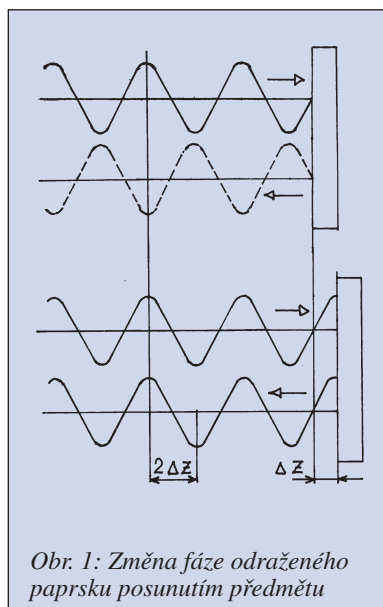


Dvoufrekvenční laserové interferometry

Nejpřesnější metoda měření pohybu předmětu je počítání vlnových délek monochromatického světla o které se posunul sledovaný předmět. Paprsek světla vyzářovaný laserem je vyslán ke sledovanému předmětu, kde se odrazí zrcadlem nebo koutovým odražečem zpět. Světlo je elektromagnetické vlnění. Viditelná je elektrická složka. Její intenzita v jednom místě se s časem mění sinusově s frekvencí řádu 10^{14} Hz. Používá se světlo helium neonového laseru s vlnovou délkou 633 nm, jehož frekvence je $4,7 \times 10^{14}$ Hz.

Kdybychom mohli ve výchozím bodě snímat průběh intenzity a porovnávat, jak s časem přibývá počet prošlých světelných vln vyslaného a odraženého paprsku, shledali bychom, že vlny odraženého paprsku přibývají vlivem Dopplerova efektu pomaleji nebo rychleji podle směru pohybu. Vzdálí-li se předmět o půl vlnové délky, vejde se do dráhy tam a zpět o jednu vlnovou délku víc a v odraženém paprsku přibude o jednu vlnu méně, **obr. 1**.

Současné fotoelektrické a elektronické prvky nejsou zdaleka schopny s frekvencí světla pracovat. Pro porovnání počtu vln využíváme proto interference světla v interferometru, **obr. 2**. Interferometr je optický hranol, který s využitím rozdílné polarizace paprsků rozdělí paprsek laseru na měřicí a referenční paprsek. Měřicí paprsek se odrazí od odrazného prvku předmětu, referenční od odrazného prvku pevně spojeného s hranolem. Optickými prvky přivedeme oba paprsky do místa, kde se jejich intenzity sčítají, interferují. Posun před-

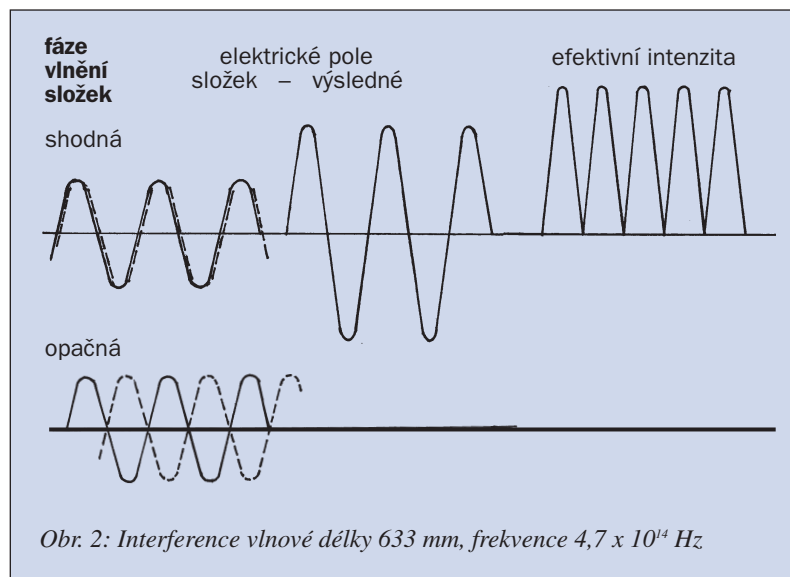


Obr. 1: Změna fáze odraženého paprsku posunutím předmětu

mětu o půl vlnové délky způsobí změnu součtové intenzity od minima do maxima a zpět do minima. Rychlou časovou změnu intenzity přitom nevidíme ani nenesmáme. Fotoelektrickou diodou sledujeme změny intenzity při interferenci a počítáme vlnové délky, o které se změnila dráha měřicího paprsku.

