VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV FYZIKÁLNÍHO INŽENÝRSTVÍ
INSTITUTE OF PHYSICAL ENGINEERING

NÁVRH A SESTAVENÍ LABORATORNÍHO VZORU LASEROVÉHO DEFLEKTOMETRU PRO MĚŘENÍ MECHANICKÉHO NAPĚTÍ V TENKÝCH VRSTVÁCH

DESIGN AND SET UP OF A LABORATORY SAMPLE OF A LASER DEFLECTOMETER FOR MEASUREMENT OF MECHANICAL STRESS WITHIN THIN FILMS

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE — Bc. Štěpán Šustek
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE — prof. RNDr. Miloslav Ohlídal, CSc.
SUPERVISOR

BRNO 2016

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav fyzikálního inženýrství
Student:	**Bc. Štěpán Šustek**
Studijní program:	Aplikované vědy v inženýrství
Studijní obor:	Přesná mechanika a optika
Vedoucí práce:	**prof. RNDr. Miloslav Ohlídal, CSc.**
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:

Návrh a sestavení laboratorního vzoru laserového deflektometru pro měření mechanického napětí v tenkých vrstvách

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Mechanické napětí v tenkých vrstvách velmi významně ovlivňuje vlastnosti i stabilitu systémů tenkých vrstev v optických i elektronických aplikacích. Nejčastěji používaná metoda jeho měření je založena na určování deformace soustavy podložka – vrstva způsobené mechanickým napětím ve vrstvě. Tuto deformaci lze určovat z úhlu odrazu laserového svazku odrážejícího se od zmíněného systému. Výzkumná skupina Laboratoře koherenční optiky Ústavu fyzikálního inženýrství v rámci projektů TA ČR řeší mimo jiné i problematiku určování vnitřních napětí v tenkých vrstvách. Sestavení laserového deflektometru pro tento účel bude znamenat významný přínos k řešení zmíněné úlohy.

Cíle diplomové práce:

Realizace laboratorního vzoru laserového deflektometru a ověření jeho činnosti pro měření mechanického napětí v tenkých vrstvách

Seznam literatury:

W. D. NIX: Mechanical Properties of Thin Films, Metallurgical Transactions A, 20A, 1989, p. 2217 – 2245.

P. A. FLINN, D. S. GARDNER and W. D NIX: Measurement and Interpretation of Stress in Aluminum-Based Metallization as a Function of Thermal History, IEEE Transactions on Electron Devices, ED 34, p. 689 – 699.

OHLÍDAL, M. OHLÍDAL, D. FRANTA, V.ČUDEK, V. BURŠÍKOVÁ, P. KLAPETEK, AND M. JÁKL: Optical measurement of mechanical stresses in diamond-like carbon films, Proc. of SPIE, 5776, 2005, p. 717 – 728.

Š. GLÉZL, J. KAMARÁD, I. SLIMÁK: Presná mechanika, Alfa, Bratislava, 1992 .

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2015/16

V Brně, dne

L. S.

prof. RNDr. Tomáš Šikola, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

Abstrakt

Předkládaná diplomová práce se zabývá návrhem laboratorní verze přístroje pro měření mechanického napětí v tenkých vrstvách - laserového deflektometru, jeho konstrukčním řešením a ověřením funkčnosti.
Vlastní text práce je členěn do pěti kapitol. První z nich se zabývá rozborem mechanického napětí a jeho vlivem na systém podložka - tenká vrstva. Druhá kapitola popisuje různé typy přístrojů běžně používané pro měření mechanického napětí v tenkých vrstvách, shrnuje jejich výhody a nevýhody. Ve třetí kapitole je prezentováno několik možných variant zmíněného přístroje, z nichž byla jedna vybrána pro realizaci. Čtvrtá kapitola se zaměřuje na konstrukční řešení přístroje, v páté kapitole jsou uvedeny výsledky experimentálního měření provedeného na přístroji pro ověření jeho funkčnosti.

Klíčová slova

Mechanické napětí, tenké vrstvy, deformace vzorku, deflektometr.

Abstract

This diploma thesis describes the design of a device for measuring stress in thin films – laser deflectometer, realization of its design and its experimental testing. The thesis is divided into five chapters. The first chapter deals with the stress in thin films and its influence on substrate – thin film system. The second chapter provides an overview of devices widely used for measuring stress in thin films and describes some their advantages and disadvantages. In the third chapter some design possibilities of the device are presented. The final solution of device called deflectometr is introduced in the fourth chapter. The last chapter includes the functional testing the device.

Key Words

Mechanical stress, thin films, deformation of a sample, deflectometr.

