

VĚDECKÉ SPISY VYSOKÉHO UČENÍ TECHNICKÉHO V BRNĚ

*Edice Habilitační a inaugurační spisy, sv. 430*

*ISSN 1213-418X*

**Josef Lazar**

# **INTERFEROMETRIE PRO NANOMETROLOGII**

Ústav přístrojové techniky, Akademie věd České republiky, v.v.i.

**doc., Ing. Josef Lazar, Dr.**

## **Interferometrie pro nanometrologii**

Interferometry for nanometrology

Teze přednášky k profesorskému jmenovacímu řízení  
v oboru Elektronika a sdělovací technika



BRNO 2012

**Klíčová slova:**

laser, koherence, interferometrie, metrologie délky, kalibrace, stabilizace frekvence, spektroskopie, koncová měrka, femtosekundové pulzy, rezonátor

**Keywords:**

laser, coherence, interferometry, metrology of length, calibration, frequency stabilization, spectroscopy, gauge block, femtosecond pulses, cavity

## Obsah

|   |    |
|---|----|
| Představení autora.....   | 4  |
| Úvod .....  | 5  |
| Metrologie délky.....   | 5  |
| Nový obor – nanometrologie .....  | 7  |
| Interferometrie velkého rozlišení.....                                  | 7  |
| Měřicí systém pro nanometrologii.....                                   | 10 |
| Laserové zdroje záření .....  | 12 |
| Optické syntezátory v metrologii.....                                   | 15 |
| Další vývoj měřicího systému pro nanometrologii.....                    | 18 |
| Nekoherentní interferometrie pro kalibraci koncových měřek.....         | 19 |
| Kompensace vlivu fluktuací indexu lomu .....                            | 21 |
| Měřicí systém pro nanometrologii – národní nanometrologický etalon..... | 24 |
| Závěr .....   | 26 |
| Reference .....   | 27 |
| Abstract.....   | 28 |

## Představení autora

Narozen: 9. prosince 1965 v Bratislavě

### Vzdělání

- Gymnázium Koněvova Brno, (nyní Vídeňská), zaměření na programování a obsluhu samočinných počítačů, maturita 1994
- VUT Brno, Elektrotechnická fakulta, obor Technická kybernetika, udělení titulu Ing. 1989
- Doktorské studium na FEKT VUT, obor Elektronika, udělení titulu Dr. 1996
- Habilitace na FEKT VUT, obor Elektronika a sdělovací technika, 2009



### Zařazení na pracovišti

- odborný pracovník Ústavu přístrojové techniky AV ČR, v.v.i. od 1989
- od r. 1996: vědecký pracovník
- od r. 2003: samostatný vědecký pracovník
- od r. 2003: vedoucí vědecký pracovník, vedoucí oddělení Koherenční optiky

### Vědecká činnost

1989-1996 problematika He-Ne laserů a jejich stabilizace, vývoj He-Ne laseru vyzařujícího na vlnové délce 543 nm, stabilizace 543 nm He-Ne laserů na emisní čáře Ne a studium polarizační stability modů, stabilizovaný dvoufrekvenční 543 nm He-Ne laser pro potřeby dvoubarevné interferometrie, stabilizace 543 nm He-Ne laseru prostřednictvím saturevané absorpce v parách jodu a realizace normálu optické frekvence na této vlnové délce

od 1997 polovodičové lasery s vysokou koherencí, lasery s externím rezonátorem, polovodičový laserový normál optické frekvence v okolí vlnové délky 633 nm

2002 vývoj stabilizovaného laserového „master oscillator“ pro výkonový pulzní laser centra PALS (Prague Asterix Laser System), Fyzikálního ústavu AV ČR

2004 spolupráce s ČMI na vývoji laserového etalonu optické frekvence v telekomunikačním pásmu vlnových délek

vývoj polovodičových výkonových laserů pro přípravu „hyperpolarizovaných“ vzácných plynů srážkovým přenosem magnetického momentu z elektronových obalů opticky čerpaných atomů par alkalických kovů ve spolupráci s oddělením Nukleární magnetické rezonance

projekty směřující do interferometrie s velkým rozlišením, nanometrologie a též do aplikované průmyslové interferometrie

vývoj technologie přípravy a plnění absorpčních květ pro stabilizaci laserů a metodiky jejich měření a kalibrace prostřednictvím indukované fluorescence a přímým měřením absolutních frekvenčních posuvů

návrhy interferometrů pro kalibraci polohových snímačů a interferometrického systému na bázi interferometrie s nízkou koherencí pro měření koncových měrek

problémy související s vlivem fluktuací indexu lomu, návrh konceptu systému pro přímou kompenzaci jeho vlivu v ose měření interferometru

účast v projektu HiPER, (High Power laser Energy Research facility); jedná se o laserem řízený fúzní demonstrátor, vývoj optických vrstev pro aktivní prvky výkonových laserů

## Úvod

Následující teze představují komentář k souboru 10 vybraných publikací, tematicky zaměřených na interferometrické měřicí techniky s velkým rozlišením, které nalézají využití především v nanometrologii. S rozvojem nanotechnologií se nanometrologie konstituuje jako nový metrologický obor zaměřený na struktury, jejichž prvky se pohybují v nanometrových rozměrech, případně i pod hranicí 1 nm. Vzhledem k tomu, že laserová interferometrie představuje v současné době nejpřesnější měřicí techniku dimenzionálních veličin, navíc vázanou přímo na základní definici délky, vedou požadavky nanoměření ke snahám posouvat dále limity interferometrického rozlišení a přesnosti. Toto téma, které je společné mému výzkumnému snažení v posledních létech je také jednotícím tématem tohoto souboru. Navazuje na téma vysoce koherentních laserů, které bylo pro mne nosné v předchozí době a bylo souhrnně zpracováno v mé habilitační práci.

Snažení na poli laserů s vysokou koherencí, stabilizace optické frekvence laserů, interferometrie délek a laserové metrologie navazuje na zaměření Oddělení kvantových generátorů světla Ústavu přístrojové techniky AV ČR (dříve ČSAV). Zakladatel a dlouholetý vedoucí oddělení Ing. František Petřů, DrSc. byl tvůrcem prvního plynového laseru v Československu a orientoval výzkumnou činnost svého týmu postupně nejen na vývoj He-Ne laserů, ale i na aplikace kladoucí nejvyšší nároky na spektrální vlastnosti laserů – interferometrii a fundamentální metrologii.

## Metrologie délky

S novou formulací definice jednotky délky – metru – prostřednictvím rychlosti šíření světla ve vakuu se primárním etalonem délky stal koherentní zdroj světelného záření s co nejvyšší stabilitou (nejistotou) optického kmitočtu. Formulací definice uvádějící šíření světla ve vakuu a předpokládající vakuovou rychlost světla, jako známou a přesnou fyzikální konstantu je dáno, že přesný optický kmitočet světelného zdroje určuje přímo přesnou hodnotu vlnové délky. Tato elementární délka a její odpočítání vhodným způsobem (interferometrem) je pak skutečnou realizací délkové jednotky.

Laser – kvantový generátor světla – optický oscilátor – se logicky stal ztělesněním takového etalonu. Dlouhá léta byla metrologie doménou helium-neonových laserů. He-Ne laser byl relativně konstrukčně jednoduchý, pracoval ve viditelné spektrální oblasti, byl realizovatelný v konfiguraci zajišťující jednofrekvenční provoz a koherenční délku na úrovni až stovek metrů. V praktické a průmyslové interferometrii geometrických veličin se stal jediným používaným laserovým zdrojem záření a v této pozici setrvává doposud. Logicky vznikla snaha realizovat na bázi He-Ne laseru i primární etalon délky. Toto úsilí bylo korunováno úspěchem v roce 1983, kdy byla pod patronací BIPM (Bureau International des Poids et Mesures v Paříži) vydána doporučení stanovující základní technické parametry stabilizovaného laserového systému na bázi He-Ne laseru pracujícího na vlnové délce 633 nm, která musí splňovat základní etalon délky.

Jako reference pro stabilizaci optické frekvence laseru byly zvoleny hyperjemné komponenty vibračně-rotačních přechodů v molekulárním plynném jodu izotopu  $^{127}\text{I}$ . Toto médium se osvědčilo pro převážnou část viditelného spektra. Spektrum jodu je bohaté na hustou síť úzkých absorpčních čar. Bohužel se ukázalo, že optický kmitočet 633 nm He-Ne laseru je v koincidenci jen s velmi slabou skupinou komponent přechodu R(127)11-5, takže v tradičním uspořádání absorpční spektroskopie s laserem a kyvetou plněnou absorberem není možné dosáhnout poměru signál/šum v detekčním řetězci na takové úrovni, aby bylo reálné od některé z detekovaných hyperjemných komponent odvodit chybovou veličinu regulační smyčky stabilizace frekvence. Řešení se našlo v konfiguraci s absorpční kyvetou uvnitř rezonátoru laseru. Jakost rezonátoru laseru zaručuje násobně vyšší výkon v absorpční kyvetě a koincidence pracovního kmitočtu laseru s absorpcí v jodu se projeví zvýšením ztrát v rezonátoru. Tím též dojde k násobnému zesílení vlivu absorpce

na změnu optického výkonu, tentokrát celkového výkonu laseru s interní absorpční kyvetou. Umístění absorbéru uvnitř rezonátoru laseru zaručuje též potlačení dopplerovského rozšíření absorpčních čar technikou saturačně absorpční spektroskopie. Protiběžné šíření světelné vlny v absorbéru způsobí „vypálení bennetovských děr“ v dopplerovsky rozšířeném profilu absorpční čáry (v případě jodu v profilu vzniklém superpozicí dopplerovsky rozšířených profilů blízkých hyperjemných komponent přechodu) a v okamžiku koincidence frekvence laseru s frekvencí jedné z komponent dojde k saturaci absorpce, snížení ztrát v absorbéru a nárůstu výkonu laseru. Tento inverzní Lambův zářez má šířku danou homogenním rozšířením, která je ovlivněna především tlakem plynu v kyvetě. Při typické šířce homogenně rozšířené čáry hyperjemné komponenty jodu na úrovni několika málo MHz je s použitím techniky detekce derivační spektroskopie dosažitelná stabilita na úrovni několika kHz pro integrační doby pohybující se v rozmezí 10 až 100 s.

Fundamentální metrologie délek je ve své podstatě metrologií optických frekvencí. Vysoce stabilní lasery je možné vnímat především jako přesné oscilátory. Porovnávání jejich frekvencí je snazší a přesnější, než porovnávání vlnových délek, je nezávislé na rychlosti šíření elektromagnetické vlny v atmosféře. Měření rozdílového kmitočtu dvou laserů, jejichž optické frekvence jsou dostatečně blízké lze realizovat směřováním na nelineárním členu – fotodetektoru, jehož výstupní elektrická veličina (fotoproud) je úměrná kvadrátu elektrické složky dopadajícího pole. Záznejový signál lze snadno měřit s velkou přesností elektronickým čítačem. Tento proces je optickou obdobou heterodynního směřování. Je-li záznejový kmitočet radiofrekvenčním signálem zpracovatelným elektronicky typicky na úrovni pod 1 GHz, stačí jej čítat s přesností na kHz, což odpovídá relativní přesnosti  $10^{-6}$ , aby byly zaznamenány odchylky od optických frekvencí měřených laserů na úrovni  $10^{-11}$  relativní odchylky. Kalibrace sekundárních etalonů optických frekvencí (vlnových délek) vyžaduje tedy primární etalon pracující na téměř identické frekvenci. V metrologii času, resp. radiových frekvencí je syntéza libovolného kmitočtu při zachování relativní přesnosti běžnou záležitostí. Základní etalon – cesiové atomové hodiny s dlouhodobou relativní přesností na úrovni  $10^{-15}$  postačují jako jediný etalon pokrývající všechny potřeby technické praxe. V optické oblasti není syntéza libovolného kmitočtu možná. Postupně přibývajících potřeby přesných optických kmitočtů pro nejrůznější aplikace ve spektroskopii, telekomunikacích, vícebarevné interferometrii, aj. vedly k potřebám vyvinout vysoce přesné stabilizované lasery na různých vlnových délkách.

Průlomem v oboru metrologie optických frekvencí byl objev efektu synchronizace modů u pulzních laserů (angl. mode-lock) a následně technická realizace tzv. optických frekvenčních syntezátorů. Na záření pulzního laseru lze pohlížet v časové doméně jako na sérii krátkých světelných impulzů a ve frekvenční doméně na řadu diskrétních optických frekvencí, vzdálených o opakovací frekvenci – převrácenou hodnotu periody mezi jednotlivými pulzy. Tento v základu jednoduchý princip implikuje metrologicky významnou vlastnost. Radiofrekvenční opakovací kmitočet je obsažen v celistvém násobku v každé komponentě optického spektra. Tím lze pulzní laser vnímat jako transformátor frekvence celočíselným násobkem z radiofrekvenční oblasti do optické. Relativní stabilita radiofrekvenčního kmitočtu je tak převedena na relativní stabilitu každé jednotlivé optické komponenty. Vzniklý „hřeben“ optických frekvencí může tedy mít stabilitu odvozenou od cesiových hodin a generovat vysoce přesné optické frekvence. Lze očekávat, že díky tomuto principu propojujícímu metrologii času a délky (radiofrekvenční a optické oscilátory) dojde v budoucnosti i ke sloučení definice délky a času. Po technické stránce s vývojem vysoce stabilních laserů využívajících spektroskopie jednotlivých atomů (nejčastěji iontů chycených v elektromagnetických pastech) je pravděpodobné, že cesiové hodiny budou nahrazeny „optickými“ hodinami – vysoce stabilním laserem, jehož optický kmitočet bude naopak konvertován do radiofrekvenční oblasti pulzním laserem se synchronizací modů.