Pro nejpřesnější měření a řízení polohy nevystačíme s rozlišením jedné vlnové délky. Potřebujeme rozlišení na zlomky vlnové délky.

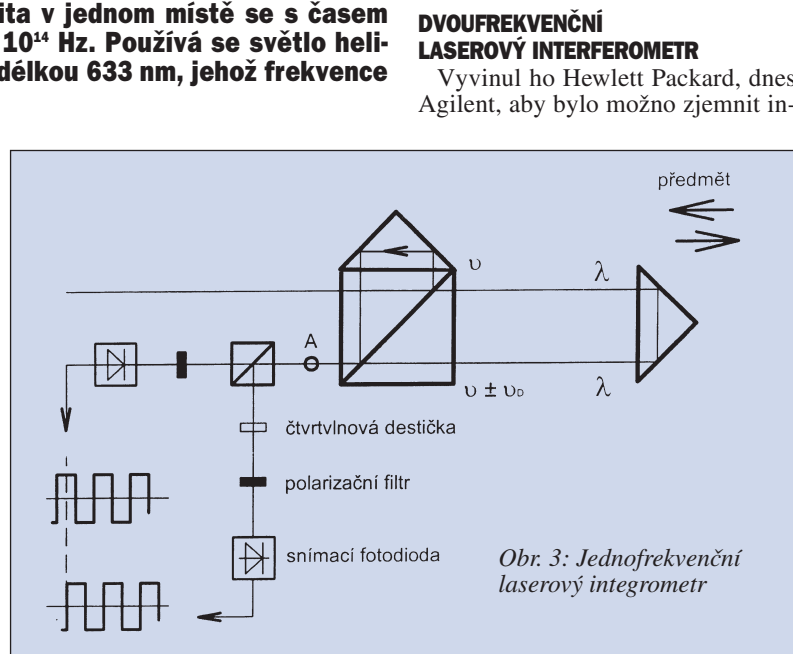
Změnu intenzity dvou paprsků při interferenci lze sledovat, pokud je elektrické vlnění paprsků lineárně po-



Obr. 2: Interference vlnové délky 633 nm, frekvence $4,7 \times 10^{14}$ Hz

larizováno ve shodném směru. Světlo laseru má dvě složky s kruhovou polarizací v opačných směrech. Polariza-

ční paprsky se odrazí od odrazného prvku předmětu, referenční od odrazného prvku pevně spojeného s hranolem. Optickými prvky přivedeme oba paprsky do místa, kde se jejich intenzity sčítají, interferují. Posun před-



Obr. 3: Jednofrekvenční laserový interferometr

ní optický hranol interferometru složky podle polarizace rozdělí, nechá odrazit a po návratu vyše na polarizační filtr, který z nich propustí složky vlnění ve společném směru, aby interferovaly. Pro transformaci kruhové polarizace světla z laseru na lineární v potřebném směru a pro oddělování složek světla s odlišným směrem polarizace slouží polarizační optické hranoly, čtvrtvlnové destičky a polarizační filtry. Nepolarizační hranoly odklání a dělí světlo bez vztahu ke směru polarizace.