Bibliografická citace

ŠUSTEK, Š. *Návrh a sestavení laboratorního vzoru laserového deflektometru pro měření mechanického napětí v tenkých vrstvách.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 68 s. Vedoucí diplomové práce prof. RNDr. Miloslav Ohlídal, CSc.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma, „Návrh a sestavení laboratorního vzoru laserového deflektometru pro měření mechanického napětí v tenkých vrstvách“ vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v kapitole Seznam použitých zdrojů.

Dne……... ……..……

Štěpán Šustek

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce prof. RNDr. Miloslavu Ohlídalovi, CSc za cenné připomínky, rady a vedení při vypracování této práce. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Jiřímu Vodákovi za jeho cenné připomínky a rady při řešení konstrukční části.

Obsah

1 ÚVOD 9
2. TEORIE MĚŘENÍ MECHANICKÉHO NAPĚTÍ V TENKÝCH VRSTVÁCH 10
2.1 MECHANICKÉ NAPĚTÍ V TENKÝCH VRSTVÁCH 10
2.1.1 Deformace vyvozená celkovým napětím 11
3 ZPŮSOBY MĚŘENÍ NAPĚTÍ 13
3.2.1 Měření extenzometrem 13
3.2.2 Měření pomocí interferometrie 14
3.2.2.1 Interferometr s hranolem z taveného křemene 14
3.2.2.2 Kosterův interferometr 17
3.2.3 Měření pomocí odklonu laserového svazku 18
3.2.4 Měření optickým profilometrem 20
3.2.5 Měření deflektometrem 23
3.3 SROVNÁNÍ METOD 25
4. NÁVRH KONSTRUKCE DEFLEKTOMETRU 27
4.2 MOŽNÉ VARIANTY 27
4.2.1 Deflektor s maticí mikročoček 27
4.2.2 Deflektometr s Powellovou čočkou 31
4.2.3 Deflektometr s dvěma planparalelními deskami 36
4.2.3.1 Výhody deflektometru s planparalelnímy deskami 38
4.2.3.2 Nevýhody deflektometru s planparalelními deskami 42
4.3 POROVNÁNÍ JEDNOTLIVÝCH VARIANT DEFLEKTOMETRU 43
5 KONSTRUKCE DEFLEKTOMETRU 44
5.1 LASEROVÝ ZDROJ A JEHO UPEVNĚNÍ 44
5.2 PROSTOROVÝ FILTR 45
5.3 PLANPARALELNÍ DĚLIČ SVAZKU A JEHO UPEVNĚNÍ 47
5.4 UPEVNĚNÍ KUBICKÉHO DĚLIČE SVAZKŮ A ČOČKY 50
5.5 UCHYCENÍ VZORKU 52
5.6 KAMERA A JEJÍ UPEVNĚNÍ 53
5.7 ZÁKLADNÍ DESKA 55
6 EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ 56
6.1 VYHODNOCOVÁNÍ POLOMĚRU KŘIVOSTI 56
6.1.2 Ověření platnosti rovnice pro určení poloměru křivosti vzorku 58
6.2 OVĚŘENÍ FUNKČNOSTI DEFLEKTOMETRU 58
6.2.1 Porovnání naměřených hodnot 60
7 ZÁVĚR 63
8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ 64
9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ 66
10 SEZNAM PŘÍLOH 68

1 Úvod

Mechanické napětí vzniká v tenkých vrstvách už během procesu jejich depozice. Jeho charakter a velikost značně ovlivňuje vlastnosti tenkých vrstev používaných nejen v oblasti optiky. Velikost napětí také může snadno překročit mez elastické deformace materiálu tenké vrstvy, což následně může vést až k odlupování vrstvy. Deflektometr je jedním z nejpoužívanějších přístrojů v oblasti měření mechanického napětí v tenkých vrstvách. Ve srovnání s ostatními metodami přináší mnoho výhod, jako jsou odolnost proti vibracím, nenáročnost na světelný zdroj a přizpůsobitelnost měřícímu prostředí, která je velmi důležitá pro měření napětí během procesu depozice.

Diplomová práce se zabývá konstrukcí deflektometru pro potřeby měření mechanického napětí v tenkých vrstvách deponovaných na skleněných či křemíkových podložkách kruhového nebo obdélníkového půdorysu v rámci projektu TA ČR ve spolupráci s firmou Meopta optika, s.r.o. V době, kdy práce vznikala, byly laboratoři k dispozici dvě další metody pro měření napětí, metody založené na použití interferometru Askania a optického profilometru MicroProf FRT.. Zmíněný interferometr nedisponuje vhodným měřícím rozsahem a připravované systémy podložka-vrstva se pohybují na hranici jeho měřitelného rozsahu. V důsledku této skutečnosti nebylo možné mechanické napětí ve vrstvách vyhodnotit s dostatečnou přesností u většiny vzorků. Optický profilometr disponuje dostatečným rozsahem i přesností měření. Během měření průhledných podložek nebo vrstev ale dochází k jevům, které měření znehodnocují. Tyto jevy je možné pečlivou přípravou měření odstranit, proces je ale časově náročný a ještě prodlužuje už tak dlouhou dobu měření. Vhodná konstrukce deflektometru tak může přinést rychlé a snadné měření mechanického napětí v tenkých vrstvách a významně urychlit proces vývoje technologií přípravy těchto vrstev.