## Nový obor – nanometrologie

Reálné měření vzdáleností, nebo v obecnějším smyslu dimenzionálních veličin je pak doménou interferometrie. Techniky, která fakticky odpočítáním příslušného počtu délkových kvant – elementárních vlnových délek umožňuje změřit rozměry makroskopických objektů reálného světa. Monochromatické a koherentní světlo laserového zdroje vykazuje schopnost interference i při větším dráhovém rozdílu rozdělené vlny. Omezení je nazýváno koherenční délkou a pro vysoce koherentní lasery používané v metrologické praxi není koherenční délka pro praktická měření limitujícím faktorem.

Jak bylo naznačeno, měření délky interferometrem lze připodobnit k počítání vlnových délek, principu ne nepodobnému počítání délkových značek např. na pravítku. Z tohoto principu vyplývá, že měření interferometrem je z principu inkrementální. Nelze tedy měřit neznámou vzdálenost absolutně, je nutné měřicí „konec“ interferometru (zrcadlo, koutový odražeč) posunout z výchozího bodu do koncového a spočítat počet interferenčních maxim. Navíc, laserový svazek nesmí být přitom přerušen, jinak je ztracena informace o počtu. Na druhou stranu má inkrementální měření výhodu teoreticky neomezené dynamiky měřicího rozsahu. Omezujícím faktorem vázaným na celkový rozsah měření je pouze nejistota optické frekvence laseru a vliv homogenity prostředí, nejčastěji vzduchu, který ovlivňuje rychlost šíření světla a tím konverzi optické frekvence na vlnovou délku.

V poslední době se pozornost metrologů délky zaměřila na opačný konec škály, na měření malých délek a rozměrů, samozřejmě s těmi nejvyššími nároky na přesnost, jde přece o snažení na poli fundamentální metrologie. Lze říci, že toto snažení je odpovědí na rozvoj oboru nanotechnologií, který si klade mimo jiné za cíl vytvářet struktury s dimenzemi na nanometrové úrovni, případně i pod ní. Existuje-li něco takového, je pochopitelně nutné to nejen zobrazit, ale i kvantifikovat, tedy změřit. Nanotechnologie není vnímána jako nový a samostatný obor nadarmo, principy a postupy běžné v makrosvětě nelze jen prostě přeškálovat o několik řádů a použít v nanosvětě. Podobně je tomu v případě měření na nanoúrovni. Proto je nanometrologie také vnímána jako samostatný a nejmladší obor v metrologii. Zjednodušeně lze říci, že se jedná o technická řešení kombinující zobrazování různými mikroskopickými technikami s odměřováním s rozlišením a přesností nezbytnými v nanosvětě. Zobrazovací techniky, které požadavky na rozlišení splňují, jsou v zásadě pouze dvě: mikroskopie atomárních sil a řada variací sondové mikroskopie na jedné straně a elektronová mikroskopie na druhé. Obé mají své přednosti a nedostatky, jak co do rozlišení, charakteru obrazové informace a samozřejmě instrumentální náročnosti. Na poli interferometrie se jedná především o vylepšování interferometrických technik s cílem zlepšit zvláště rozlišení. V případě prostého počítání interferenčních maxim je logicky limitem rozlišení jedna elementární vlnová délka. Pro viditelné světlo tedy cca 0,5  $\mu\text{m}$ . To je pro měření nanostruktur pochopitelně zoufale moc. Snažení je tedy soustředěno na to, jak nejlépe rozdělit a rozlišit členění této elementární délky.

## Interferometrie velkého rozlišení

Jak bylo naznačeno, inkrementální povaha interferometrického měření vzdáleností znamená, že na měřicí rozsah není nutno nahlížet z pohledu dynamického rozsahu. To ovšem neplatí pro měření v měřítku pod úrovní jednotlivé vlnové délky. Rozčlenit tuto elementární délku na jemnější stupnici se přímo nabízí. Logickým řešením je zvýšení počtu průchodu měřicího svazku. Už samo základní uspořádání Michelsonova interferometru, tradičně používaného k měření vzdáleností znamená dvojitý průchod měřicí větví. Základní rozlišení je tedy  $\lambda/2$ . Víceprůchodové konfigurace byly prezentovány, ale zde je limitujícím faktorem především optická složitost soustavy. Na optické komponenty pro interferometrii jsou kladeny zvláště vysoké nároky, kvalita

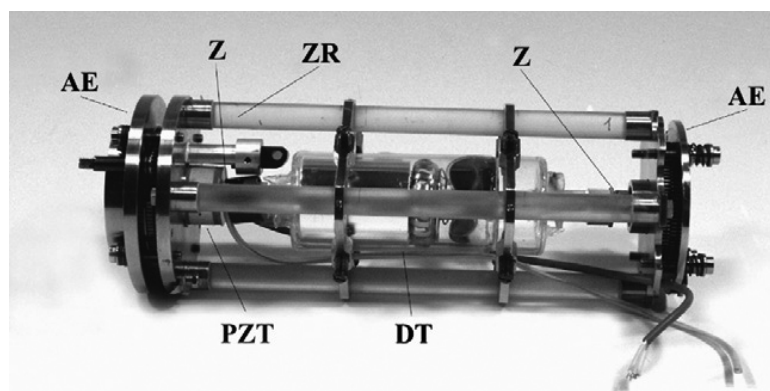


povrchů musí být na úrovni rovinnosti hluboko pod vlnovou délkou. Navíc vícenásobný průchod znamená, že deformace vlnoplochy po mnohočetném průchodu děliči svazku a odrazu na reflexních plochách nabývají hodnot významně redukcující interferenční kontrast. V praxi se lze stěží setkat s více, než osminásobným průchodem svazku měřicí větví.

Již v počátcích interferometrie bylo zřejmé, že cesta vede spíše elektronického zpracování signálu. Nejprve byly navrženy analogové elektronické metody s řadami komparátorů, obdoba analogově-digitálních převodníků s přímým převodem. Digitalizace pak posunula tento obor na kvalitativně novou úroveň. V rámci jednoho interferenčního proužku lze na měření nahlížet tradičně z pohledu dynamiky. Limitujícím faktorem je hladina šumu (zde je dominující zdroj záření – laser) a tu lze technicky omezit pouze zúžením šířky pásma, tedy redukcí rychlosti měření. Druhé omezení představuje linearita dělení stupnice. Zvláště vlivem fázových chyb polarizační optiky je linearita interpolace jednotlivého interferenčního proužku problémem.

Historicky prvním konceptem, jak měřit délku v malém rozsahu s velkým rozlišením a bez omezení linearity byly rezonátorové metody. Ladění délky rezonátoru laseru představuje změnu jeho optické frekvence. Frekvence je přitom veličina, kterou lze čítáním měřit velmi snadno a přesně. Kombinace jodem stabilizovaného laseru s polohovatelnou referenční plochou vázanou na jedno ze zrcadel bylo prvním pokusem o délkový etalon v nanosvětě. Známé frekvence hyperjemných přechodů v jodu představovaly „značky“ na frekvenční stupnici a alespoň několik bodů na škále dané přeladěním laseru bylo tak absolutně známých.

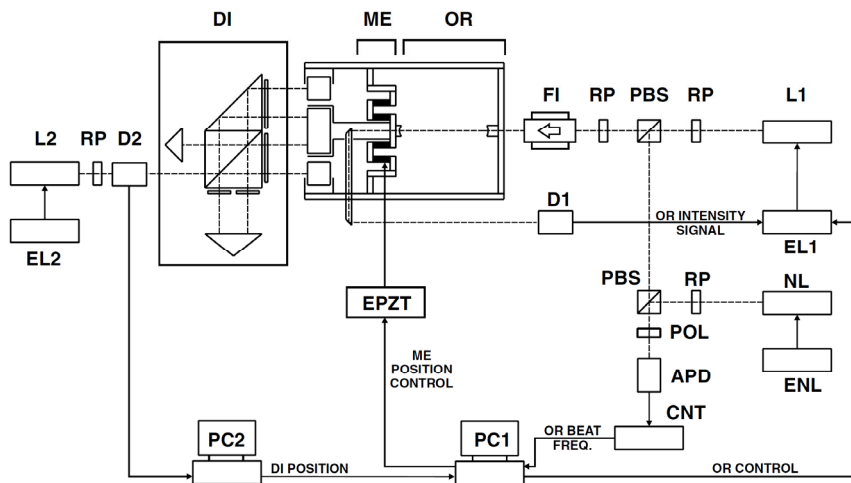
Princip konverze délky na (optickou) frekvenci jsme rozvinuli v konceptu, který je popsán v [1]. Místo laseru, jehož aktivní prostředí vykazuje nežádoucí nelineární efekty ovlivňující linearitu vazby mezi délkou a frekvencí jsme navrhli jako etalon změny délky pasivní rezonátor vázaný na laditelný laser zpětnovazební regulační smyčkou (obr. 1). Řešení bylo založeno na He-Ne laserech, což znamenalo značné omezení v rozsahu plynulého přeladění, ale primárním cílem byla kalibrace interferometrů v rozsahu daném jedním interferenčním proužkem. Pro tento účel byl rozsah postačující. Laser, jehož optická frekvence byla svázána s jedním z rezonančních maxim rezonátoru, byl porovnáván s etalonovým laserem stabilizovaným prostřednictvím saturované absorpce v parách jodu. Směšováním optických frekvencí jsme získali radiofrekvenční záznej měřitelný elektronickým čítačem. Schéma uspořádání je na obr. 2.



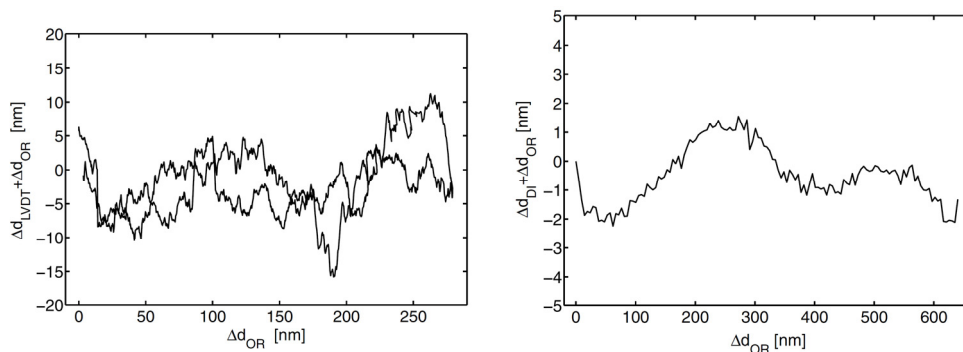
**Obr. 1.** Fotografie optického rezonátoru. ZR: zerodurové rezonátorové tyče, AE: justážní invarové prvky, PZT piezoelektrické měniče pro ladění délky rezonátoru polohou zrcadla diferenčního interferometru, DT výbojová trubice He–Ne laseru, Z: zrcadla rezonátoru.

Jak vyplývá z obrázku 1, posuv jednoho ze zrcadel rezonátoru je porovnáván s interferometerem pro délková měření, tentokrát v diferenčním uspořádání. Při měření velmi malých posuvů s velkým rozlišením je jedním z hlavních limitujících faktorů mechanická tuhost celé sestavy, v tomto případě jsme se snažili těmto problémům vyhnout právě diferenčním měřeními. Interferometr zde kalibrováný je osmiprůchodový (na schématu je naznačeno jen horní

„patro“ svazků. Výsledky měření linearitu v rozsahu pod 1  $\mu\text{m}$  jsou na obrázku 3, jednak ve srovnání s interferometrem, jednak ve verzi pro kalibraci indukčního snímače.



**Obr. 2.** Schéma sestavy pro porovnávací měření malých vzdáleností rezonátorem a víceprůchodovým diferenčním interferometrem. DI: diferenční interferometr, ME: polohovací zrcadlo, OR: rezonátor, FI: optický izolátor, RP: zpožďovací desky, PBS: polarizující dělič, L1, L2: laditelné lasery, NL: normálový laser, D1, D2, APD: fotodetektory, POL: polarizátor, ENL, EL1, EL2: řídicí elektronika laserů, CNT: čítač, EPZT: elektronika ladění rezonátoru.



**Obr. 3.** Záznam linearitu stupnice polohového senzoru LVDT měřený rezonátorem v závislosti na výchylce senzoru (vlevo); měření linearitu diferenčního interferometru rezonátorovou metodou, zde považovanou za referenční.

