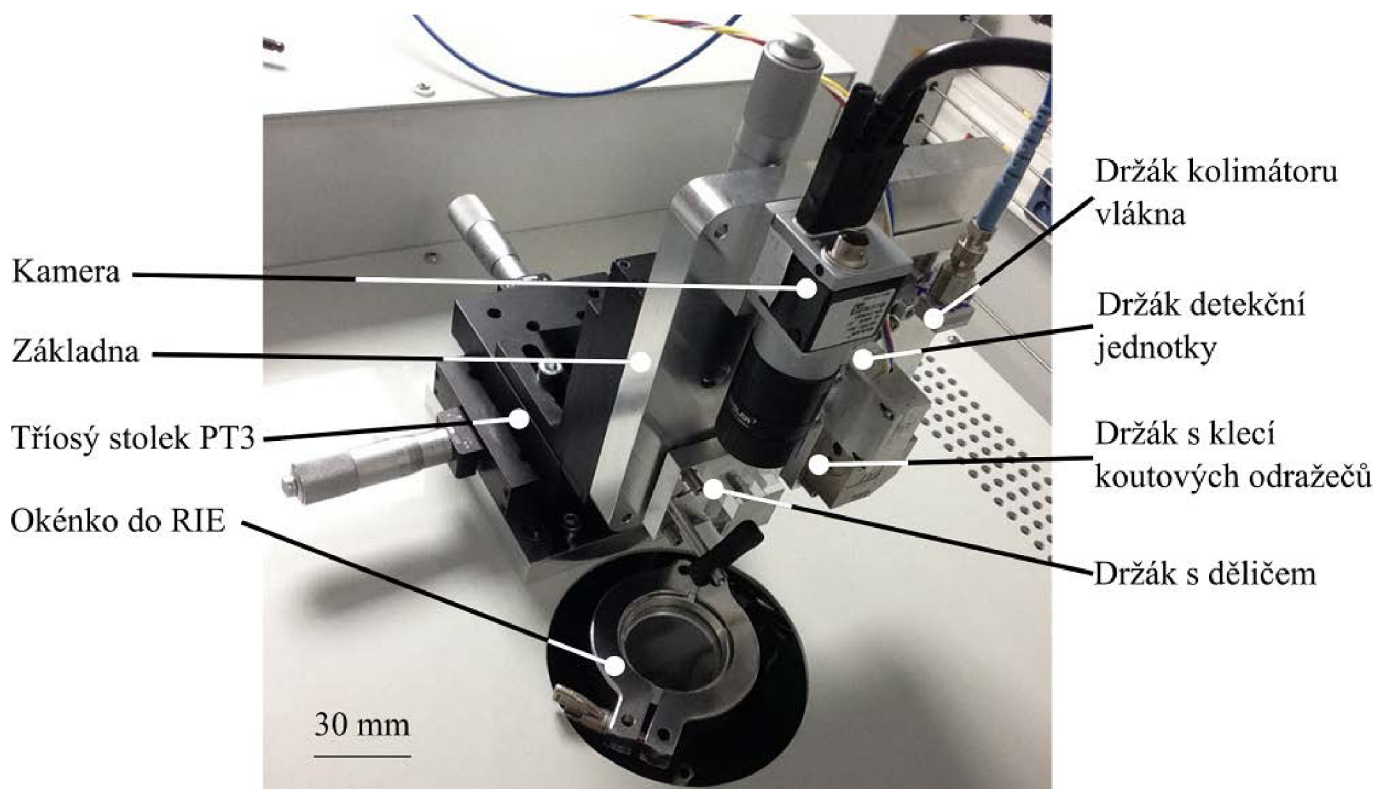
Data jsem proložil přímkou jejíž rovnice je $y = 30,82x + 7,7$ a směrodatná odchylka dat od této přímky je rovna $1,13 \mu\text{m}$. Z takto zjištěné rovnice jsme schopni v jakémkoliv časovém okamžiku stanovit hloubku struktury.