První kapitola práce se věnuje charakteru mechanického napětí v tenké vrstvě a jeho vlivu na systém podložka-tenká vrstva. Druhá kapitola obsahuje popis metod používaných pro měření mechanického napětí a zhodnocení jejich výhod a nevýhod. Třetí kapitola nastiňuje několik možných konstrukčních variant, u kterých je proveden podrobný rozbor a vzájemné srovnání. Jedna z těchto metod je následně vybrána pro realizaci. Čtvrtá kapitola se zaměřuje na konstrukci vybrané varianty přístroje. Důkladně se věnuje jak volbě jeho optických komponentů včetně světelného zdroje a kamery pro záznam měření, tak návrhu mechanické části přístroje. Poslední kapitola dokazuje funkčnost navrženého přístroje měřením yybraného vzorku a porovnáním na něm naměřených hodnot s hodnotami získanými měřením pomocí výše zmíněného optického profilometru i simulací v programu Zemax.

2. Teorie měření mechanického napětí v tenkých vrstvách

2.1 Mechanické napětí v tenkých vrstvách

Celkové mechanické napětí σ_{tot} (total stress) v tenkých vrstvách je součtem jednotlivých složek napětí. Ty vznikají vlivy, jako jsou transformace krystalových mřížek podložky a materiálu tenké vrstvy (tenkých vrstev), změny objemu podložky či vrstev při změně teploty, změny vnějšího zatížení nebo fyzikálně-chemickými procesy. [1,2]

$$\sigma_{tot} = \sigma_{intr} + \sigma_{therm} + \sigma_{ext} + \sigma_{phys-chem}. \tag{2.1}$$

Vnitřní mechanické napětí σ_{intr} (intrinsic stress) je dáno chemickým složením dané vrstvy, morfologickou a krystalovou strukturou vzniklou ve vrstvě během její depozice a vazbou mezi tenkou vrstvou a podložkou. Tato složka celkového napětí silně závisí na depozičních parametrech, jako jsou rychlost růstu nanášené vrstvy, teplota a tlak v depoziční komoře a rovněž přítomnost nežádoucích zbytkových plynů.
Tepelné mechanické napětí σ_{therm} (thermal stress) je způsobeno rozdílem v koeficientech tepelné roztažnosti materiálu vrstvy α_{film} a podložky α_{sub}a rozdílem teploty během depozice T_da teploty prostředí T_p, ve kterém se deponovaná vrstva s podložkou právě vyskytuje. Tepelné mechanické napětí je dáno vztahem: [1],

$$\sigma_{therm} = \left(\frac{E}{1-\nu}\right)_{film} (\alpha_{sub} - \alpha_{film})(T_p - T_d), \tag{2.2}$$

kde E je Youngův modul pružnosti materiálu vrstvy, ν je Poissonovo číslo materiálu vrstvy a výraz

$$\left(\frac{E}{1-\nu}\right)_{film} \tag{2.3}$$

v rovnici (2.2) se nazývá biaxiální modul vrstvy [1]. Protože morfologická a krystalová mikrostruktura podložky a vrstvy se liší, biaxiální modul i koeficient tepelné roztažnosti materiálu bude jiný pro vrstvu a pro podložku. Koeficient tepelné roztažnosti podložky je většinou dobře znám. Biaxiální modul vrstvy a její koeficient tepelné roztažnosti lze určit ze sklonu křivky měřené závislosti $d\sigma/\, dT_p$ při teplotní změně dvou identických vrstev nanesených na dvou podložkách s rozdílnými koeficienty tepelné roztažnosti pomocí vztahů[1] [1]

$$\left(\frac{E}{1-\nu}\right)_{film} = \frac{\left(\frac{d\sigma}{dT_p}\right)_{sub1} - \left(\frac{d\sigma}{dT_p}\right)_{sub2}}{\alpha_{sub1} - \alpha_{sub2}} \tag{2.4}$$