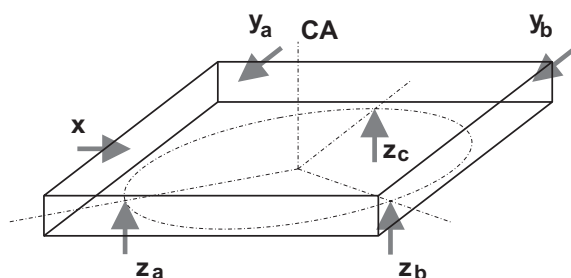
Velmi malý rozsah měření diskvalifikuje tuto metodu pro reálné odměřování vzdáleností, byť by šlo o odměřování pro nanometrologii. Laser s větším rozsahem ladění by přinesl jen malé rozšíření rozsahu, neboť větší rozdíl v optických kmitočtech referenčního a laditelného laseru by byl již mimo rozsah frekvencí zpracovatelných fotodetektorem a elektronikou. V nedávné době byl metrologickými laboratořemi řešen mezinárodní projekt „Nanotracer“, kde jednotlivé skupiny navrhovaly interferometrické systémy s velkým rozlišením a tyto pak byly porovnávány s etalonovým „superinterferometrem“. Tím byl systém využívající rentgenové záření, nejednalo se zde však o interferenci světla v pravém smyslu, ale o moiré efekt mřížek. Tyto mřížky byly krystalovými mřížkami monokrystalů křemíku. Rozsah měření tohoto unikátního zařízení byl ovšem ještě menší a jeho reálné použití v nanometrologii praxi ještě vzdálenější. Ostatní navrhovaná řešení byla variacemi na víceméně tradiční interferometrii. Převod délky na kmitočet byl opět jedním z nejpřesnějších řešení.

## Měřicí systém pro nanometrologii

Naše účast ve vývoji systémů pro nanometrologii byla iniciována účastí v projektu podpořeného v rámci výzvy „Nanotechnologie pro společnost“, jejímž poskytovatelem byla Akademie věd ČR. Na projektu jsme spolupracovali s Českým metrologickým ústavem (ČMI) v Brně a Masarykovou univerzitou. Jedním z cílů projektu bylo vytvořit národní nanometrologický etalon, který by sloužil metrologické praxi v nově založeném Oddělení nanometrologie v ČMI. Řešení, ke kterému mělo snažení směřovat, byla kombinace mikroskopu atomárních sil s interferometrickým odměřováním. Opět, toto úsilí bylo zasazeno do širšího mezinárodního kontextu. Obdobná zařízení vznikají v metrologických laboratořích světa. Jednotliví řešitelé navrhuji různá řešení, prezentují je v odborném tisku a referují o nich na konferencích, čímž se konstituují základní konstrukční principy, které budou tvořit základ nanometrologie. K tomuto úsilí jsme s naší konstrukcí také přispěli.

Volba kombinace odměřovacího systému a sondového mikroskopu je obvyklou volbou. Představuje ve srovnání s elektronovým mikroskopem instrumentálně jednodušší a levnější řešení. Vzorek nanostruktury může být měřen na vzduchu, vakuum není nutné a rozlišení je až na atomární úrovni. Sondové mikroskopy určené k zobrazování topografie povrchu mají vlastní polohovací systém sondy (hrotu) prostřednictvím piezoelementů, který pokrývá rozsah typicky několika  $\mu\text{m}$ . To, co stačí pro zobrazování je ale nepoužitelné pro měření. Sondový mikroskop s odměřováním polohy sondy je konstruován inverzně s pevným hrotem a polohovatelným vzorkem. Polohu vzorku je možné měřit interferometricky. Zásady interferometrického měření aplikované pro souřadnicové odměřování polohy vzorku vůči sondě kladou nároky zvláště na eliminaci Abbého chyby, tj. různosti os měření a posuvu. Zachování Abbého principu vyžaduje přesné sesouhlasení průsečíku měřicích os v bodě hrotu. Dále zachování ortogonality souřadnic vyžaduje měření, lépe regulaci úhlů souřadnicového stolu, tedy měření ve více, než základních třech osách.

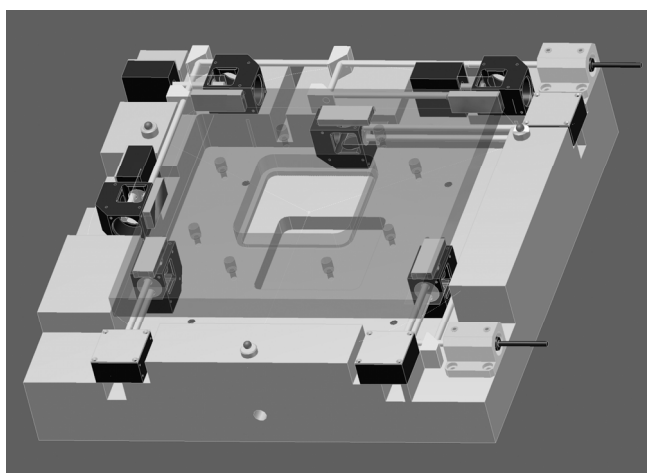
Náš konstrukční návrh předpokládá měření ve všech šesti stupních volnosti šestiosým interferometrem [2, 4]. Měření úhlových odchylek více samostatnými interferometry představuje nejpřesnější možné vyhodnocení úhlů díky velké bázi ve srovnání např. s autokolimátory, nebo interferometry kombinujícími měření délky a úhlu. Schéma uspořádání měřicích os našeho systému je na obrázku 4.



**Obr. 4.** Geometrie interferometrického souřadnicového odměřování polohy stolu, CA: osa hrotu mikroskopu s lokální sondou.

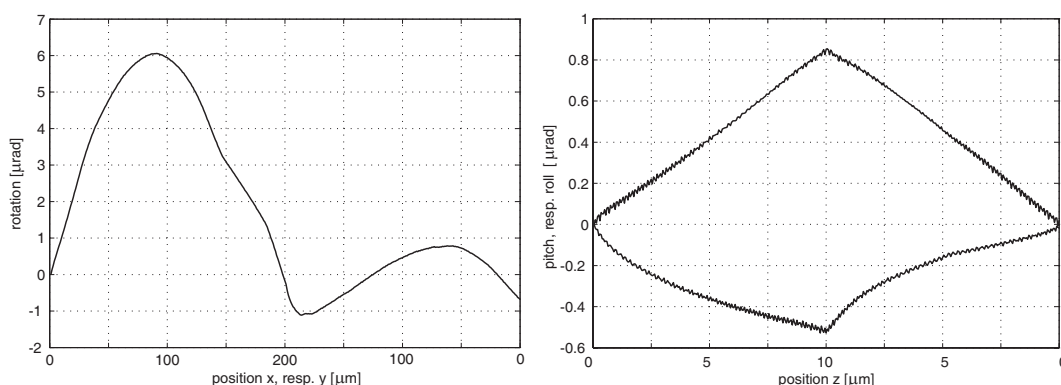
Polohovací systém pro nanopolohování stolu se vzorkem sám o sobě představuje mimořádnou technickou výzvu. Postupem času se proto konstituovaly dva konstrukční přístupy, nazývané „small range“ a „long range“. Základem systému malého rozsahu je mechanismus zavěšený na pružných čepích a vychylovaný piezoelementy, obvykle vícevrstevných pro zvýšení rozsahu, nebo navíc přepákových. V tomto případě je polohování dané jediným rozsahem vysokonapěťových zesilovačů a jsou zde přítomna všechna omezení známá z elektroniky, tj. dynamický rozsah limitovaný šumem. Pružné zavěšení je však jediným řešením eliminujícím mechanické vůle, mrtvý chod a hystereze do té míry, že polohování na nanometrové úrovni, nebo

i pod ní je možné. Systémy malého rozsahu jsou řešením pro nejvyšší metrologické nároky za cenu omezeného rozsahu, který se pohybuje typicky na úrovni desetin mm. Long range představuje v nanometrologii obvykle milimetry, nanejvýš několik málo cm. Zde dominuje problém mechanických vedení a dosažení rozlišení blízké nanometrové úrovni je možné jen za cenu extrémních nároků na přesnost výroby. Ukázkou takového řešení je systém firmy SIOS navázané na výzkum a vývoj realizovaný Technickou univerzitou v Ilmenau v Německu. My jsme volili systém malého rozsahu s polohovacím systémem od fy. Physik Instrumente s rozsahem 200 x 200 x 10  $\mu\text{m}$ . Náčrt první verze našeho odměřovacího systému je na obrázku 5.



**Obr. 5.** Návrh interferometrické sestavy pro odměřování polohy nanopolohovacího stolku.

Rozlišení v měření úhlových chyb polohovacího mechanismu je demonstrováno na obrázku 6. Jedná se o natočení vůči vertikální ose při posuvu diagonálně z jedné krajní polohy do druhé a natočení vůči horizontálním osám při tomtéž pohybu. Vyplyvá z toho, že s použitím interferometrického měření úhlů samostatnými interferometry s velkou bází je dosažitelné rozlišení na úrovni desítek nanoradiánů. Vzhledem k většímu rozsahu polohování v horizontální rovině je také maximální úhlová odchylka vzhledem k vertikální ose výrazně větší, téměř 10 mikroradiánů.

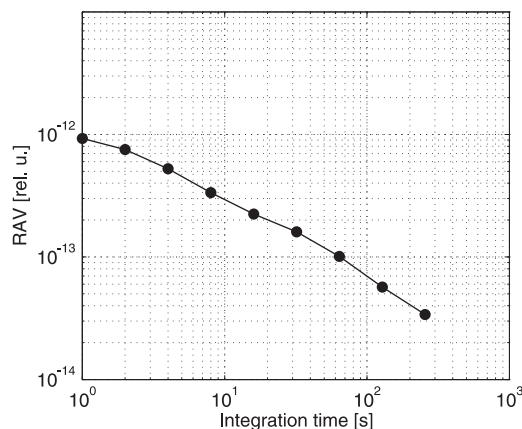


**Obr. 6.** Záznam úhlových odchylek. Rotace stolku v horizontální rovině při posuvu o celý rozsah (vlevo), úhlové odchylky „pitch“ a „roll“ při zdvihu stolku v ose z.

## Laserové zdroje záření

Základní požadavky na zdroj záření pro inkrementální interferometrii délky jsou koherenční délka a jednofrekvenční provoz (případně dvoufrekvencní s přiměřeným rozdílem optických frekvencí). V případě systémů pro primární metrologii přibývá ještě otázka návaznosti na základní etalon (tzv. traceability). Metrologie délky je, jak bylo naznačeno výše, ve skutečnosti metrologií optických frekvencí a je tedy v případě laserového zdroje nutné zajistit vazbu na některou z realizací vysoce stabilního laserového oscilátoru. V doporučeních komise CCDM je uveden seznam přechodů v absorpčních médiích vhodných pro stabilizaci laseru s uvedením absolutní hodnoty optického kmitočtu a dosažitelné nejistoty. Konstrukce laseru stabilizovaného prostřednictvím spektroskopie daného přechodu, za předpokladu splnění uvedených podmínek, je tedy základním etalonem. Základní etalon délky není jen jeden, vyjmenované přechody odpovídají vlnovým délkám řady laserů a umožňují realizovat základní etalon na vlnových délkách od infračervené oblasti až do ultrafialové.

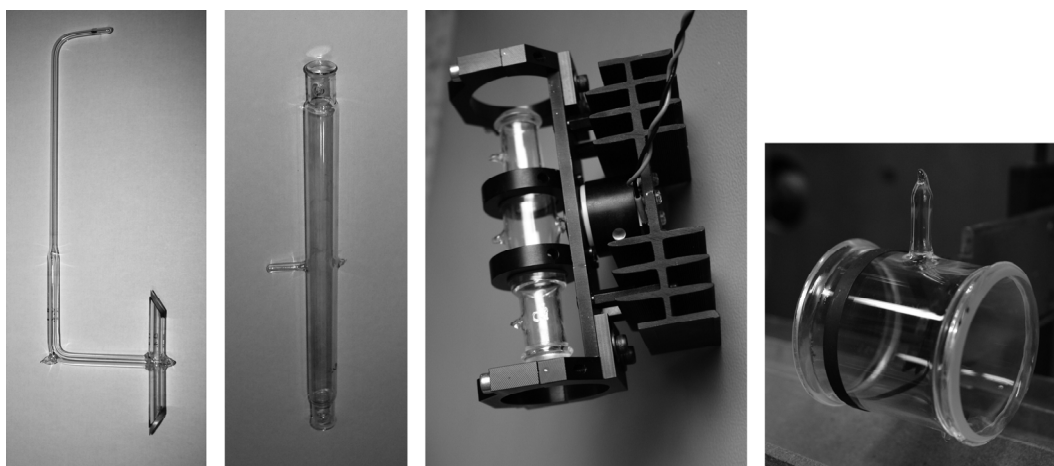
Limity dosažitelné „přesnosti“ je možné interpretovat jednak, jakožto nejistotu absolutní hodnoty optického kmitočtu a jednak jako relativní stabilitu laseru. Dosažitelné hodnoty jsou ovlivněny jak vlastním laserem, především jeho primární stabilitou a frekvenčním šumem, tak vlastnostmi přechodu, jeho šířkou čáry a poměrem signál/šum při detekci některou spektroskopickou technikou. Maximum možného bylo v současné době tradiční spektroskopii dosaženo frekvenčně zdvojnásobeným Nd:YAG laserem a detekcí hyperjemných komponent rotačně-vibračního rozštěpení přechodů v plynném molekulárním jodu. Relativní stabilita takového stabilizovaného laseru se blíží hodnotě  $10^{-14}$ , přičemž nejistota (reprodukovatelnost) absolutní hodnoty optického kmitočtu se pohybuje na úrovni 1 kHz [3]. Těchto parametrů bylo dosaženo kombinací nízkého šumu Nd:YAG laserů a dobrého poměru signál/šum při detekci absorpčních čar v jodu, které jsou v koincidenci s vlnovou délkou laseru. Relativní stabilita se tradičně měří porovnáváním dvou laserů (měřením radiofrekvenčního záznejového kmitočtu) a vyjádřením jeho variací prostřednictvím statistiky tzv. Alanových variací v závislosti na integrační době. Ukázka Alanových variací při porovnávání dvou stabilizovaných Nd:YAG laserů v naší laboratoři je na obr. 7.