Číslo měření	Profilometr [μm]	Interferometr [μm]
1	$36,73 \pm 0,001$	35,5
2	$38,45 \pm 0,001$	36,9
3	$31,95 \pm 0,001$	31,3
4	$30,61 \pm 0,001$	29,4
5	$32,16 \pm 0,001$	31,3
6	$32,02 \pm 0,001$	33,6
7	$26,52 \pm 0,001$	24,4
8	$36,81 \pm 0,1$	37,7
9	$25,13 \pm 0,1$	24,2
10	$26,21 \pm 0,1$	26,3
11	$35,03 \pm 0,1$	33,1

Tabulka 6.1: Úbytky materiálu při jednotlivých měřeních. Chyba měření interferometrem je vysvětlena v textu výše.

7. Optimalizovaná sestava

System z dílů od firmy Thorlabs nám dostatečně nevyhovoval a proto jsme přistoupili ke konstrukci na míru navržené sestavě. Největší nevýhodou byla velikost celého měřicího zařízení. Kinematické držáky navíc vyžadují vertikální stojánky, které jsou ukotveny k základně PT3. Toto řešení snižuje celkovou tuhost a stabilitu konstrukce. Navíc polohovatelnost držáků je zbytečně předdimenzovaná a jelikož interferometr je nutné nakalibrovat pouze při jeho prvním spuštění, není nutné tyto vlastnosti po držácích vyžadovat. Navíc by bylo vhodné na celé zařízení umístit kryt, jelikož se v místnosti nachází klimatizace, která se může negativně podepsat na přesnosti interferometru z důvodu měnícího se indexu lomu vzduchu. Z těchto důvodů byl v této práci navržen a následně vyroben polohovací systém na míru, který zachovává funkčnost celé sestavy, ale optimalizuje její tuhost, maximální rozměry a v neposlední řadě i vzhled. Navíc testovací sestava neobsahuje kameru umístěnou nad okénkem do RIE a ztěžuje tím namíření měřicího svazku na vzorek. K rozdělení svazku pro potřeby měření a pro potřeby namíření na správné místo slouží nepolarizující dělič BS016, který je také nutné umístit na kinematický držák. V následujícím textu tedy budou popsány některé konstrukční prvky, využitě pro optimalizování měřicí sestavy.



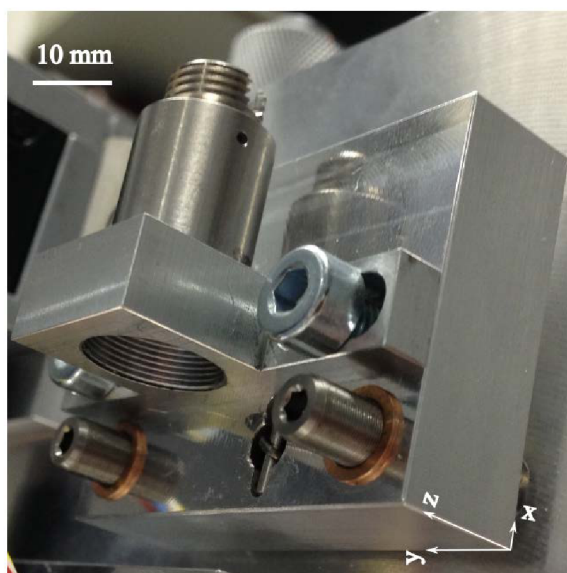
Obrázek 7.1: Navržená odměrovací sestava s pozorovací systémem. Obrázek je bez nasaženého krytu.

Ke grafickému návrhu byl použit software Autodesk Inventor Professional 2016. V tomto softwaru byly vytvořeny 3D modely kinematických držáků spolu s krytem, který celé zařízení bude chránit. Následně byly vytvořena technická dokumentace, která je přiložena

v příloze této práce. Jako konstrukční materiál byl zvolen dural, pro svojí dobrou obrobiteľnosť a svůj vysoký koeficient tepelné vodivosti. Celou složenou sestavu ukazuje obr. 7.1.

7.1. Vybrané konstrukční prvky

Všechny kinematické držáky od firmy Thorlabs mají vertikální stojánek, který umožňuje přibližný posuv v ose z a zároveň slouží k uchycení držáku k optické lavici. Skládá se ze dvou základen, jedné pohyblivé a druhé fixní. Nepřesný posuv v ose z byl největší problém testovací sestavy. Byl tedy nahrazen tří-kuličkovým systémem přesného kinematického držáku, který tento posuv umožňuje. Jelikož celkově jsou zapotřebí čtyři takové držáky (pro klec koutových odražečů, detekční jednotku, dělicí hranol a pro kolimátor) nabídla se možnost jejich fixní základny spojit do jedné. Toto řešení zvyšuje tuhost celé sestavy a zároveň snižuje její celkovou výšku.