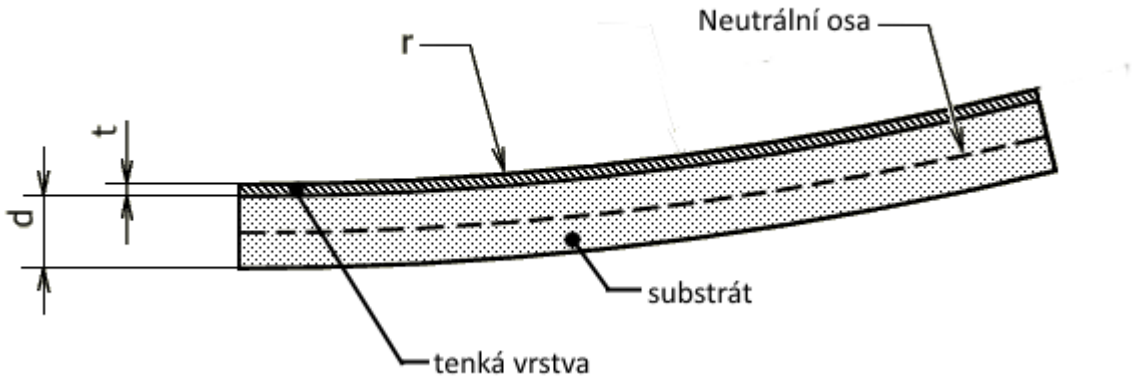
[1] Oba vztahy jsou platné v případě zatížení napětím, které vyvolává pouze elastické deformace

$$\alpha_{\mathrm{film}} = \frac{\alpha_{\mathrm{sub2}} \left(\frac{\mathrm{d}\sigma}{\mathrm{dT_p}}\right)_{\mathrm{sub1}} - \alpha_{\mathrm{sub1}} \left(\frac{\mathrm{d}\sigma}{\mathrm{dT_p}}\right)_{\mathrm{sub2}}}{\left(\frac{\mathrm{d}\sigma}{\mathrm{dT_p}}\right)_{\mathrm{sub1}} - \left(\frac{\mathrm{d}\sigma}{\mathrm{dT_p}}\right)_{\mathrm{sub2}}}. \tag{2.5}$$

Vnější mechanické napětí σ_{ext} (Extrinsic stress) je způsobeno vnějším zatížením různého druhu. Například upnutím, působením gravitačního pole nebo odstředivými silami u depozičních procesů, kde podložka rotuje kolem vlastní nebo jiné osy [1].
Fyzikálně-chemické mechanické napětí $\sigma_{phys-chem}$(Physical-chemical stress) vzniká vlivem srážení vzdušné vlhkosti a vniku vody do pórovitých sloupovitých struktur nebo oxidací na hranicích zrn [1].

2.1.1 Deformace vyvozená celkovým napětím

Celkové mechanické napětí ve vrstvě se projeví prohnutím podložky i vrstvy s poloměrem křivosti r, jehož velikost je úměrná velikosti celkového napětí. Jako první odvodil vztah mezi mechanickým napětím a poloměrem křivosti prohnutí Stoney v [3] pro tenkou vrstvu niklu deponovanou na ocelový nosník délky 102 mm, šířky 12 mm a tloušťky 0,32 mm.



Obrázek 1: Schématické zobrazení nosníku k odvození Stoneyovy rovnice pro výpočet celkového mechanického napětí ve vrstvě

Pokud je tenký ocelový nosník tloušťky d prohnut deponováním tenké vrstvy niklu o tloušťce t (viz obrázek 1) a pokud b je vzdálenost neutrální osy od povrchu podložky, platí vztah [3]

$$\int_d^0 \frac{E}{r}(b-x)x\,dx = 0. \tag{2.6}$$

Kde E je Youngův modul pružnosti. Po integraci a vyjádření b dostaneme vztah [3]

$$b = \frac{2}{3}d. \tag{2.6}$$

Dále, pokud σ_{tot} je mechanické napětí v tenké vrstvě niklu [3],

$$\sigma_{tot}\,t = \int_d^0 \frac{E}{r}\,(b-x)\,dx \tag{2.7}$$

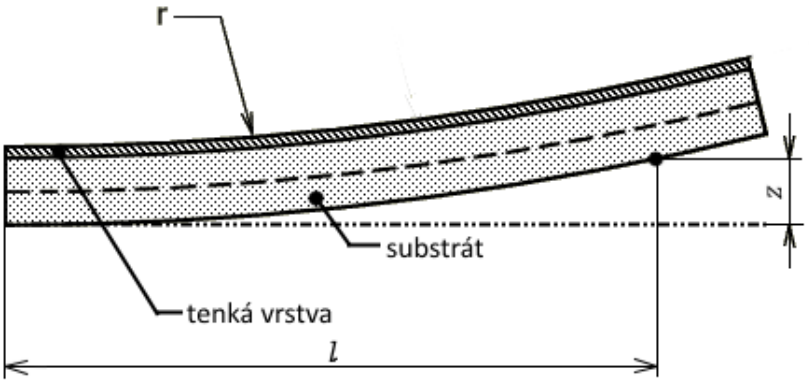
$$\sigma_{tot} = \frac{E}{r\,t}\left(bd - \frac{d^2}{2}\right) = \frac{E}{6}\,\frac{d^2}{t}\,\frac{1}{r} \tag{2.8}$$