JEDNOFREKVENČNÍ LASEROVÝ INTERFEROMETR

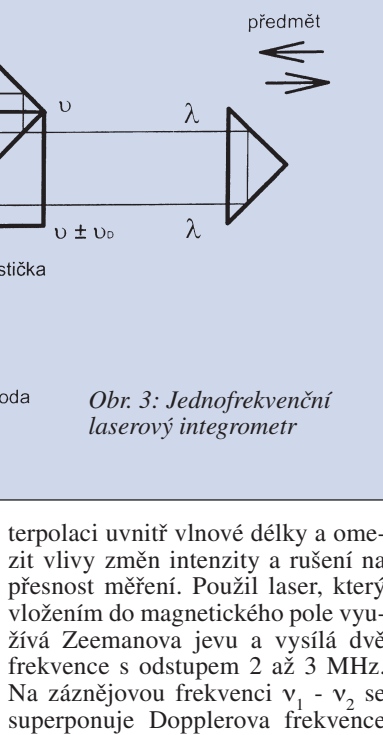
na **obr. 3** je historicky starší. Dvě složky paprsku světla jednofrekvenčního laseru mají odlišnou polarizaci, ale stejnou frekvenci. Při stojícím předmětu se intenzita interferovaných paprsků nemění, frekvence změny je nulová. Pohyb předmětu způsobí střídání intenzity s Dopplerovou frekvencí ν_D , ale bez dalšího opatření nerozeznáme směr pohybu. Pro identifikaci směru se ze spojeného paprsku po výstupu z hranolu k polarizačnímu filtru oddělí druhá větev, do které se před její vlastní polarizační filtr zařadí čtvrtvlnová destička. Destička zpozdí fázi o čtvrt vlnové délky a doplní informaci o směru pohybu. Využitím fázového zpoždění o čtvrt rozeče se zjemní i dělení na čtvrtinu vlnové délky, které reprezentuje posun předmětu o osminu vlnové délky. Další interpolace už není možná, jediné extrapolace do probíhající vlnové délky s rizikovým předpokladem stejného průběhu intenzity jako v proběhnuté vlnové délce.

Snímací fotodiody nerozeznají, zda změna intenzity světla při interferenci je způsobena pohnutím předmětu nebo jiným vlivem na intenzitu světla, tj. ko-

chvění předmětu a nepřesnosti odrazného prvku. Výrobci se snaží snížit vlivy regulací výkonu laseru podle snímače intenzity v místě A. Snímač potřebuje sejmout alespoň jeden celý cyklus.

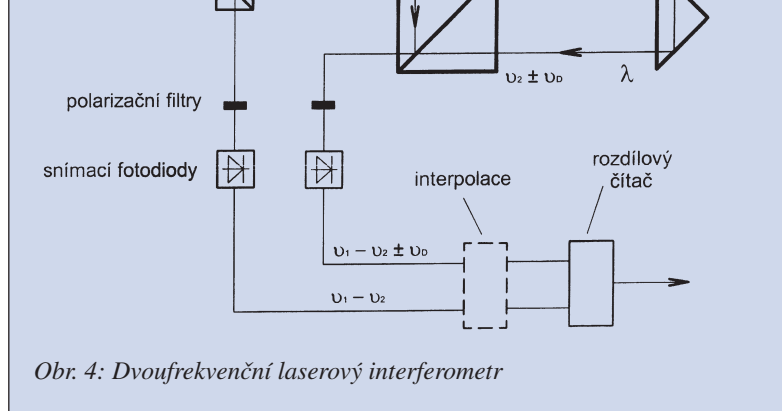
DVOUFREKVENČNÍ LASEROVÝ INTERFEROMETR

Vyvinul ho Hewlett Packard, dnes Agilent, aby bylo možno zjemnit in-



Obr. 4: Dvoufrekvenční laserový interferometr

terpolaci uvnitř vlnové délky a omezit vlivy změny intenzity a rušení na přesnost měření. Použil laser, který vložením do magnetického pole využívá Zeemana jevu a vysílá dvě frekvence s odstupem 2 až 3 MHz. Na zánějovou frekvenci $\nu_1 - \nu_2$ se superponuje Dopplerova frekvence



Obr. 4: Dvoufrekvenční laserový interferometr

a výsledná frekvence je od 1 až 4 MHz. Nová konstrukce laseru využívá k vytvoření dvou frekvencí akusticko optický modulátor s difrakcí a vysílá dvě frekvence s odstupem až 25 MHz. Výsledná frekvence po superpozici Dopplerovy frekvence je od 15 do 25 MHz. Zánějová frekvence $\nu_1 - \nu_2$ je volena tak, že je zpracovatelná snímacími diodami a elektronikou.

Světlo laseru prochází interferometrem podle **obr. 4** obdobně jako u jednofrekvenčního laserového interferometru. Intenzita světla, kterou snímá snímací fotodiody, má frekvenci $(\nu_1 - \nu_2 \pm \nu_D)$, je střídavá i když předmět stojí, neboť frekvence jsou voleny tak, aby $\nu_1 - \nu_2$ byla větší než ν_D , která odpovídá přípustné rychlosti předmětu. Signál fotodiody se přivede do diferenciálního čítače impulsů. Do něj se přivede i signál $\nu_1 - \nu_2$ paprsku odděleného ještě před hranolem a počty vln v obou signálech se odečítají. Čítač dodá počet inkrementů dráhy předmětu, které jsou určeny počtem vln frekvence ν_D včetně znaménka, tj. směru pohybu.