Obrázek 7.2: Kinematický držák kolimátoru optického vlákna. kolimátor má na své objímce závit M11 \times 0,5, kterým je přichycen do držáku - viz výkresová dokumentace.

Všechny držáky k polohovatelnosti používají šrouby Thorlabs F19MS75 s bronzovými vložkami F19MSN1P. Pohyblivé základny jsou k sobě tlačeny pomocí tažných pružin T490 od firmy Alcomex. Pružiny mají tuhost 4,44 N/mm a délku ve volném stavu 21,6 mm. Maximální deformace pružin v plně zatíženém stavu je 5,9 mm. Pružiny tedy svými parametry dovolují maximální posuv v ose z o velikosti 3,9 mm, což je pro naše potřeby zcela dostačující. Pružiny jsou k základnám drženy kolíky o průměru 1,5 mm, které mají uprostřed zápich D 0,8 \times 0,1. Ten je za potřeby, aby se pružina v otvorech neotáčela.

Držák kolimátoru

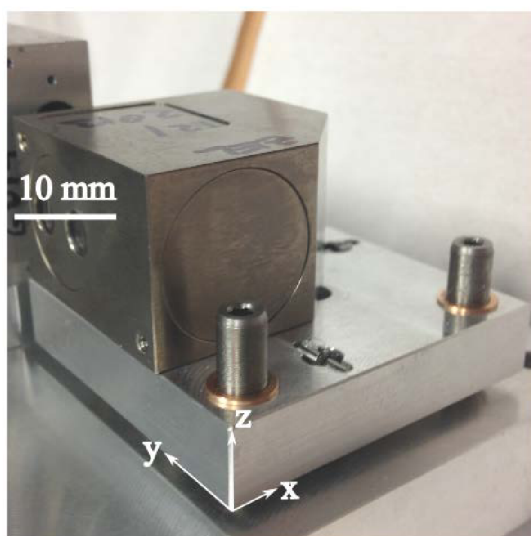
Kolimátor byl použit F220FC-A opět od firmy Thorlabs. Výhoda tohoto kolimátoru je, že má na svém konci závit. Kolimátor je tedy možné umístit do klece (výkres man A4-07 - viz příloha), tak jako na obr. 7.2 a pomocí na míru vytvořené pohyblivé základny (výkres

7.1. VYBRANÉ KONSTRUKČNÍ PRVKY

man A4-05) je s ním možné polohovat rotačně kolem všech os a translačně v ose z . K nepřesnému translačnímu polohování v ose y navíc slouží dva šrouby uložené v drážce.

Držák klece koutových odražečů

Klec koutových odražečů, je ke své pohyblivé základně (výkres man A4-03) přišroubována pomocí tří šroubů M2. Klecí tedy lze manipulovat rotačně pouze kolem všech os a translačně podél osy z . Žádný jiný pohyb ale není nutný, protože máme možnost polohovat se všemi ostatními komponentami celé měřící sestavy, kromě kamery. Navíc z kalibrace měřící sestavy bylo zjištěno, že malá změna polohy klece koutových odražečů má na seřízení interferometru největší vliv. I z tohoto důvodu je vůči pohyblivé základně klec umístěna fixně, protože je zajištěna největší tuhost tohoto prvku, viz obr. 7.3.

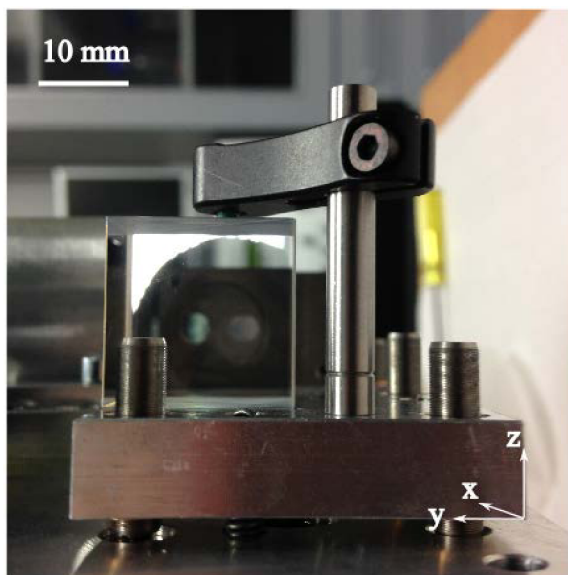


Obrázek 7.3: Kinematický držák klece koutových odražečů. K pohyblivé základně je přichycena pomocí třech šroubů M2 (na obrázku není vidět).