**Obr. 7.** Záznam Allanových variací záznejové rozdílové frekvence dvou Nd:YAG laserů stabilizovaných prostřednictvím spektroskopie v parách jodu.

Pomineme-li vlastní technické řešení a nedostatky, které mohou nastat při návrhu detekčního řetězce a vlastní stabilizace, je klíčovým faktorem ovlivňujícím vlastnosti laseru kyveta s absorpčním prostředím. Jsou-li vlivem nečistot, nebo z jiných technologických důvodů absorpční čára média zatížena frekvenčním offsetem, nebo rozšířením, projeví se samozřejmě na vlastnostech laseru, protože kyveta představuje referenci optické frekvence.

Naše pracoviště se tradičně věnovalo stabilizaci optické frekvence laserů, v historické době He-Ne laserů pracujících na vlnové délce 633 nm, které byly prvními etalony délky na bázi laseru. Zde byla absorpční kyveta součástí rezonátoru a tím nároky kladené na vlastní technické provedení značně vysoké z důvodu kritických ztrát v rezonátoru. V naší skupině byla vyvinuta technologie výroby a plnění absorpčních kyvet, zpočátku pouze jodových. Hlavním dodavatelem absorpčních kyvet pro metrologické účely bylo tradičně pracoviště BIPM (Bureau International des Poids et Mesures) v Sevres u Paříže s puncem nejvyšší nadnárodní metrologické autority. Z důvodu redukce rozpočtu BIPM a jeho konverze na především administrativní funkci byla technologie kyvet zde opuštěna a naše pracoviště se stalo prakticky monopolním výrobcem kyvet pro spektroskopii a stabilizaci laserů, přičemž si v oboru vydobylo velké renomé. Bez nadsázky lze říci, že světová metrologie délky (optických frekvencí) závisí na frekvenčních referencích našich absorpčních kyvet (obr. 8).

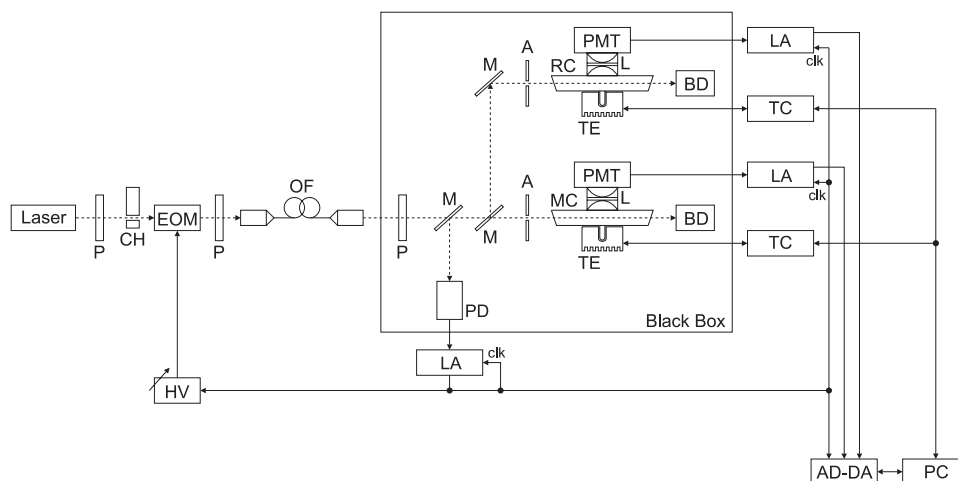


**Obr. 8.** Fotografie absorpčních kyvet pro stabilizaci frekvence laserů.

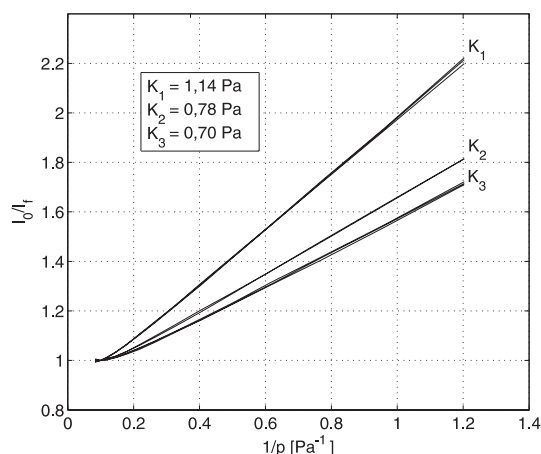
Dalšímu vývoji a zdokonalování technologie jsme se věnovali v rámci projektu GAAV, zaměřenému na dosažitelné limity reprodukovatelnosti optické frekvence. Navázali jsme na metodologii navrženou v BIPM pro evaluaci kvality absorpčních kyvet založenou na výpočtu Stern-Volmerova koeficientu. Při přípravě absorpčních médií byla hledána technicky snadno realizovatelná metoda měření kyvet, která by nevyžadovala náročné měření absolutní frekvence středů absorpčních čar. Vyhodnocení Stern-Volmerova koeficientu je odvozeno od skutečnosti, že nečistoty v absorpčním prostředí způsobují srážkové nezářivé přechody z excitované, horní hladiny přechodu do základního stavu. Měřením míry indukované fluorescence je tedy možné identifikovat přítomnost nečistot v kyvetě. Náš výzkum byl zaměřen na zvýšení citlivosti metody měření fluorescence a vyhodnocení Stern-Volmerova koeficientu na úroveň nutnou pro hraniční přesnosti a stability, kterým vyhovuje naše současná technologie absorpčních kyvet. Řešení naší sestavy pro měření míry indukované fluorescence je na obr. 9. Pro excitaci je volen argon-iontový laser, neboť je jedna z jeho volitelných pracovních vlnových délek v koincidenci s absorpční čarou v jodu vykazující nejdelší střední dobu života na horní, excitované hladině. Nectnosti laseru, jako je vysoký šum a modová nestabilita byly kompenzovány stabilizací výkonu laseru metodou známou, jako „noise-eater“ a spektrální fluktuace měřením referenční fluorescence na pomocné kyvetě.

Výsledek měření úrovně indukované fluorescence je vyhodnocován Stern-Volmerovou metodou, hodnoty fluorescence jsou normalizovány vyjádřením závislosti na tlaku nasycených par a jednočíslný koeficient popisující kyvetu je de facto strmostí této závislosti. Ukázky diagramů jsou na obrázku 10. Výsledek vývoje technologie plnění kyvet je jednak ve vztahu hodnot Stern-Volmerových koeficientů a absolutních frekvenčních offsetů, které jsme ověřili srovnávacími měřeními a jednak v zjištění, že limit absolutní přesnosti na úrovni 1 kHz je dosažitelný.

Reprodukovatelnost hodnot získaných měření fluorescence na našich kyvetách rutinně vyráběných v naší laboratoři se pohybuje na limitu citlivosti metody.

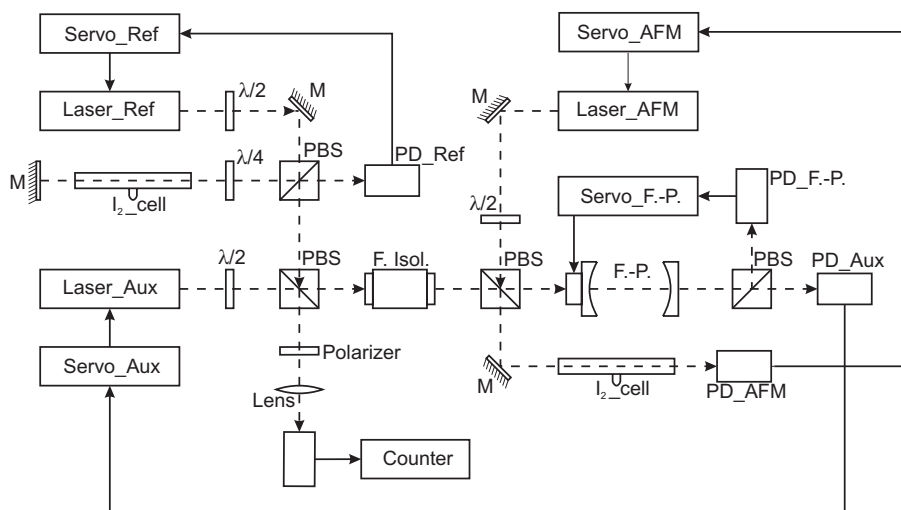


**Obr. 9.** Sestava pro měření úrovně indukované fluorescence v parách jodu. P: polarizátor, CH: přerušovač svazku, EOM: elektrooptický modulátor, OF: optické vlákno, PD: fotodetektor, M: zrcadla, RC: referenční kyveta, MC: měřená kyveta, A: clona, L: objektiv, PMT: fotonásobič, BD: bezodrazová uzávěrka svazku, TE: Peltierův chladič, LA: lock-in zesilovač, TC: teplotní regulátor, AD-DA: karta pro akvizici signálů, HV: vysokonapěťový zesilovač.



**Obr. 10.** Diagramy pro stanovení Stern–Volmerových koeficientů a jejich hodnoty tří měření na jediné testovací kyvetě opakovaně plněné jedinou, dvojitou a trojitou destilací jodu.

Řešením vlastního laserového zdroje pro nanometrologii se v rámci našeho konceptu jevil jako nejvhodnější Nd:YAG laser, a to nejen pro dobrou výchozí stabilitu a velmi nízký šum, ale také pro značný výkon. Tradiční jednofrekvenční He-Ne lasery, zdroj záření všech komerčně dostupných interferometrů nabízí nanejvýš 1 mW optického výkonu. S ohledem na nutnost optovláknového rozvodu světla a související ztráty při navázání do vlákna a ve vazebních členech by napájení šesti os nebylo možné. Vlastní stabilizaci jsme navrhli v režimu detekce Dopplerovsky rozšířených čar, čímž je dosažitelná stabilita na úrovni  $10^{-8}$ . S ohledem na omezený rozsah měřené délky a vliv fluktuací indexu lomu vzduchu se jedná o postačující hodnotu. Návaznost na základní etalon je řešena vazbou na Dopplerovsky rozšířenou čáru, jejíž součástí je referenční hyperjemná komponenta. Na obrázku 11 je znázorněno schéma stabilizace včetně porovnávání s referenčním etalonem optické frekvence.



**Obr. 11.** Experimentální sestava pro měření stability Nd:YAG laseru pro interferometrické souřadnicové odměřování srovnáním s normálovým laserem. Laser\_Ref+Servo\_Ref: laser a elektronika referenčního laseru, Laser\_Aux+Servo\_Aux: laser a elektronika pomocného laseru, Laser\_AFM a Servo\_AFM: laser a elektronika měřeného laseru, PBS: polarizující dělič, M: zrcadla, F.Isol.: optický izolátor, PD: fotodetektor, F.-P.: Fabry-Perotův rezonátor, I<sub>2</sub>\_cells: jodové absorpční kvety.

## Optické syntezátory v metrologii

Zásadní změny v metrologii délk/optických frekvencí přišly s možností syntézy optických frekvencí prostřednictvím pulzních femtosekundových laserů pracujících v režimu synchronizace modů. Generace velmi krátkých světelných pulzů byla umožněna velkým spektrálním rozsahem zesílení aktivního média, především Ti:Sa krystalu, ač první experimenty tohoto typu byly provedeny už s barvivovými lasery. Velmi krátké pulzy mají velkou šířku spektra, zvláště femtosekundové pulzy, kde je v obálce jednoho pulzu jen pár zámků elektromagnetického pole. Jsou-li pulzy generovány periodicky, je jejich spektrální reprezentací hřeben optických frekvencí. Na pulzní laser se synchronizací modů je možné také pohlížet jako na laser pracující současně na řadě optických frekvencí, které díky synchronizaci vykazují jen velmi krátkou oblast konstruktivní interference, kterou je právě krátký pulz. Tato řada pracovních optických frekvencí vykazuje periodicitu danou opakovací (mezimodovou) frekvencí laseru.