VLASTNOSTI DVOUFREKVENČNÍHO LASEROVÉHO INTERFEROMETRU

Kolísání intenzity světla neovlivňuje frekvence ν_1 , ν_2 , ν_D . Změna intenzity nemůže být posuzována jako pohnutí předmětem.

Střídavý systém má vyšší stabilitu měření a nižší citlivost na rušení turbulencí vzduchu, elektrickým i optickým rušením.

Na každou měřicí osu stačí jedna snímací fotodiody, protože i směr pohybu

předmětu je uložen ve frekvenci měřicího signálu.

Snižují se nároky na vyrovnání optiky včetně kolísání ustavení při pohybu, na zisk a stabilitu citlivosti fotodiody.

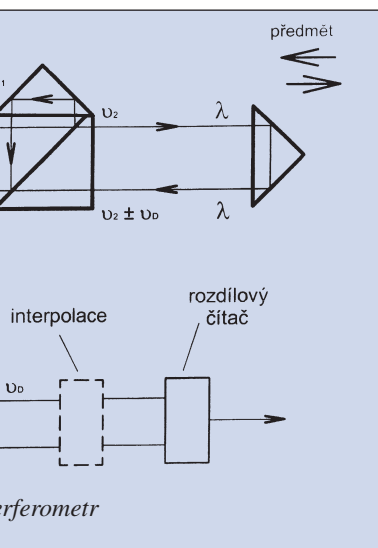
Mezi dvěma střídavými signály $\nu_1 - \nu_2$, $\nu_1 - \nu_2 \pm \nu_D$ lze interpolovat a zjemnit rozlišení na $\lambda/512$. Vysoké rozlišení má ovšem vliv na přípustnou rychlost předmětu s ohledem na frekvenční propustnost snímací fotodiody.

ŠÍŘKA PÁSMU FREKVENČNÍ

Rozsah měřitelné rychlosti předmětu v je přímo úměrný šířce pásma frekvence signálu s informací o pohybu předmětu. Jednofrekvenční laser obvykle pracuje v pásmu od nuly do 2 MHz. Je to frekvence rovná Dopplerově frekvenci $\nu_D = 2v/\lambda$.

Dvoufrekvenční laser, který využívá k vytvoření dvou frekvencí Zeemana jevu, vysílá dvě frekvence s odstupem 2 až 3 MHz. Na zánějovou frekvenci $\nu_1 - \nu_2$ se superponuje Dopplerova frekvence a výsledná frekvence je od 1 až 4 MHz.

Dvoufrekvenční laser, který využívá k vytvoření dvou frekvencí, např. akusticko optický modulátor s difrakcí pod Bruggovým úhlem, vysílá dvě frekvence s odstupem až 25 MHz. Výsledná frekvence po superpozici Dopplerovy frekvence je od 15 do 25 MHz. U dvoufrekvenčních laserových interferometrů je účelné snížit poměr šířky pásma k nosné frekvenci $(\nu_1 - \nu_2)$. Elektronika k pokrytí rozsahu rychlostí předmětu je pro nižší poměr jednodušší. Z tohoto

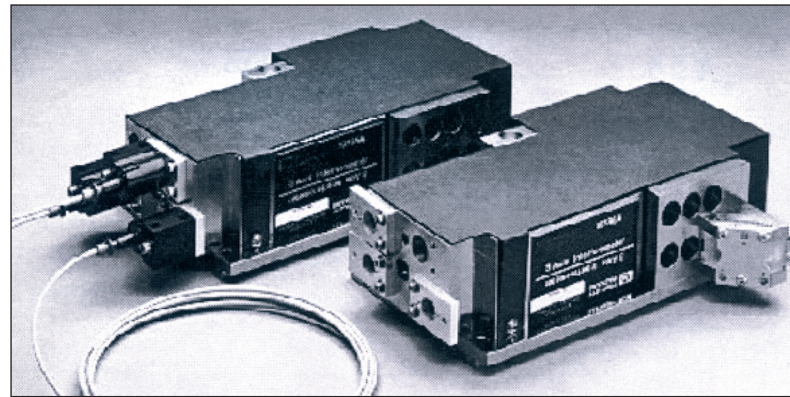


Obr. 4: Dvoufrekvenční laserový interferometr

pohledu je výhodný systém s vyšší nosnou frekvencí.