Držák děliče svazku

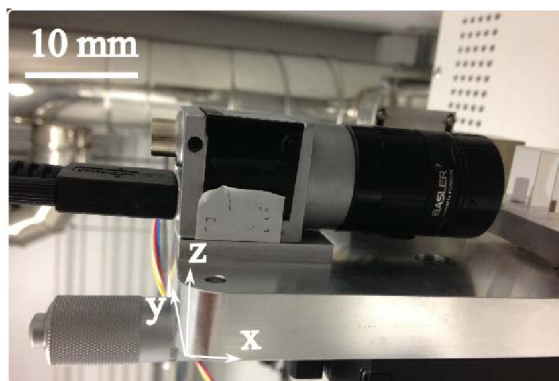
Dělič svazku je ke své základně připevněn pomocí ramene PM4 a dělí svazek takovým způsobem, aby část měřící větve zachytila kamera a druhá část byla odražena zpět do detekční jednotky, viz obr. 7.4.

7. OPTIMALIZOVANÁ SESTAVA



Obrázek 7.4: Kinematický držák děliče svazku. Dělič rozdělí měřicí větve na dvě. Jedna jde okénkem do RIE a druhá do kamery, abychom věděli, kam měřicí svazek míří.

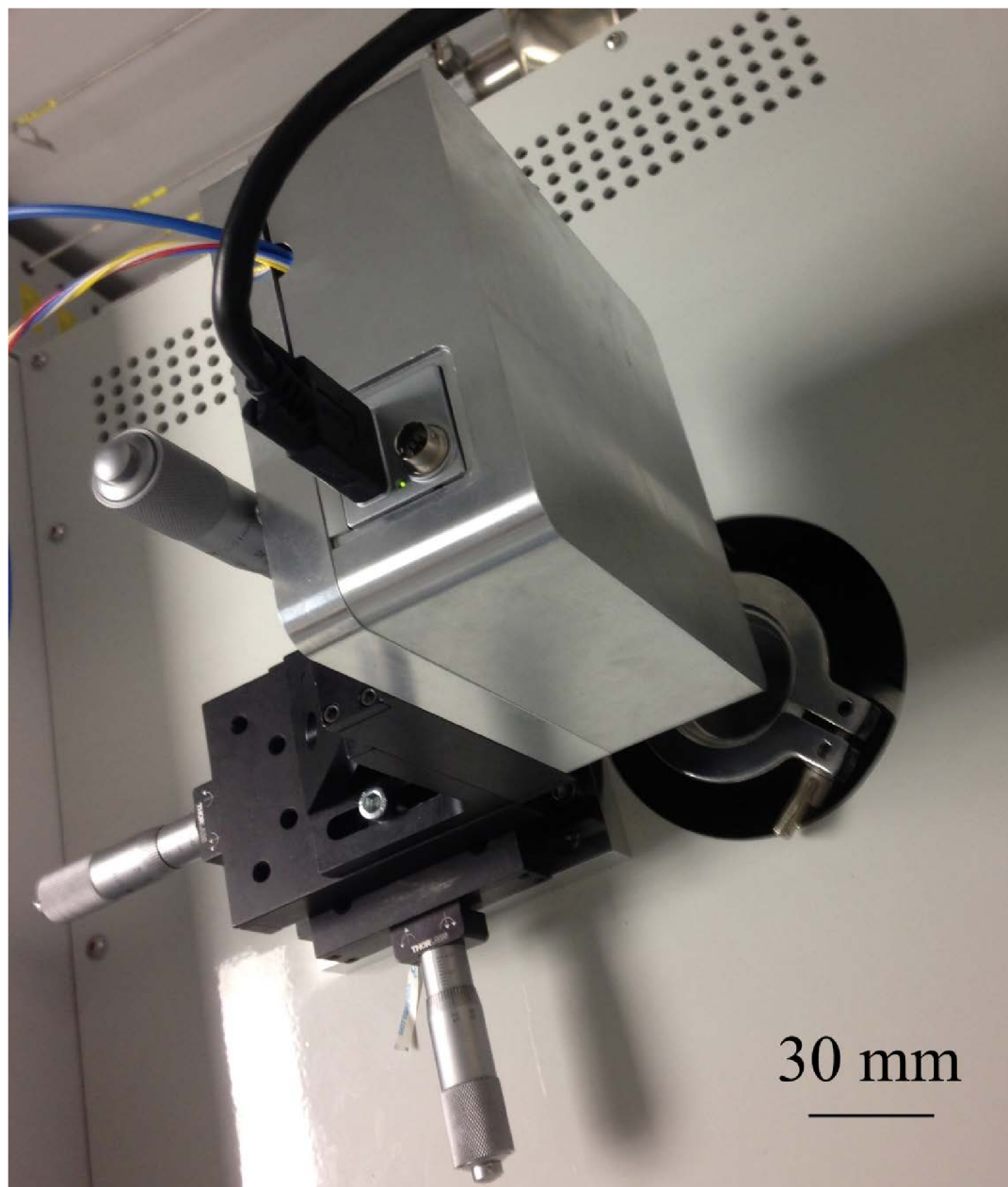
Jediná komponenta, která neobsahuje kinematický držák je kamera Basler ACA1920-25uc s namontovaným objektivem Basler Lens C125-0418-5M F1.8 f4mm. Přesná polohovatel-nost kamery není nutná. Je k ní namontována pouze podložka o tloušťce 8 mm, aby CCD čip byl vůči děliči svazku ve správné výšce.