Pomocí měření poloměru křivosti prohnutí a výpočtem dle rovnice (2.9) lze určit velikost celkového mechanického napětí v tenké deponované vrstvě. Někdy může být pro popis deformace systému podložka-vrstva vhodnější měření odchylky z od základní roviny ve vzdálenosti l (viz obrázek 2). Odchylka z a poloměr r křivosti prohnutí jsou vázány následujícím vztahem:

$$\mathrm{r} = \frac{\mathrm{l}^2 + \mathrm{z}^2}{2\mathrm{z}}. \tag{2.9}$$

Jeho dosazením do přechozí rovnice (2.9) dostaneme vztah pro výpočet mechanického napětí ve vrstvě ve tvaru [3]

$$\sigma_{tot} = \frac{E}{6}\,\frac{d^2}{t}\,\frac{2\mathrm{z}}{\mathrm{l}^2 + \mathrm{z}^2}. \tag{2.10}$$



Obrázek 2: Schématické znázornění měřených veličin

Rovnice (2.9) a (2.10) pro výpočet mechanického napětí jsou platné pouze v případě, že je deponovaná vrstva velmi tenká a tloušťka podložky d je mnohonásobně menší než hodnota poloměru křivosti$r$. Vlastnosti kovaného niklu jsou velmi podobné vlastnostem oceli, převážně pak Youngův modul pružnosti[2]. Lze předpokládat, že i deponovaná tenká vrstva niklu bude mít podobné vlastnosti jako ocel. Rovnice pro výpočet celkového napětí se tedy dají použít s dobrou aproximací a bez vzniku výrazných chyb i pro deponované vrstvy niklu o větších hodnotách t.
Stoneyova rovnice byla odvozena za následujících předpokladů: konstantní tloušťka podložky, rovinnost nebo sféričnost povrchu podložky, stejný Youngův modul pružnosti podložky a nanesené vrstvy. Byla odvozena pro výše popsaný případ nosníku. V praxi se však obecně používá i pro případy, kdy zmíněné předpoklady splněny nejsou. Běžně se využívá pro výpočet mechanického napětí v tenkých vrstvách deponovaných na rotačně symetrických či obdélníkových nebo čtvercových podložkách. Používá se i v případech, kdy materiál podložky a tenké vrstvy mají rozdílné Youngovy moduly pružnosti nebo pro výpočet mechanického napětí ve vrstvách nanesených na podložce s nehomogenní tloušťkou a zakřiveným povrchem.

[2] Při srovnání hodnot Youngova modulu pružnosti uvádí Mr. G. G. Stoney hodnotu pro nikl 2 100 000 Kg/cm^2 (přibližně 205,9 Gpa), u hodnoty pro ocel se odkazuje na (EWING, James Alfred. The strength of materials. The University Press, 1906.) který udává střední hodnotu 2 100 000 Kg/cm^2. V katalogu na [4] uvádí, že hodnota Youngova modulu pružnosti pro nikl se pohybuje v rozmezí 190 až 220 Gpa.