OPTIKA PRO PŘÍVEDENÍ SVĚTLA K NĚKOLIKA OSÁM

Světlo jednoho dvoufrekvenčního laseru se rozdělí na větvě pro jednotlivé měřicí osy s využitím děličů, nepolarizovaných hranolů. Děliče existují pro rozdělení energie v poměru 1:1 nebo



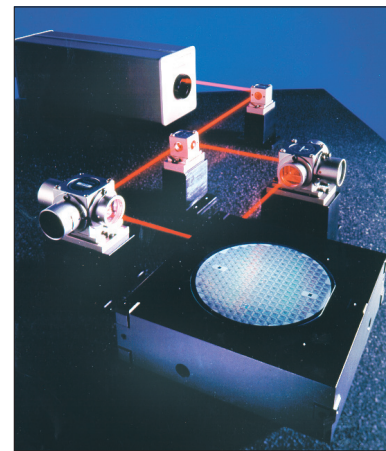
Obr. 6: Kombinovaný tříosý interferometr Agilent s výstupem vláknovou optikou

1:2. Dalším prvkem je hranol pro ohnutí paprsku o 90° .

VYUŽITÍ VLÁKNOVÉ OPTIKY

Vláknová optika se zpravidla používá k vedení jednoduchého paprsku, který není po průchodu potřeba dělit podle polarizace. Vláknová optika obtížně udrží polarizaci při změnách teploty a deformacích vláken. Jednofrekvenční laserový interferometr má jednoduchý paprsek na vstupu do interferometru, ale na výstupu je zpravidla

paprsek rozdělen pro rozeznání směru pohybu. Vláknová optika se použije zpravidla na vstupu. Dvoufrekvenční laserový interferometr má jednoduchý paprsek na výstupu z interferometru, zatímco na vstupu nikoliv. Vláknová optika na výstupu umožní vzdálit elektroniku jako zdroj tepla od interferometru a zvýšit tak přesnost měření. Dvoufrekvenční interferometr Agilent používá vláknovou optiku i na vstupu do interferometru, ale pro



Obr. 5: Uspořádání interferometrů při výrobě mikroelektroniky

dvě polarizace potřebuje dva paralelní světlovody.

TYPY INTERFEROMETRŮ

Lineární interferometr. Paprsek k odražeči postupuje nad osou hranolu a odražeče a vrací se rovnoběžně pod osou podle **obr. 4**.

Jednopaprskový interferometr vede paprsek k odražeči a zpět v ose hranolu i odražeče.

Interferometr pro dvojnásobný průchod měřicího paprsku k předmětu a zpět. Odraz na předmětu je rovinným zrcadlem. Interferometr obsahuje kromě polarizačního hranolu dva koutové odražeče a na výstupu k předmětu čtvrtvlnovou destičku. Destička změnil směr lineární polarizace po prvním průchodu a umožní odlišení paprsku při druhém průchodu. Dvojnásobný průchod paprsku zjemní dělení dvakrát.

Interferometr pro dvojnásobný průchod se zvýšenou teplotní stabilitou. Interferometr obsahuje kromě polarizačního hranolu a jednoho koutového odražeče rovinné zrcadlo se čtvrtvlnovou destičkou stejně jako na výstupu k předmětu. Měřicí i referenční paprsek prochází stejnou tloušťkou skla. Eliminuje se vliv teploty na vlnovou délku světla ve skle.

Diferenciální interferometr porovnává měřicí paprsek s referenčním, který směřuje k externímu rovinnému zrcadlu.

Několiakoosý interferometr pracuje s několika měřicími paprsky, které mě-

ří vzdálenost a diferenciálně úhel předmětu pomocí jeho odrazného zrcadla. Pro aplikace při řízení litografie, při přesném obrábění, řešení náročných úloh v metrologii.

UZIMEX PRAHA, spol. s r.o.
Na Celné 5, 150 00 Praha 5
tel.: 257 323 938, fax: 257 325 025
e-mail: praha@uzimex.cz,
www.uzimex.cz