Obrázek 7.5: Kamera.

7.1. VYBRANÉ KONSTRUKČNÍ PRVKY

Celá tato sestava je uzavřena duralovým krytem. Ten jednak zabraňuje okolnímu světlu, aby vytvářelo nežádoucí pozadí při detekci a zároveň slouží jako ochrana proti proudění vzduchu, kvůli kterému by nastávaly prudké změny indexu lomu vzduchu. Kromě těchto čistě konstrukčních funkcí, plní funkci i estetickou - viz obr. 7.6.



Obrázek 7.6: Kompletně složená sestava i s nasazeným krytem.

8. Závěr

Cílem této práce bylo seznámení se s interferometrickými metodami pro přesné měření délky, navrhnout, zkonstruovat funkční řešení pro měření hloubky leptu na systému RIE. Na realizované sestavě naměřit a vyhodnotit data a výsledky porovnat s referenčním měřením na profilometru.

Byla teoreticky popsána interference, koherence elektromagnetických vln a některé druhy interferometrů. Dále jsou v práci popsány metody pro přesnou detekci interferenčního proužku a to tzv. homodynní a heterodynní detekce. Vysvětlena je i víceprůchodová metoda pro zvětšení rozlišení.

V kapitole, kde je popsán leptací proces pro plazmochemické leptání na systému Plasmalab System 100, je vysvětlen i speciální proces vyvinutý firmou Bosch, při kterém bylo provedeno měření v praktické části. Tento proces umožňuje anizotropní leptání struktur.

Stěžejní část práce je věnována popisu konstrukce kinematických držáků umožňujících přesné polohování optických komponent. Je vysvětlen princip a metody uchycení kinematických vazeb a jejich výhody a nevýhody. Zmíněny byly i materiály používané pro jejich konstrukci a byla odůvodněna volba duralu pro výrobu těchto držáků.

Na základě znalostí vypracovaných v první polovině práce, byl sestaven model měřící části interferometru pouze z univerzálních optických dílů firmy Thorlabs. Byl rozebrán proces prvního spuštění interferometru a byly popsány programy, které se starají o zpracování dat. Na tomto systému byla odzkoušena funkčnost a zjištěny nedostatky, které vyplývají z jejího konstrukčního řešení. Jednalo se především o zbytečnou velikost celého zařízení a sníženou tuhost, která je důsledkem zmíněné univerzálnosti kupovaných kinematických držáků.