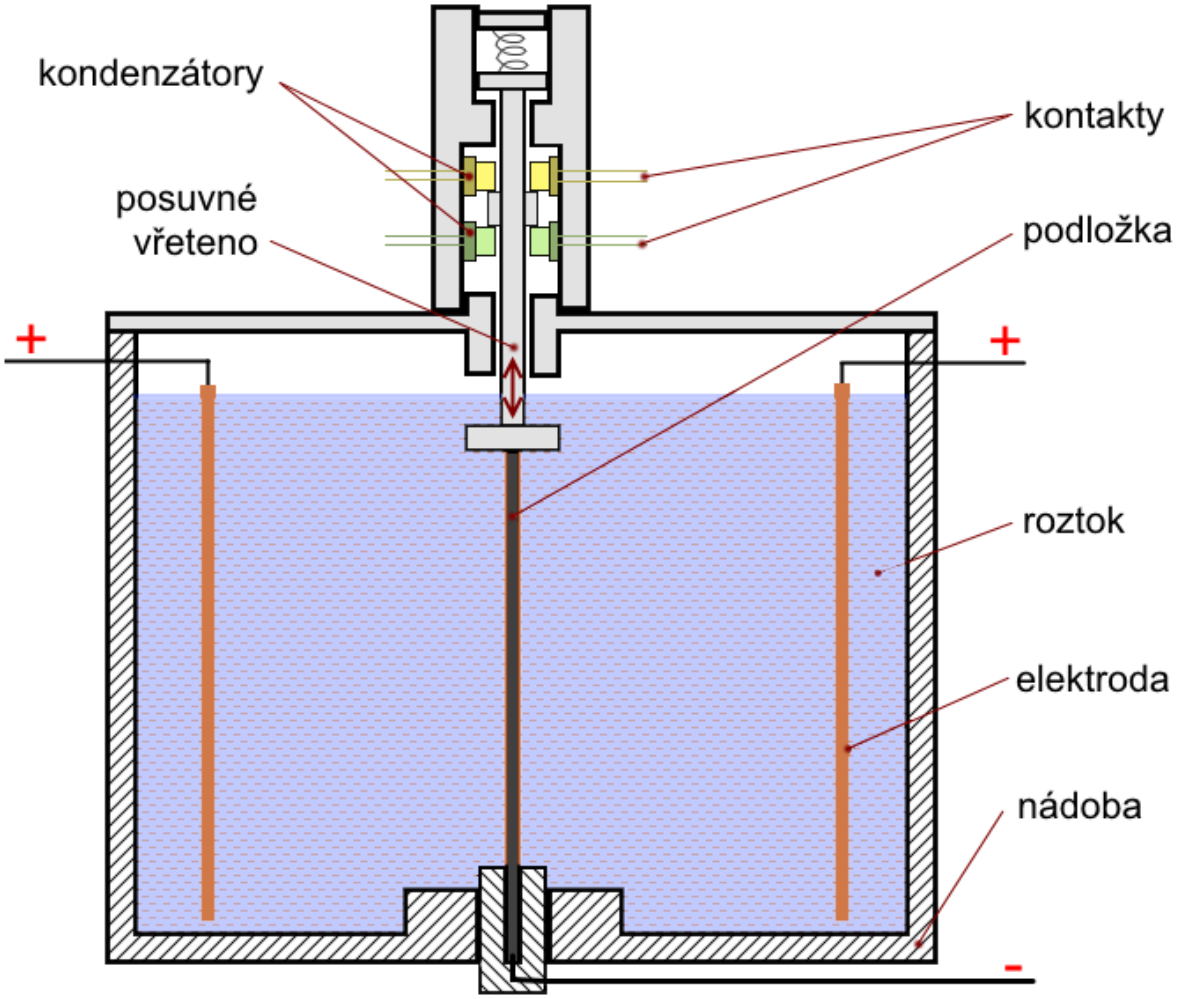
3 Způsoby měření napětí

Následující kapitola se věnuje přehledu některých metod pro měření mechanického napětí v tenkých vrstvách a jejich srovnání. Důležitým rysem každé metody je její použitelnost pro in-situ měření, které je pro vývoj technologií depozic tenkých vrstev stále více využíváno z důvodu stárnutí vrstev. Při tomto procesu dochází k relaxaci a poklesu celkového napětí vzniklého při depozici vrstvy a vlivem uskladnění či manipulace se zkoumanými vrstvami se v celkovém mechanickém napětí začne projevovat převážně složka σ_{ext} (externí napětí). Tato skutečnost vede k problémům při vyhodnocování mechanického napětí vyniklého v tenkých vrstvách při jejich depozici.

3.2.1 Měření extenzometrem

Při deponování vrstvy pouze z jedné strany podložky se celkové mechanické napětí ve vrstvě projeví prohnutím podložky, jak ukazuje rovnice (2.9). Při deponování druhé vrstvy na opačnou stranu podložky, dojde opět k prohnutí vyvolanému celkovým mechanickým napětím v této druhé vrstvě, a to v opačném směru, pokud v ní vzniká napětí stejného charakteru jako ve vrstvě první (tlakové nebo tahové) a stejném směru, pokud je charakter napětí v obou vrstvách rozdílný. Průhyb podložky vyvolaný druhou vrstvou mění složku σ_{ext} (externí napětí) celkového mechanického napětí. Při takovéto postupné depozici vrstev lze měřit celkové napětí pomocí změny poloměru křivosti před a po depozici vrstev. Pokud se ale tenké vrstvy na obou stranách nanášejí současně a jde o stejný druh vrstev, pak i poloměry křivosti průhybů vyvolaných jednotlivými vrstvami mají stejné hodnoty, ale opačné znaménko a průhyb systému podložka-vrstvy se navzájem vyruší. Podložka i po depozici zůstává rovinná. Mechanické napětí v obou tenkých vrstvách je stále přítomno, jeho velikost však nelze určit pomocí rovnice 2.1.9. Toto napětí se projeví pouze zkrácením nebo prodloužením podložky podle charakteru napětí vyvolaného ve vrstvách. Prodloužení nebo zkrácení lze měřit pomocí extenzometru, jak je znázorněno na obrázku 3, a naměřené hodnoty následně přepočítat na hodnoty mechanického napětí ve vrstvách.

Měření pomocí extenzometru je jedno z mála druhů měření, pomocí kterého se dá mechanické napětí ve vrstvách deponovaných na podložku výše popsaným způsobem jednoduše vyhodnocovat. Jeho velkou nevýhodou je ale značné ovlivnění naměřených hodnot při změně teplot okolního prostředí v důsledku různé tepelné roztažnosti materiálů podložky a vrstev. Vliv této tepelné roztažnosti se dá jistým způsobem kompenzovat, ale měření mechanického napětí v tenkých vrstvách touto metodou pak nezaručuje přesné výsledky [4].