V metrologii má klíčový význam skutečnost, že (radiofrekvenční) opakovací frekvence je v celočíselném násobku obsažena v každé spektrální komponentě optického hřebene. Důsledkem je přenos relativní stability opakovací frekvence do syntetizovaných optických frekvencí. Vazbou opakovací frekvence na etalon času – radiofrekvenčního kmitočtu je možné prostřednictvím optického syntezátoru získat řadu ekvidistantně vzdálených optických frekvencí se zachováním relativní stability časového normálu. Tímto normálem jsou v současné době cesiové hodiny, radiofrekvenční oscilátor stabilizovaný spektroskopii atomů cesia v tzv. cesiové fontáně. Jeho dlouhodobá relativní stabilita se pohybuje na úrovni  $10^{-15}$ , což předčí současné optické standardy.

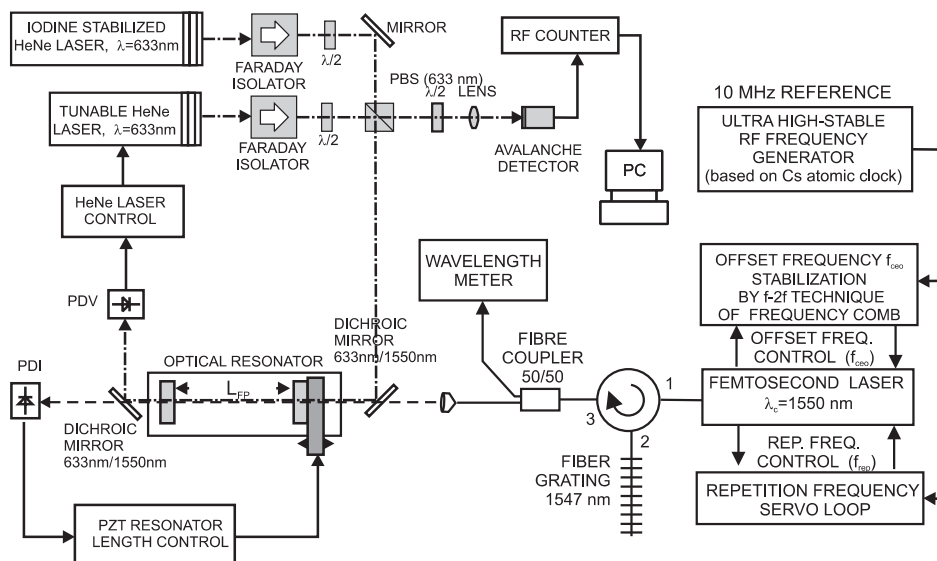
Zajištění plné synchronizace optického syntezátoru vyžaduje ještě řadu dalších dílčích opatření, zvláště regulace tzv. offsetové frekvence, která se aditivně přičítá ke všem optickým frekvencím. Je důsledkem disperze rezonátoru femtosekundového laseru, rozdílné grupové a fázové rychlosti. Její měření vyžaduje rozšířit hřeben optických frekvencí na celou jednu oktávu, čehož se dosahuje nelineárními optickými prvky (nejčastěji fotonickými vlákny), na nichž se jednotlivé frekvence hřebene dále směšují a vytvářejí řadu dalších součtových a rozdílových frekvencí.



Odečtením zdvojnásobené frekvence z červeného konce a oktávové frekvence modrého konce lze offsetový kmitočet separovat a následně jej synchronizovat také s radiofrekvenčním etalonem.

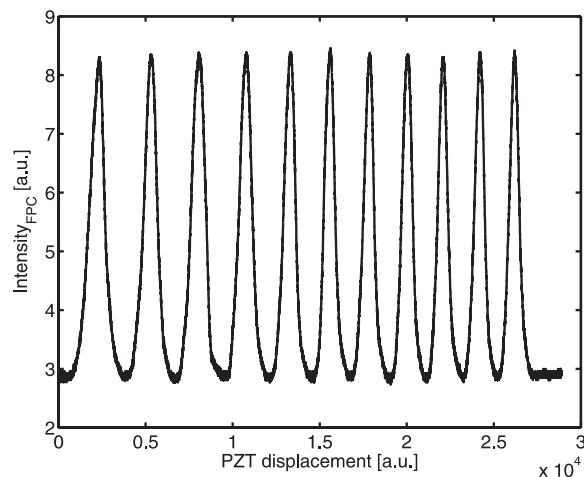
Transformace přesnosti (stability) optické frekvence z radiofrekvenční oblasti do optické je možná samozřejmě i opačným směrem. Vývoj na poli vysoce stabilních laserů, zvláště stabilizovaných prostřednictvím spektroskopie jednotlivých atomů (iontů) chycených v elektromagnetických, nebo optických pastech a shlazených na teploty blízké absolutní nule slibuje dosáhnout relativní stability blízké hodnotě  $10^{-18}$ , nebo i lepších. Takový etalon optické frekvence spolu s frekvenční konverzí do radiofrekvenční oblasti by se stal skutečnými optickými hodinami.

Cesta od synchronizovaného (stabilizovaného) optického syntezátoru k reálnému měření délek je ovšem zatím poměrně dlouhá. Hřeben optických frekvencí slouží pro kalibraci základních etalonů délky, jednotlivých stabilizovaných laserů, které zase slouží pro kalibraci laserů pro interferometrii, eventuálně jsou přímo zdroji záření pro interferometrická měření. Naše snažení na poli nanometrologie zahrnovalo také výzkum metodiky měření délek s přímou vazbou na vysoce přesný syntezátor optických frekvencí. Spojili jsme zde naše poznatky z konverze délky na optický kmitočet prostřednictvím rezonátorových metod s technologií optické kmitočtové syntézy [5]. Separovat jednotlivé optické frekvenční komponenty a využít je jako koherentní laserové svazky pro interferometrická měření ale nelze, mezimodová frekvence na úrovni stovek MHz neumožňuje sousední optické frekvence filtrovat žádným optickým filtrem. Techniky založené na vazbě mechanické délky rezonátoru a optického kmitočtu nabízejí spojit vlastnosti optického spektrálního filtru – Fabry-Perotova interferometru s měřením polohy. Klíčová je samozřejmě redukce počtu komponent optického hřebene na několik málo prvků, aby nemohlo v rezonátoru dojít k jejich přeložení. Toho se nám podařilo dosáhnout optickými filtry na bázi Braggových vláknových mřížek v reflexním modu. Schéma uspořádání je na obrázku 12.



**Obr. 12.** Schéma optické a elektronické sestavy pro měření stability délky rezonátoru vázaného na vybranou komponentu optického hřebene. PD1, PD2, PD-OR: fotodetektory,  $\lambda/2$ : zpožďovací desky, L1 a L2: He-Ne lasery pro hrubé měření opakovací frekvence rezonátoru, OR: optický rezonátor.

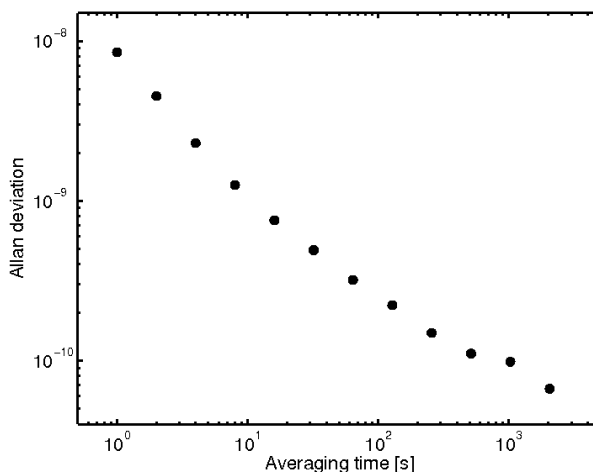
Fabry-Perotův interferometr s délkovým a tudíž frekvenčním rozmítáním může být používán v režimu optického spektrálního analyzátoru. Spektrum selektovaných optických komponent hřebene po filtraci vláknovou mřížkou je na obrázku 13. Je zřejmé, že nedochází k efektu přeložení a jednotlivé optické komponenty mohou být využity ke stabilizaci délky rezonátoru na optickou frekvenci některé z nich.



**Obr. 13.** Spektrální záznam jednotlivých komponent femtosekundového laseru preselektovaných mřížkou, měřený skenováním Fabry-Perotovým rezonátorem v rozmezí plného rozsahu 506.4~MHz FSR.

Prezentovaný a experimentálně ověřený koncept transferu relativní stability (přesnosti) z radiofrekvenčního etalonu – cesiových hodin prostřednictvím optické frekvenční syntézy na přesné diskrétní vzdálenosti představuje nový koncept. Vlastní realizace v našem laboratorním uspořádání zahrnovala vazbu na cesiové hodiny stacionárním přijímačem signálů družic GPS, které mají na svých palubách rubidiové hodiny synchronizované s pozemními cesiovými. Krátkodobá stabilita našeho přijímače je zajištěna vysoce stabilním krystalovým oscilátorem, přičemž vazba na cesiový etalon kompenzuje drift.

Realizace vlastního rezonátoru byla náročným technologickým úkolem, kdy jeho těleso muselo být vyrobeno z materiálu s minimální teplotní roztažností, jakým je keramika Zerodur. Vše muselo být umístěno do vakuového prostředí, neboť vliv indexu lomu vzduchu představuje zdroj nejistoty interferometrického měření převyšující hodnoty dosažitelné stability optických frekvenčních etalonů o několik řádů. Porovnání měření stability rezonátoru vázaného na hřeben optických frekvencí a jeho délky monitorované pomocným He-Ne laserem a jeho srovnáváním s jodem stabilizovaným normálovým He-Ne laserem je na obrázku 14.

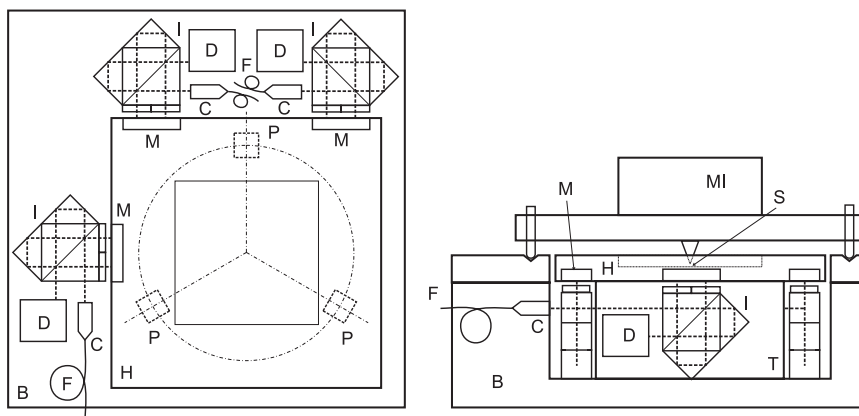


**Obr. 14.** Allanovy variance He-Ne laseru sledujícího fluktuace a drift délky Fabry-Perotova rezonátoru stabilizovaného na vybranou komponentu optického femtosekundového laseru srovnáváním s He-Ne-I<sub>2</sub> normálem.

## Další vývoj měřicího systému pro nanometrologii

Polohovací a odměřovací systém pro nanometrologii, navržený jako „short-range“ pro mikroskop atomárních sil, který jsme prezentovali v [6] byl fakticky zkušebním zařízením, na kterém jsme ověřili, jak se polohovací systém chová, jaké vlastnosti mají interferometry, laserový zdroj a řídicí elektronika. Vlastní rám byl pro jednoduchost výroby frézován na CNC stroji z hliníkové slitiny. Jako největší problém se ukázala justáž interferometrů. Rozvod záření ze dvou vláknových kolimátorů do soustavy horizontálních, resp. vertikálních interferometrů se ukázal jako velmi nepraktický. Řada nastavitelných zrcadel rozvádějících laserové svazky způsobila, že nastavování jednotlivých interferometrů nebylo zdaleka bez interakce. Dosažení co nejlepší ortogonalitě odměřovacích os a redukci kosinových chyb se stalo téměř nemožným. Nejistoty způsobené geometrickými úhlovými chybami pod 1 nm vyžadovaly nastavení měřicích svazků s přesností několika úhlových vteřin.