Kvůli těmto nedostatkům jsem navrhl kompletně novou sestavu v programu Autodesk Inventor Professional 2016. Mezi hlavní modifikace patřilo sloučení všech pohyblivých základů kinematických držáků do jedné a tím rapidní zvýšení tuhosti celé konstrukce. Díky tří-kuličkovému uchycení držáků byl navíc umožněn přesný posuv v ose z. Celé sestavě se snížila výška a mohla být doplněna o pozorovací systém využívající objektivu a kamery s vysokým rozlišením. Všechny komponenty byly vyrobeny na Ústavu přístrojové techniky AV ČR, v.v.i.

K odzkoušení funkce interferometru sloužil křemíkový wafer krystalografické orientace $\langle 100 \rangle$ od společnosti MicroChemicals, do kterého byla vyleptána pomocí Bosch procesu čtvercová struktura. Byl popsán proces měření včetně přípravy vzorku. Nastavený leptací program Bosch spočíval v sedmisekundovém leptání pomocí SF_6 a pětisekundovém depozování pomocí C_4F_8 . Během jednoho měřícího cyklu byla tato série stokrát opakována. Měřilo se celkem jedenákrát a naměřená data byla porovnána s profilometrem.

Výsledkem této práce je, že měření pomocí interferometru nejsou tak přesná jako pomocí profilometru, protože jsou ovlivněna velkými teplotními dilatacemi vakuové komory, které způsobuje chladicí okruh RIE. Tento problém bude v budoucnu vyřešen přesným regulačním ventilem a úpravami chladicího okruhu. I přes tyto nedostatky jsou dosažené výsledky dostačující pro běžné úkony leptacího procesu a výsledkem je zjištění leptací závislosti Bosch procesu. Dalším vylepšením je zpracování dat z interferometru v reálném čase pomocí programu LabView. To umožňuje zastavit leptací proces po dosažení určité hloubky leptu a tím zkvalitnění výroby mikro a nanostruktur. Tyto výhody

převažují nad přesnějším měřením pomocí profilometru, který je z logiky věci použitelný až po dokončení leptacího procesu.

Literatura

- [1] COLLETT, M.J. *Quantum theory of optical homodyne and heterodyne detection*. J Mod Optic. 1987, vol. 34, no. 6/7, p. 881-902.
- [2] ČÍP, Ondřej a Zdeněk BUCHTA. *Přesné měření délek pomocí laserové interferometrie*. [online]. 2011 [cit. 2016-04-04]. Dostupné z: http://www.crr.vutbr.cz/system/files/brozura_06_1110.pdf.
- [3] GOODWIN, Eric P a James C WYANT. *Field guide to interferometric optical testing*. Bellingham, Wash.: SPIE Press, c2006. SPIE field guides, FG10. ISBN 9780819465108
- [4] HECHT, Eugene. *Optics*. 4th ed. San Francisco: Addison Wesley, c2002. ISBN 0-321-18878-0
- [5] KOMRSKA, Jiří. *Difrakce světla*. 1. vyd. Brno: VUT v Brně, 2001. ISBN 80-214-1976-8.
- [6] LABOUTKA, Karel a Tomáš SUCHÁNEK. *Vodní vytápěcí soustavy: výpočtové tabulky*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1985.
- [7] LEPIL, Oldřich. *Fyzika pro gymnázia*. 4. vyd. Praha: Prometheus, 2010. ISBN 978-80-7196-384-4.
- [8] LIEBERMAN, M. A. a Allan J. LICHTENBERG. *Principles of plasma discharges and materials processing*. New York: John Wiley and Sons, c1994. ISBN 0-471-00577-0.
- [9] McVITTIE, Jim. *Bosch DRIE Silicon Processing and STS Results*. [online]. 2008 [cit. 2016-24-05]. Dostupné z: <http://wcam.engr.wisc.edu/Public/Reference/PlasmaEtch/BoschProc-STs.pdf>.
- [10] MIKULČÁK, Jiří. *Matematické, fyzikální a chemické tabulky pro střední školy*. 4. vyd. Praha: Prometheus, 2007. Pomocné knihy pro žáky (Prometheus). ISBN 978-80-7196-345-5
- [11] Optical Mirror Mount Technology Guide. Newport [online]. California: Newport Corporation, 2016 [cit. 2016-05-16]. Dostupné z: <http://www.newport.com/Optical-Mirror-Mount-Technology-Guide/1012753/1033/content.aspx>
- [12] ŠANTAVÝ, Ivan. LIŠKA MIROSLAV. *Fyzika II: Kmity, vlnění, optika, atomistika*. 2 vyd. Praha: SNTL, 1976.
- [13] PIKÁLEK, Tomáš. *Analýza profilu povrchů pomocí interferometrie nízké koherence*. Brno, 2014. 73 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Zdeněk BUCHTA.
- [14] PISANI, Marco. *A homodyne Michelson interferometer with sub-picometer resolution*. Measurement Science and Technology [online]. 2009, 20(8), 084008 [cit. 2016-04-11]. DOI: 10.1088/0957-0233/20/8/084008. ISSN 0957-0233.