Obrázek 3: Schématické zobrazení extenzometru. Převzato s úpravami z [5]. Extenzometr se skládá z posuvného vřetene, které je tlačeno pružinou proti měřenému vzorku (podložce). Změna délky podložky vyvolá posuv vřetene, na něj jsou připevněny dvě tenké destičky zasouvající se mezi desky kondenzátoru, tím je vyvolána změna napětí na kondenzátorech, ze které je možné určit změnu polohy vřetena.

3.2.2 Měření pomocí interferometrie

3.2.2.1 Interferometr s hranolem z taveného křemene

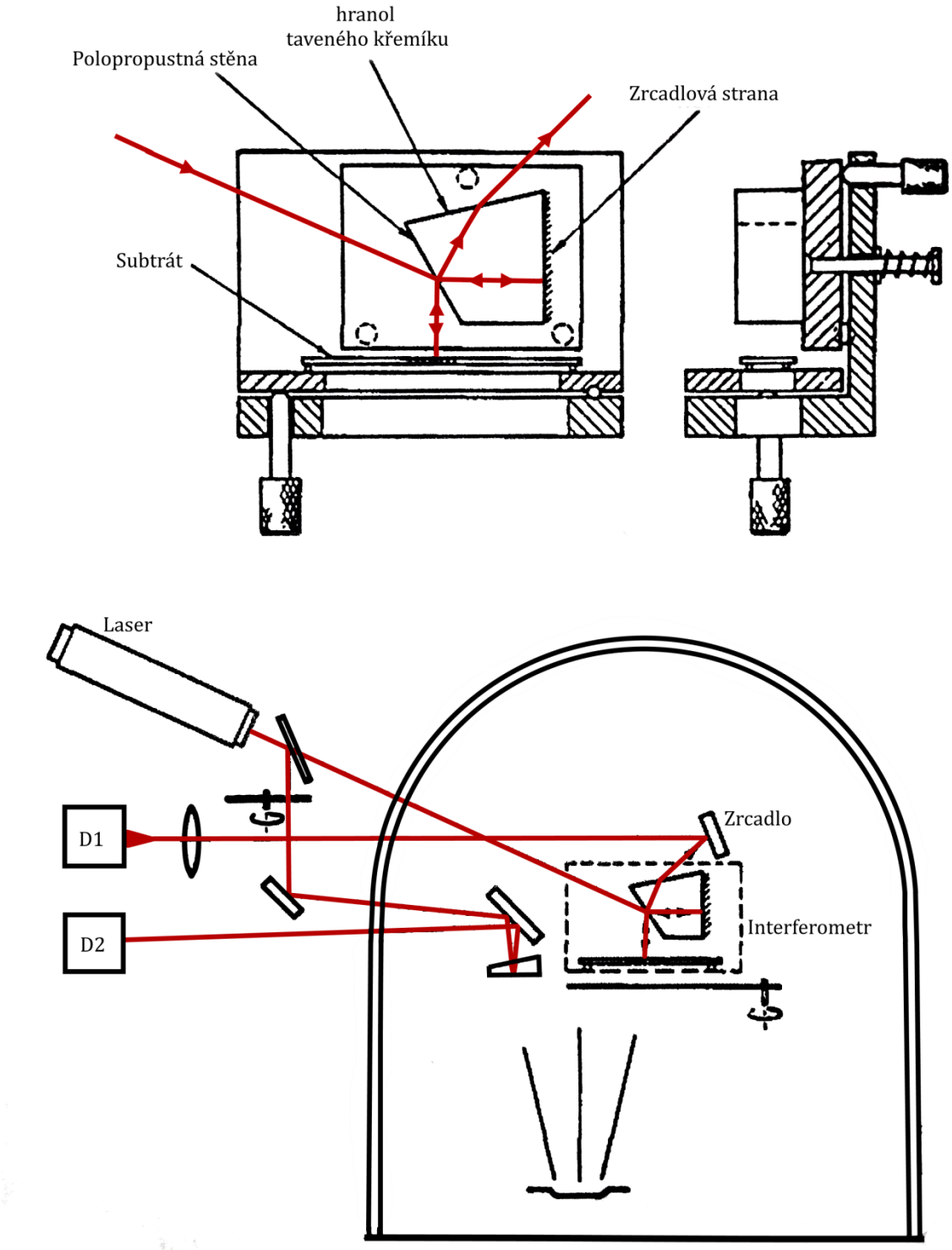
Prohnutí systému vrstva-podložka (vzorku) lze také měřit pomocí různých typů interferometrů. Na obrázku 4 je schéma interferometru, který byl použit pro in-situ měření mechanického napětí [6] v tenké vrstvě deponované na plátku taveného křemene o rozměrech 44,5x7,6 mm a tloušťce 0,18 mm. Laserový svazek je rozdělen na dvě stopy polopropustnou stěnou hranolu z taveného křemene. Referenční větev tvoří zadní zrcadlová stěna hranolu, od které se svazek odrazí, prochází hranolem až k polopropustné přední stěně, od které se odrazí nahoru a vychází z hranolu přes horní stěnu. V měřící větvi se laserový svazek odráží od přední strany hranolu na vzorek, od něj se odráží zpět a prochází polopropustnou přední stěnou přes hranol a vystupuje horní stěnou. Hranol je navržen tak, aby laserové svazky obou větví dopadaly při výstupu na horní stěnu pod Brewsterovým úhlem. Díky tomu se laserový svazek ani z jedné větve neodráží od vrchní plochy zpět do hranolu a nenarušuje interferenční obrazec. Laser je lineárně polarizovaný se směrem