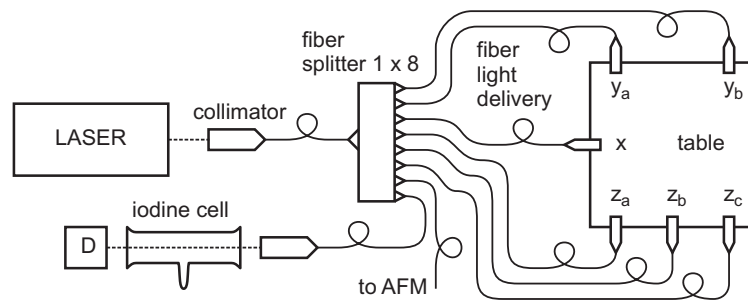
Odpovědí na tyto problémy bylo nevyhnutelně plně optovláknové řešení rozvodu laserového záření (obr. 15). Na první pohled jednoduché řešení ale bylo po technické stránce obtížně realizovatelné. Interferometry pracují s lineárně polarizovaným světlem a dělení na měřicí a referenční trasu je také polarizační. Homodynní detekční systém taktéž vyžaduje lineárně polarizované svazky s navzájem kolmými rovinami polarizace z referenční a měřicí větve. Optická vlákna zachovávající polarizaci ovšem vykazují nemalý polarizační drift vlivem teploty a mechanického namáhání. Nezbylo, než vyzkoušet řadu typů optických polarizací zachovávajících vláken pro viditelné světlo od různých výrobců, než jsme našli jakž takž vyhovující. Polarizaci zachovávající jednomodový dělič 1 ku 8 pro viditelné světlo byl speciálním a na zakázku vyrobeným komponentem (obr. 16).



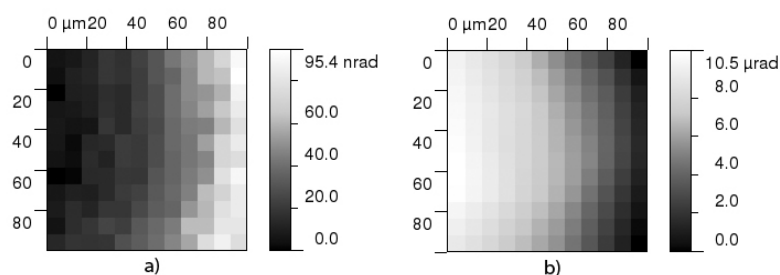
**Obr. 15.** Horní a boční pohled na interferometrický systém pro souřadnicové odměřování B: základová deska, MI: mikroskop, S: vzorek, F: optická vlákna, C: kolimátory, H: držák vzorku, T: polohovací stolek, I: interferometr, D: homodynní detekční jednotka, M: zrcadlo, P: piezoelektrické měniče pro osu z.

Dalším cílem našeho konceptu polohování a měření bylo nejen měření úhlových odchylek stolku se vzorkem během polohování, ale také aktivní zpětnovazební řízení ve všech šesti stupních volnosti. Měřením velikosti úhlových chyb při posuvu stanovilo, v jakém rozsahu se budou muset pohybovat akční členy, které tyto chyby eliminují. Zbývající tři stupně volnosti, které jsme doposud neměli aktivně pod kontrolou, byly tedy tři úhlová natočení, v angličtině označovaná jako „roll, pitch & yaw“. Řešením bylo použití tří kombinovaných piezoelementů typu x-z, kombinujících vertikální zdvih a horizontální posuv ve střižném režimu. Jejich uspořádání do kruhu, jak je naznačeno na obr. 14 umožňuje naklápění podle horizontálních os vertikálním zdvihem a rotaci

celého stolku podle vertikální osy díky tečnému horizontálnímu posuvu stolku. Na obrázku 17 je naznačena velikost úhlových chyb v režimu zpětnovazebního řízení a bez něj.



**Obr. 16.** Uspořádání pro stabilizaci laseru prostřednictvím lineární absorpce v jodu a optovláknový rozvod světla pro 6 měřicích os interferometrů.



**Obr. 17.** Měření rotace stolku s aktivní zpětnovazební kompenzací (a) a bez kompenzace (b) pro horizontální rovinu xy ( $z = 10 \mu\text{m}$ ) vůči vertikální ose.

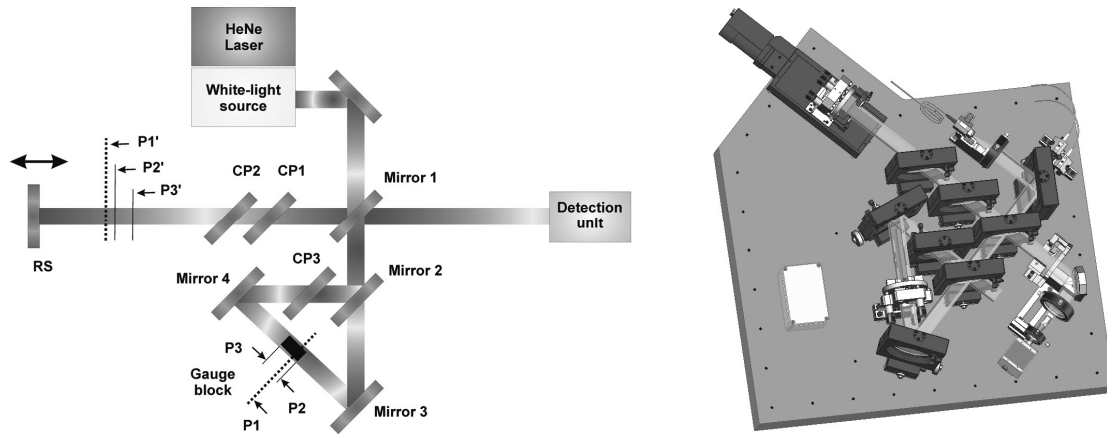
Ověření těchto principů proběhlo opět na experimentální verzi systému, druhém v pořadí. Rám byl pro jednoduchost obrábění vyroben opět z hliníkové slitiny, takže dlouhodobou stabilitu metrologické úrovně od něj nebylo možné očekávat.

## Nekoherentní interferometrie pro kalibraci koncových měrek

Jednou z kapitol optické metrologie geometrických veličin, která s tématem souvisí je i využití principů nekoherentní interferometrie pro kalibrace koncových měrek. Koncové měrky představují nejvyšší stupeň mechanických etalonů délky, zatímco primární metrologie délky je doménou stabilizovaných laserů a interferometrických metod. Kalibrace koncových měrek je v metrologii klíčový problém, protože je oním mezičlánkem, kde se optické metody stýkají s „železem“ mechanických měřidel. Řešení kalibrátorů měrek je veliké téma, řešené téměř výhradně na půdě metrologických institucí. Kalibrace měrek je tím, čím laboratoř primární metrologie komunikuje se zbytkem technického a průmyslového světa.

Tradiční laserová interferometrie je, jak bylo zmíněno, inkrementální, měří fakticky posuv (displacement), nikoli délku. Jak s takovým nástrojem měřit délku kostky – koncové měrky? Řešením je svázat posuvný prvek interferometru se sondou, např. mechanickou a tou kontaktně detekovat začátek a konec měrky. Pro měření na nanometrové úrovni něco takového ale nepřipadá v úvahu. Nabízí se nahradit sondu opět světlem. Michelsonův interferometr s bílým, nekoherentním zdrojem vykazuje detekovatelnou interferenci jen v malém okolí přesné rovnosti délky ramen. Může sloužit, jako nástroj identifikující přední plochu měrky (optickou náhradu mechanické sondy) a zadní plochu opřenu o referenční zrcadlo. Posuv referenční větve nekoherentního interferometru lze inkrementálně odměřit laserovou interferometrií. Tradiční uspořádání se ale neobejde bez referenční plochy, na kterou se měrka musí navázat. Tím se opotřebovává a zkracuje její životnost.

Unikátní řešení, které je základem našeho návrhu představuje obousměrný interferometr s bílým světlem, který nahrazuje referenční plochu drahou svazku v okolí měrky. Okamžiky interference bílého světla jsou tedy tři, při koincidenci délky posuvného ramene s odrazem od přední strany měrky, od zadní strany měrky a při identitě s délkou svazku kolem měrky. Měření je tedy absolutní, s přímou návazností na základní etalon délky (stabilizovaný He-Ne laser). Schéma finální sestavy kombinující koherentní a nekoherentní interferometrii je na obr. 18.



**Obr. 18.** Schematické znázornění měřící sestavy pro kalibraci koncových měrek. CP1, CP2 a CP3 jsou kompenzační desky, Mirror 1 a 2 jsou děliče svazku, Mirror 3 a 4 pak zrcadla, RS je referenční povrch,  $\lambda/4$  je zpožďovací deska.

Dílčí problémy související s volbou zdroje širokospektrálního bílého světla a s vyhodnocením středu (těžiště) interferogramu jsou popsány v [7]. Pochopitelně se nabízí použití dnes již běžné, bílé, vysoce svítivé LED diody, jejichž spektrálními charakteristikami se článek také zabývá. Nakonec je ale v sestavě použit pulzní pikosekundový laser, generující širokospektrální bílé kontinuum a to především z důvodu prostorových optických vlastností svazku vystupujícího z jednomodového optického vlákna a tím dramaticky lepšího kontrastu interferenčního signálu.



**Obr. 19.** Automatický systém pro bezkontaktní kalibraci koncových měrek.

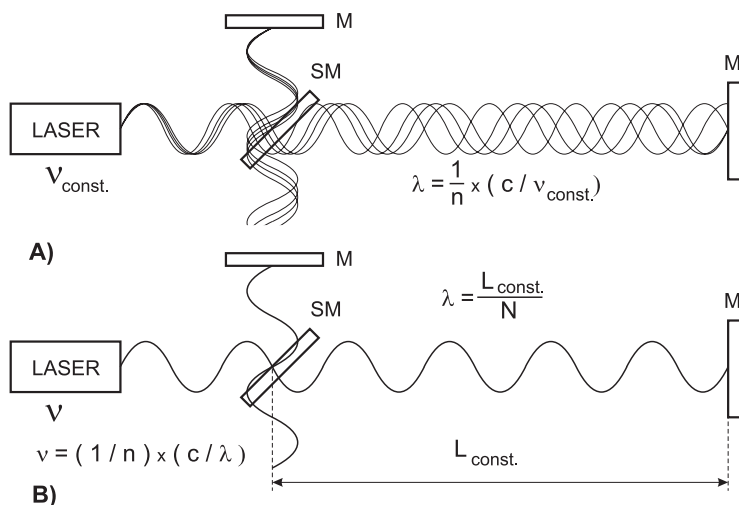
Výsledkem úsilí na poli nekoherentní interferometrie je nyní systém pro automatickou, zcela bezkontaktní kalibraci koncových měrek. Systém vznikl na základě spolupráce našeho pracoviště s firmou Mesing, za podpory projektu aplikovaného výzkumu Ministerstva obchodu a průmyslu (obr. 19).

Bezkontaktní měření a kalibrace koncových měrek je natolik novým a převratným principem, že vybočuje z ustanovení současné normy. Ta předpokládá použití referenční plochy, řešení, které bylo doposud jediné možné. Bez nadsázky lze říci, že ve svém oboru představuje cosi, jako „paradigm shift“. V metrologickém světě se musí teprve prosadit a lze doufat, že bude motivací ke změně normy a zavedených metrologických postupů. Bude-li situace příznivá, snad i komerčního úspěchu.

### Kompensace vlivu fluktuací indexu lomu

V mechanických systémech nanopolohování a odměřování pro nanometrologii mohou být klíčové problémy identifikovány jako vůle ve vedeních, dynamický rozsah akčních členů, mechanická stabilita včetně citlivosti na teplotní změny a celková přesnost výroby mechanických komponentů. Interferometrické měření ve větším rozsahu narozdíl od velmi malých rozsahů (ve desetinách mm) je v přesnosti a rozlišení limitováno především vlivem indexu lomu. Jeho fluktuace představují největší zdroj nejistoty měření, zatímco ostatní vlivy mohou být potlačeny snáze. Zahrnují dodržení Abbého principu, otázky rozlišení pod úrovní jednoho interferenčního proužku, kvalitu optických povrchů omezujících deformaci vlnoplochy, linearitu, teplotní dilataci optiky, ap. Jedním z hlavních problémů mechaniky celé sestavy, tak jako i měření je otázka mechanického referencování. Konstrukční návrhy vždy musejí počítat s nějakým referenčním základem, nazývaným v nanometrologii „metrology frame“, k němuž je odměřování vztaženo.

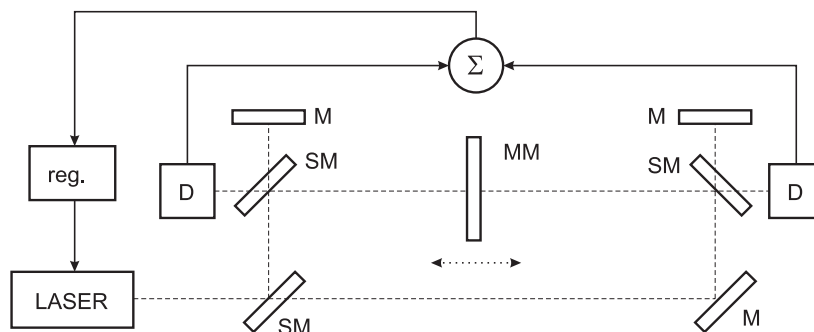
Koncept interferometrického měřicího systému, který jsme navrhli [8, 10], využívá referencování odvozené nikoli od optické frekvence a následně konverze na vlnovou délku prostřednictvím nezávisle vyhodnocované, případně měřené hodnoty indexu lomu vzduchu, ale od vazby vlnové délky na mechanickou referenci (obr. 20). Stabilizace vlnové délky na mechanickou referenci může nahradit stabilizaci optické frekvence. He-Ne laser pro interferometrii stabilizovaný na aktivní čáru neonu má relativní stabilitu na úrovni  $10^{-8}$ . To je úroveň srovnatelná s koeficientem teplotní roztažnosti vysoce stabilních materiálů, jako je Zerodur od fy. Schott, nebo ULE od fy. Corning. V podmínkách fluktuací indexu lomu představuje stabilnější referenci.