LITERATURA

- [15] RÝC, Jan. *Michelsonův interferometr*. diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav automatizace a měřicí techniky, 2011. 69 s. Vedoucí práce byl Ing. Zdeněk Havránek, Ph.D.
- [16] SUHR, Wilfried a H. Joachim SCHLICHTING. *Coloured rings produced on transparent plates*. *Physics Education*. 2007, vol. 42, no. 6, s. 566–571. Dostupné z: doi: 10.1088/0031-9120/42/6/001. ISSN 0031-9120.
- [17] URBÁNEK, Michal, Stanislav KRÁTKÝ, Milan MATĚJKA, Vladimír KOLAŘÍK a Miroslav HORÁČEK. Plazmochemické leptání křemíku v zařízení diener nano. *Chemické Listy* [online]. Czech Society of Chemical Engineering, 2014, 108(6), 592-595 [cit. 2016-04-27]. ISSN 00092770.
- [18] VERDONCK, Patrick, Priscila Braga CALÍOPE, Emílio Del Moral HERNANDEZ a Ana Neilde R. DA SILVA. Plasma etching of electrospun polymeric nanofibres. *Thin Solid Films* [online]. 2006, 515(2), 831-834 [cit. 2016-04-27]. DOI: 10.1016/j.tsf.2005.12.196. ISSN 0040-6090.
- [19] VLADISAVLJEVIC, Goran T., Isao KOBAYASHI a Mitsutoshi NAKAJIMA. Membranes for Microfluidic Applications. *Encyclopedia of Membrane Science and Technology*[online]. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc, 2013 [cit. 2016-05-24]. DOI: 10.1002/9781118522318.emst140. ISBN 9781118522318.
- [20] VUKOBRATOVICH, Daniel. *Introduction to Opto-Mechanical Design*. Arizona: Raytheon Systems Company, 1999. ISBN 978-0029497913.
- [21] YODER, Paul R. *Mounting optics in optical instruments*. 2nd ed. Bellingham, Wash.: SPIE, 2008. ISBN 9780819471291.

Seznam obrázků

2.1	Dva extrémní případy interference. Vlevo je fázový rozdíl roven sudému násobku čísla π , vpravo je roven lichému násobku π	4
2.2	Dvě vzájemně koherentní vlny. Fázový posuv je po celou dobu konstantní. Překresleno z [15]	5
2.3	Dvě částečně koherentní vlny. Fázový posuv není konstantní. Překresleno z [15]	5
2.4	Schéma Michelsonova interferometru. Překresleno podle [3].	6
2.5	Schéma Mach-Zenderova interferometru. Překresleno podle [3].	7
2.6	Schéma Fabry-Perrotova interferometru. Překresleno podle [3].	8
2.7	Schéma Youngova interferometru. Překresleno podle [4].	9
2.8	Schéma Homodynní detekce Michelsonova interferometru. Překresleno podle [2].	10
2.9	Průběh interferenčního proužku pomocí homodynní detekce. Převzato z [2].	10
2.10	Paralelní multiprůchodová jednotka se dvěma koutovými odražeči. d ; průměr paprsku, KT : koutový odražeč, L ; velikost přepony koutové odražeče, D ; vzdálenost mezi odražeči, M ; zrcadlo. Překresleno podle [14].	11
2.11	Schéma Michelsonova interferometru s heterodynní detekcí. Převzato z [2].	12
3.1	Schéma jednoduchého plazmochemického reaktoru [8].	15
3.2	Jednotlivé módy v Bosch procesu. Překresleno podle [19].	16
4.1	Boční pohled na typický kinematický držák zrcadla. Překresleno z [11]. . .	17
4.2	Popis nejčastěji používaných vazeb pro kinematické držáky. Překresleno z [11].	18
4.3	Vznik nechtěné translace při náklonu pohyblivé základny. Překresleno z [11].	18
5.1	Schéma Michelsonova interferometru vyvinutého na ÚPT.	21
5.2	Program napsaný v prostředí LabView zpracovávající data z interferometru.	22
5.3	Programy, které slouží k „oživení“ a základnímu nastavení interferometru.	23
5.4	Laser o vlnové délce 532 nm vyvinutý na ÚPT a A/D převodní deska umístěná v racku, která komunikuje s počítačem.	23
5.5	Testovací sestava interferometru, na které byla odzkoušena funkčnost. . . .	24
5.6	Postup přípravy vzorku pro litografii.	25
6.1	Profilometr KLATencor D-120, na kterém byla provedena porovnávací měření.	26
6.2	Křemkový wafer po jedenácti Bosch procesech. Vyleptaná struktura je přibližně 390 μm hluboká. V obrázku je zelenou čarou označeno místo měření profilometrem. Zelená tečka značí místo měření interferometrem.	27
6.3	Záznam jednoho z měření. Signál obsahuje spoustu šumu (způsobenou především změnami tlaku v chladícím okruhu RIE) a nežádoucí vysoké hodnoty na začátku a na konci, které je potřeba odstranit.	27
6.4	Detail na část měření. Zelená křivka je vyhlazený signál pomocí Gaussovy funkce, červené body jsou lokální extrémy. Modrá jsou původní data. . . .	28
6.5	Schéma řezu křemíkovým waferem. Vzdálenost p měří profilometr. Vzdálenost i měří interferometr.	28
7.1	Navržená odměřovací sestava s pozorovací systémem. Obrázek je bez nasazeného krytu.	30

SEZNAM OBRÁZKŮ

7.2	Kinematický držák kolimátoru optického vlákna. kolimátor má na své objímce závit M11 × 0,5, kterým je přichycen do držáku - viz výkresová dokumentace.	31
7.3	Kinematický držák klece koutových odražečů. K pohyblivé základně je přichycena pomocí třech šroubů M2 (na obrázku není vidět).	32
7.4	Kinematický držák děliče svazku. Dělič rozdělí měřící větve na dvě. Jedna jde okénkem do RIE a druhá do kamery, abychom věděli, kam měřící svazek míří.	33
7.5	Kamera.	33
7.6	Kompletně složená sestava i s nasazeným krytem.	34

9. Seznam použitých zkratek a symbolů

$A(\vec{r})$	komplexní amplituda vlnové funkce v bodě \vec{r}
c	rychlost světla [ms^{-1}]
f	frekvence [s^{-1}]
φ	fázový posuv [rad]
$\Gamma(\tau)$	komplexní stupeň koherence jako funkce času
$I(\vec{r})$	intenzita světla jako funkce polohy [Wm^{-2}]
k	vlnové číslo [m^{-1}]
l	délka [m]
l_c	koherenční délka [m]
λ	vlnová délka světla [m]
n	celé číslo
ω	úhlová frekvence [rads^{-1}]
π	Ludolfovo číslo
$\Psi(\vec{r}, t)$	komplexní vlnová funkce polohy a času
t	čas [s]
τ_c	koherenční doba [s]
RIE	reaktivní iontové leptání (z angl. reactive ion etching)
ÚPT	Ústav přístrojové techniky
V	viditelnost nebo také kontrast
v	fázová rychlost [ms^{-1}]
x_n	poloha n-tého maxima

10. Seznam příloh

10.1. Skript pro prostředí Matlab

„smoothing.mat“ - spočte konvoluci Gaussovy křivky s naměřeným signálem. Nalezne lokální maxima a výsledek zobrazí v grafu.

10.2. Výkresová dokumentace

Kompletní výkresová dokumentace k této práci je přiložena v deskách.