**Obr. 20.** Proměnná vlnová délka v interferometru s laserem se stabilizací optického kmitočtu (A) a interferometr se stabilizací vlnové délky (B), M: zrcadlo, SM polopropustné zrcadlo.

Při měření vzdáleností je vždy nutné určit, co je měřeno vůči čemu. Tradiční zdroje chyb a nejistot při interferometrickém odměřování mohou být marginální, je-li mechanická nestabilita v místě referenčního bodu odměřování. Náš koncept kombinuje mechanickou referenci vlastního odměřovacího interferometru s referencí vlnové délky. Mechanická reference je vždy nutná a z principu nevyhnutelná, takže de facto vážeme jeden zdroj nejistoty (fluktuující index lomu) na jiný (mechaniku). Využití sledovacího refraktometru v kombinaci s interferometrickým měřením je tradiční koncept. V našem návrhu tyto dvě zařízení slučujeme do jednoho, přičemž jejich dráhy svazků jsou identické. Toto je hlavní předností konceptu, redukuje se, nebo přímo eliminují zdroje chyb způsobené růzností hodnot indexu lomu měřeného a indexu lomu v měřicí trase interferometru.

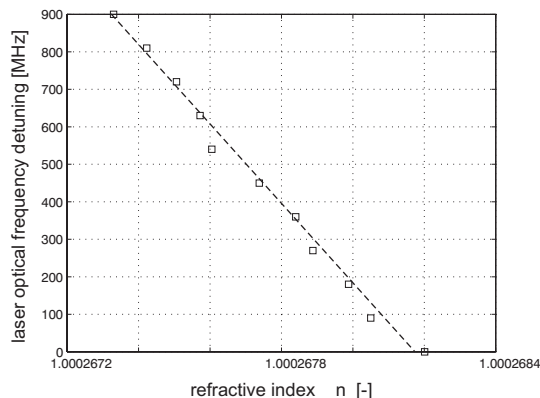
Pro ověření konceptu jsme sestavili odměřovací systém polohy pohyblivého vozíku se dvěma interferometry v protiběžném uspořádání. Toto lze nahlížet, jako přeurčený interferometr, kde poloha vozíku může být měřena vzhledem levé, nebo pravé straně rozsahu. Součástí je pak vazba vlnové délky laserového zdroje na pevnou mechanickou délku, zde součet obou parciálních délek odměřovaných oběma interferometry (obr. 21). Je-li vlnová délka (či průměrná vlnová délka) konstantní v celém měřicím rozsahu a regulační smyčka řízení laseru dostatečně rychlá, systém může adekvátně reagovat na rychlé změny indexu lomu způsobené prouděním vzduchu. To ovšem vyžaduje rychle laditelný jednofrekvenční laser s rozsahem ladění dostatečně velkým, aby pokryl variace indexu lomu způsobené turbulencemi proudění vzduchu. V laboratorních podmínkách postačí ladící rozsah několika GHz optického kmitočtu. V této konfiguraci lze tento měřicí systém vnímat jako interferometr se stojatou vlnou, kde v rámci měřicího rozsahu existuje konstantní „mřížka“ pevných vlnových délek a polohovací systém se pohybuje v jejích krocích.



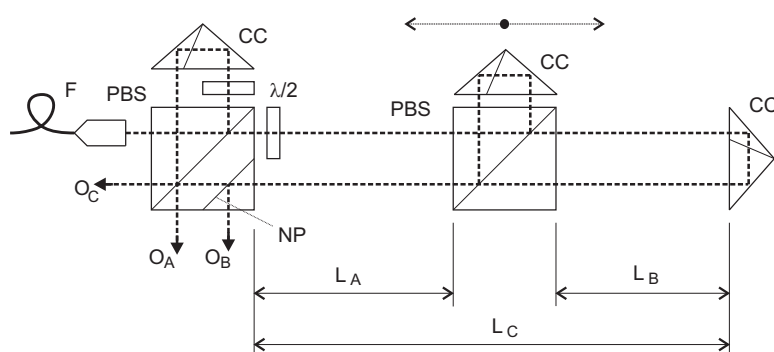
**Obr. 21.** Principiální schéma interferometrického systému se dvěma protiběžnými interferometry a stabilizací vlnové délky, D: detekční jednotka, M: zrcadlo, MM: pohyblivé zrcadlo, SM: polopropustné zrcadlo, reg.: regulátor.

Experimentální ověření principu bylo provedeno v režimu zpětnovazebního řízení optické frekvence laseru na konstantní vlnovou délku mezi oběma interferometry. Relativní drift indexu lomu jsme měřili nezávisle z hodnot teploty, tlaku, vlhkosti a obsahu CO<sub>2</sub> ve vzduchu při pomalém ohřevu termostatické skříně, v níž byl systém umístěn. Tomu odpovídal relativní drift optické frekvence řízeného laseru. Porovnání obou záznamů je na obr. 22.

Pro praktické měření byl ale systém dvou interferometrů s rovinnými zrcadly nepoužitelný pro extrémní úhlovou citlivost. Navrhli jsme tedy řešení se třemi interferometry, kde dva měří v protiběžném uspořádání posuv a třetí s identickou dráhou svazku monitoruje změny optické délky celého měřicího rozsahu (obr. 23). Může tedy pracovat nejen v režimu stabilizace optické frekvence, ale i v režimu sledovacího refraktometru. Kompenzované hodnoty měřeného posuvu lze získat z relativní změny celkové optické délky proporcionálně vztažené k absolutní délce dílčích vzdáleností odměřujících polohu.



**Obr. 22.** Záznam driftu indexu lomu a tomu odpovídající ladění optického kmitočtu laseru vázaného na konstantní součet hodnot obou interferometrů.



**Obr. 23.** Konfigurace s koutovými odražeči měřící přímo celkovou délku a dvě dílčí vzdálenosti, CC: koutový odražeč, PBS: polarizující dělič, NP: nepolarizující dělicí rovina,  $\lambda/2$ : zpožďovací deska, F: optické vlákno, OA, OB, OC výstupy, Lc. La, Lb: dílčí délky určující polohu vozíku.

Třetí koncept vycházející s principu stabilizace vlnové délky lze interpretovat také jako rezonátorový. Vazba mezi vlnovou délkou a mechanickou referencí je v tomto případě jednoduchá, optická frekvence laseru musí být stabilizována na rezonanci pasivního rezonátoru buďto detekcí rezonančního maxima na výstupu, nebo rezonančního minima v odražené vlně. Zde je řízení optické frekvence laseru za účelem dosažení konstantní vlnové délky ve vzduchu jediné řešení. Znamená to, ale že vlastní odměřování se musí dít s pomocí prvku schopného detekovat interferenční maxima a minima podél osy svazku v rezonátoru. Musí být nalezena vhodná rovnováha mezi ztrátami způsobenými detektorem laserového svazku v rezonátoru a jeho citlivostí. Navrhli, realizovali a otestovali jsme několik fotodetektorů s cílem nejen redukovat ztráty v rezonátoru, ale také redukovat odrazy od všech povrchů. Podařilo se vytvořit soustavu antireflexních vrstev a vlastní aktivní vrstvy z polykrystalického křemíku na podložce z křemenného skla redukující ztráty odrazem.

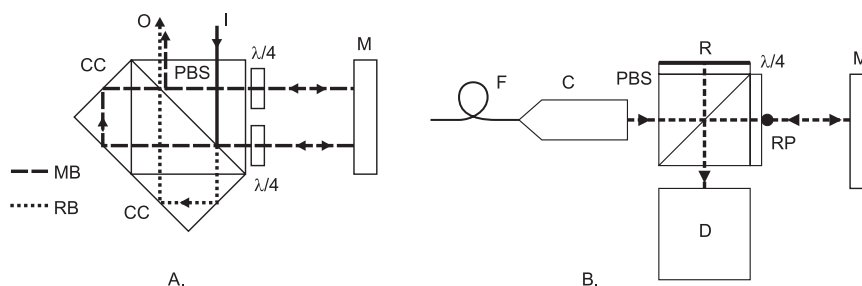
Relevance těchto konceptů může být interpretována jakožto úroveň souhlasu mezi fluktuacemi indexu lomu vzduchu v měřící ose v celém měřícím rozsahu a v jednotlivých dílčích délkách odměřovaných protiběžnými interferometry. Experimenty ukazují, že tato úroveň souhlasu je nejméně o řád vyšší, než vlastní fluktuace. Tento poměr platí jak v případě uzavřeného prostoru v okolí interferometru, tak je-li měření ve více, či méně otevřeném prostoru, jen obě hodnoty jsou úměrně vyšší. Porovnání zde je s fluktuacemi, které jsou natolik rychlé, že nemohou být postihnuty nepřímým měřením indexu lomu v důsledku pomalé odezvy snímačů teploty, tlaku, vlhkosti a obsahu  $\text{CO}_2$ . Nemluvě o faktu, že tato měření nejsou možná přímo v dráze svazku. Odhad



zlepšení interpretovaného jako snížení příspěvku vlivu indexu lomu vzduchu do celkové nejistoty měření je tedy blízký dvěma řádům.

## Měřicí systém pro nanometrologii – národní nanometrologický etalon

Zkušenosti z předcházejících řešení odměřovacího systému pro metrologický AFM mikroskop jsme zúročili ve výsledném návrhu, popsaném v [9]. Rozvod světla v plně optovláknové verzi, aktivní zpětnovazební kompenzaci úhlových chyb prostřednictvím piezoelementů s vertikálním zdvihem a horizontálním střížným posuvem. Nedořešené problémy souvisely s interferometrickými jednotkami. Jednak koncept jednotky s čtyřprůchodovým odměřováním od rovinného zrcadla sice umožňoval snadné nastavení díky kompenzaci úhlového náklonu zrcadla přítomností koutových odražečů jak v měřicí, tak v referenční trase, ale optická dráha ve „skle“ byla pro měřicí a referenční svazek různá (obr. 24). Teplotní dilatace jednotek, především optických prvků byla zdrojem chyb měření. Další velký problém bylo nastavení ortogonalit měřicích os. Předcházející experimentální sestavy bylo možné nastavit jen jednoduchými geometrickými metodami s pomocí pravítek na optickém stole. Dostat se s přesností nastavení pod úhlovou minutu bylo nemožné.

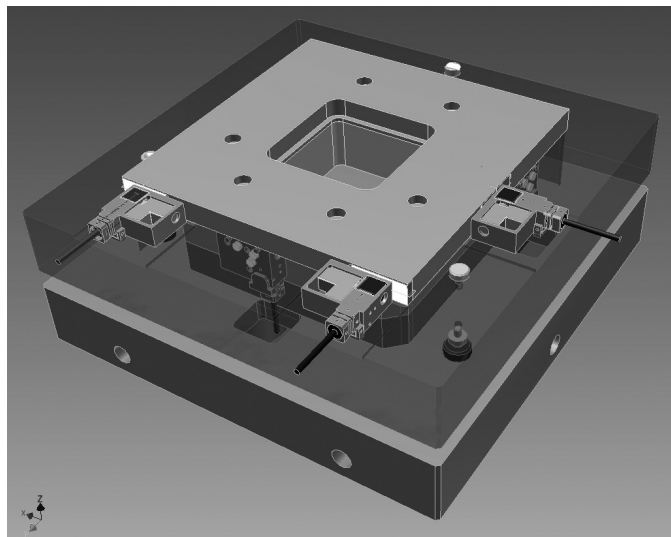


**Obr. 24.** Schéma dvouprůchodového (A) a jednaprůchodového (B) interferometru s rovinným zrcadlem, PBS: polarizující dělič, CC: koutový odražeč, O: výstup, I: vstup, M: rovinné zrcadlo, MB: dráha měřicího svazku, RB: dráha referenčního svazku, C: kolimátor,  $\lambda/4$ : zpožďovací deska, D: detekční jednotka, F: optické vlákno, R: odrazná plocha, RP: referenční bod.

Návrh nových interferenčních jednotek byl veden snahou o co nejjednodušší řešení, kde by se minimálně projevil vady optiky a byla by identická dráha ve skle pro měřicí a referenční svazek, interferenční jednotka by byla teplotně kompenzovaná. Mechanická vazba interferometrického děliče svazku byla v bodě RP, dilatace hranolu by se vzájemně kompenzovaly. Abychom co nejvíce omezili teplotní vlivy, při nichž hraje významnou roli optický tmel spojující obě poloviny hranolů a polarizační zpožďovací desky, snažili jsme se získat celou optickou sestavu spojovanou na optický kontakt. Materiál polarizujícího děliče je tradičně vysoce olovnaté sklo s vysokým indexem lomu, nutné pro návrh polarizující vrstvy. Takové sklo má i velmi vysoký koeficient teplotní roztažnosti. Ve spolupráci s firmou Meopta Optika, kde se podařilo vyvinout technologii spojování na optický kontakt a s návrhem polarizační dělicí vrstvy pro křemenné sklo se zdařilo téměř nemožné a vznikla interferometrická jednotka s kompenzací, z materiálu s minimální teplotní roztažností a bez optického tmelu a vše v jednom kuse i se zpožďovacími deskami z krystalického křemene (obr. 24).

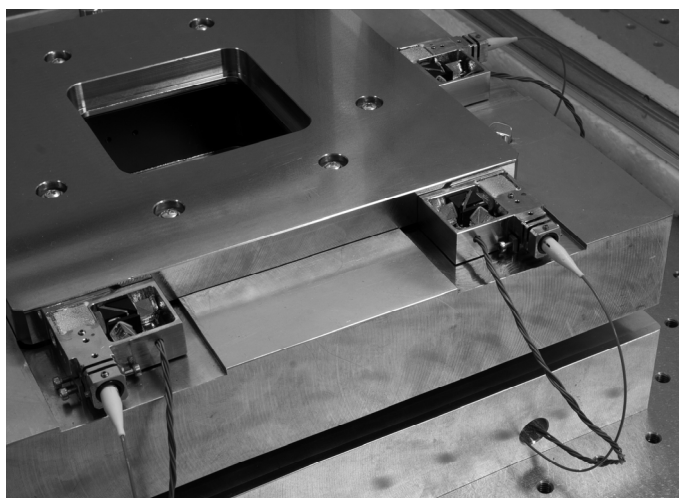
Problém přesné justáže ortogonalit měřicích os jsme vyřešili netradičně. A to upuštěním od snadno nastavitelných interferenčních jednotek s koutovými odražeči. Nová zjednodušená jednotka je naopak velmi citlivá na úhel nastavení optické osy a cílového zrcadla. Natočení zrcadla o 5'' je zřetelně rozpoznatelné na poklesu kontrastu, natočení o cca 0,5' znamená úplnou ztrátu interferenčního kontrastu. Pokud bychom se mohli spolehnout na ortogonalitu zrcadel na polohovacím stole vzorku, nastavení jednotek s chybou na úrovni několika úhlových vteřin bylo

nejenom možné, ale nutné, aby vůbec měřily. Původní zámysl vyrobít stolek vzorku celý ze Zeroduru, nebo křemenného skla jsme opustili hlavně z finančních důvodů. Stolek z Invaru vykázal přijatelně malou teplotní roztažnost a byl snadno obrobitelný. Nalepení zrcadel jsme provedli s pomocí referenční optické desky s rovinností  $\lambda/20$  a úhelníky z křemenného skla s pravým úhlem přesným s chybou na úrovni pod 2". Úhlové chyby rovinnosti zrcadel jsme kontrolovali autokolimátorem a pravé úhly autokolimátorem a přesným pentagonálním hranolem a podařilo se je udržet pod 10". Uspořádání sestavy s polohou jednotek a zrcadel je na obr. 25.



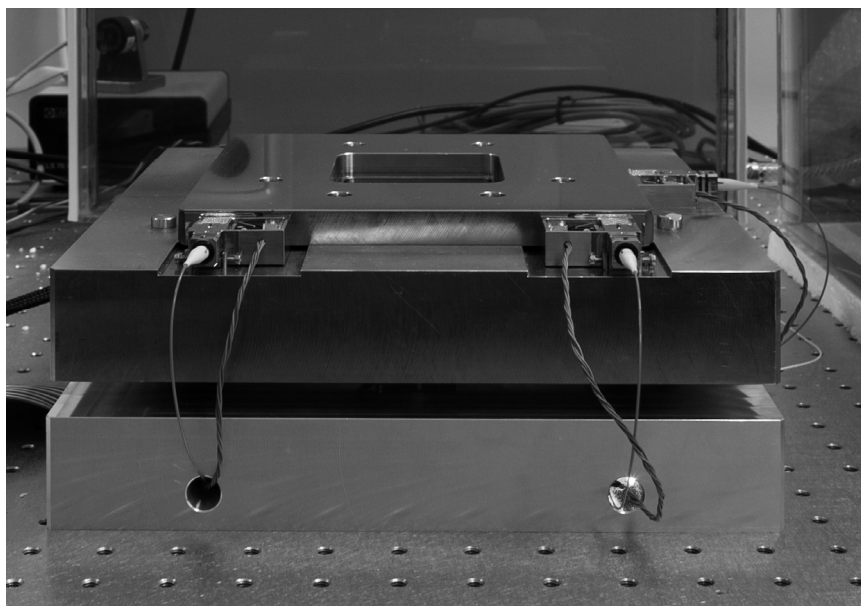
**Obr. 25.** Návrh sestavy polohovacího a odměřovacího systému.

Interferometrické jednotky byly koncipovány jako samostatné prvky, ale spojující optiku interferometru s detekční jednotkou pro homodynní detekci interferenčního signálu v kvadratuře. Homodynní systém je obvykle považován za jednodušší z elektrického hlediska, ale složitější (a dražší), z optického hlediska. V našem případě představoval výhodnější řešení, protože laser mohl být jednofrekvenční a nevadil mírný polarizační drift v optovláknovém rozvodu, kterému se nedalo zcela zabránit. Měl na svědomí jen nevýznamné fluktuace kontrastu. Vlastní detekční jednotky byly s pomocí plošné montáže analogové části elektroniky maximálně miniaturizovány (obr. 26). Celé pouzdro je z Invaru, z důvodu teplotní roztažnosti blízké křemennému sklu.



**Obr. 26.** Detail interferometrických jednotek pro měření v horizontální rovině.

Koncepce mechanické konstrukce už odpovídala požadavkům na metrologický systém. Samostatným prvkem je „metrology frame“ opět z Invaru, na němž jsou upevněny všechny interferometrické jednotky. Výroba všech klíčových součástí z Invaru redukuje teplotní vlivy na minimum nejenom díky malému koeficientu teplotní roztažnosti, ale také díky tomu, že teplotní roztažnosti komponentů působí proti sobě a z větší části se eliminují. Podstavec polohovacího mechanismu je hliníkový a obsahuje elektronické a optické rozvody. Mechanická vazba metrologického rámu i AFM mikroskopu na něj je třibodová, respektující Abbého princip, na safírových kuličkách. Foto výsledné sestavy je na obr. 27. Výsledný systém se má stát národním nanometrologickým etalonem.



**Obr. 27.** Fotografie výsledné soustavy pro nanometrologii.

## Závěr

Zde prezentovaný přehled výsledků výzkumného snažení má jednu jednotící linii a tou je vývoj optických měřících technik geometrických veličin s důrazem na měření malých vzdáleností pro nanometrologii. Hlavní měřicí systém, na němž se většina ze zmíněných technik a metod uplatnila je měřicí systém pro odměřování vzorku pod mikroskopem s lokální sondou. Ten je základem pro národní etalon pro nanometrologii, který vznikne osazením mikroskopu atomárních sil. Nabízí návaznost na základní etalon délky – stabilizovaný laser – který je přímo jeho součástí a rozlišení v subnanometrové oblasti. Výsledná nejistota měření je minimalizována pečlivým návrhem konstrukce a volbou materiálů s minimální teplotní roztažností. Zvolený laserový zdroj – frekvenčně zdvojnásobený Nd:YAG laser se vyznačuje malým frekvenčním šumem, velkým výkonem postačujícím pro všech šest měřících os a stabilitou daleko převyšující požadavky.

Koncept, který se podařilo realizovat, může být východiskem pro návrh dalších víceosých měřících systémů jak pro nanometrologii s mikroskopií s lokální sondou a s velkým rozsahem polohování (long-range), nebo také pro nanometrologické systémy kombinující elektronovou mikroskopii s interferometrickým odměřováním. Elektronový mikroskop představuje sice systém úplně jiné třídy komplexity a také ceny, ale pro nanometrologii nabízí řadu vlastností a předností nedosažitelných mikroskopem atomárních sil. Každopádně se jedná do budoucna o velkou výzvu.

## Reference

Seznam referencí zde je seznamem následujících publikací, jež tvoří vlastní jádro prezentované práce a k nimž se vztahuje, na něž se odkazuje tento komentář. Reference na původní práce jiných autorů jsou uvedeny ve vlastních jednotlivých publikacích.

1. Číp, Ondřej; Petřů, František; Buchta, Zdeněk; Lazar, Josef. Small displacement measurements with subatomic resolution by beat frequency measurements. *Measurement Science and Technology*, 2007, Roč. 18, č. 7, s. 2005-2013.
2. Lazar, Josef; Klapetek, P.; Číp, Ondřej; Čížek, Martin; Šerý, Mojmír. Local probe microscopy with interferometric monitoring of the stage nanopositioning. *Measurement Science and Technology*, 2009, Roč. 20, č. 8, 084007: 1-6.
3. Lazar, Josef; Hrabina, Jan; Jedlička, Petr; Číp, Ondřej. Absolute frequency shifts of iodine cells for laser stabilization. *Metrologia*, 2009, Roč. 46, č. 5, s. 450-456.
4. Lazar, Josef; Číp, Ondřej; Čížek, Martin; Šerý, Mojmír. Interferometric Displacement Measurement for Local Probe Microscopy. *tm-Technisches Messen*, 2009, Roč. 76, č. 5, s. 253-258.
5. Šmíd, Radek; Číp, Ondřej; Čížek, Martin; Mikel, Břetislav; Lazar, Josef. Conversion of Stability of Femtosecond Stabilized Mode-locked Laser to Optical Cavity Length. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, 2010, Roč. 57, č. 3, s. 636-640.
6. Hrabina, Jan; Lazar, Josef; Klapetek, Petr; Číp, Ondřej. Multidimensional interferometric tool for the local probe microscopy nanometrology. *Measurement Science and Technology*, 2011 Roč. 22, č. 9, 094030.
7. Buchta, Zdeněk; Mikel, Břetislav; Lazar, Josef; Číp, Ondřej. White-light fringe detection based on a novel light source and colour CCD camera. *Measurement Science and Technology*, 2011 Roč. 22, č. 9, 094031.
8. Lazar, Josef; Číp Ondřej; Čížek Martin; Hrabina, Jan; Buchta, Zdeněk. Suppression of Air Refractive Index Variations in High-Resolution Interferometry. *Sensors*, Roč. 11, č. 8, s. 7644-7655.
9. Lazar, Josef; Hrabina, Jan; Šerý, Mojmír; Klapetek, Petr; Číp Ondřej. Multiaxis interferometric displacement measurement for local probe microscopy. *Central European Journal of Physics*, 2011, DOI: 10.2478/s11534-011-0093-5
10. Lazar, Josef; Číp, Ondřej; Čížek, Martin; Hrabina, Jan; Buchta Zdeněk. Standing Wave Interferometer with Stabilization of Wavelength on Air. *Technisches Messen*, 2011, Roč. 78, č. 11, s. 484-488.

## Abstract

The unifying topic of this summary is a research in the field of optical measuring methods in dimensional metrology with a focus on measuring in the nanoscale. The main result presented here is a system for nanometrology, for positioning and measuring of a sample of a local probe microscope.

Coordinate position sensing allows upgrading the imaging microscope techniques up to quantified measuring. Especially imaging techniques in the micro- and nanoworld overcoming the barrier of resolution given by the wavelength of visible light are a suitable basis for design of measuring systems with the best resolution possible. Atomic force microscopy, other local probe techniques and electron microscopy when equipped with precision positioning and measurement of the probe and sample may become a tool for nanometrology – measurement of geometrical quantities on the nanoscale. Description of such a measuring and positioning system is a subject of this article.

Associated techniques included into this summary deal with specific techniques developed especially to improve the resolution and uncertainty of interferometric techniques. They start with cavity-based technique converting length, resp. displacement into frequency, historically first technique able to resolve lengths deep below one wavelength and also with excellent linearity.

A novel approach is represented by involvement of optical synthesis via femtosecond pulsed lasers that allow direct link to cesium clock. A method linking a mechanical reference – a passive Fabry-Perot cavity to one of the spectral components of the optical comb is presented here. This allows generation of small displacement with a stability of the radiofrequency atomic clock standard.

Next is an automatic system for contactless gauge blocks calibration. The system was developed in cooperation between Institute of Scientific Instruments AS CR and Mesing, spol. s r.o. Principle of the contactless gauge block calibration is based on a novel method combining broadband radiation and radiation of He-Ne laser. The optical system is supplemented by automatic gauge block manipulator with a capacity of 126 pieces of gauge blocks of length up to 100 mm.

An approach combining traditional displacement incremental interferometry with a tracking refractometer, following the fluctuations of the refractive index of air is introduced as well. The interferometer monitoring the measuring range with its geometrical length of the measuring beam linked to a mechanical reference made of a high thermal-stability material (Zerodur) operates as a reference for stabilization of wavelength on air. This significantly improves the uncertainty of interferometric measurement.