polarizace natočeném v potřebném úhlu. Na výstupu z hranolu jsou oba laserové svazky nasměrovány zrcadlem na čočku, která Interferenční obrazec zobrazí na detektor D1. Vzorek v měřící větvi je umístěn pod hranolem, je položen na tříbodovém uložení, aby se mohl volně prohýbat a předešlo se nárůstu σ_{ext} (externího napětí) v důsledku gravitace. Uložení vzorku i křemíkového hranolu je upevněno tříbodovým kinematickým uložením, které umožňuje naklápění kolem dvou os. Soustava vzorek-hranol má dostatečný počet stupňů volnosti pro zajištění přesného nastavení uhlů. Vzájemné výškové nastavení hranolu vůči podložce není potřebné. Koherenční délka použitého laseru je velká vzhledem k rozměrům interferometru a rozdíl v optických vzdálenostech, které laserový svazek urazí v jednotlivých větvích, nepřekročí koherenční délku. Pro zvýšení přesnosti měření během začátku depozice byl křemenný hranol vůči vzorku nakloněn pod takovým úhlem, aby v interferenčním obrazci vzniklo několik světlých proužků.

V dolní části obrázku 4 je znázorněno schéma pro měření tloušťky deponované vrstvy v reálném čase. Bez tohoto údaje není možné mechanické napětí v tenké vrstvě vyhodnotit. Část primárního laserového svazku je odkloněna ještě před vstupem do interferometru a pomocí zrcadel nasměrována na monitorovací klín. Část tohoto laserového svazku se odrazí od přední strany klínu a část od zadní strany klínu, na kterou je při procesu měření deponována tenká vrstva stejně jako na vzorek. Oba tyto laserové svazky jsou nasměrovány do detektoru D2. Z rozdílných intenzit odraženého laserového svazku z přední a zadní strany klínu lze určit tloušťku tenké vrstvy na jeho spodní straně, která ovlivňuje její odrazivost. Pokud by monitorovací klín byl planparalelní deskou, pak by oba laserové svazky na detektoru dopadaly na stejné místo a vytvořily by interferenční obrazec. V takovém případě by bylo obtížné určit poměr v intenzitách jednotlivých svazků.

U takto uspořádaného interferometru je výhodou odolnost proti teplotním změnám okolního prostředí díky nízké teplotní roztažnosti taveného křemene, ze kterého je hranol vyroben. Při použití laserového svazku s malým průměrem není interferenční obrazec ovlivněn nerovnostmi povrchu podložky[6].

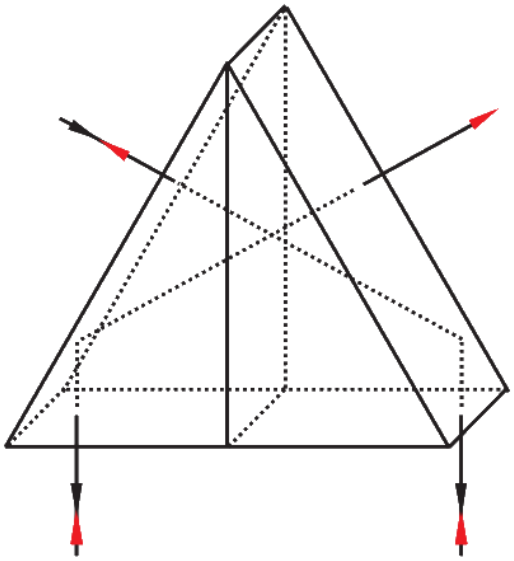
Velkou nevýhodou popsané metody je pak narušování interferenčního obrazce vibracemi interferometru. Pokud amplituda vibrací překročí polovinu vlnové délky světla použitého laseru, nastane úplné rozmazání a nečitelnost interferenčního obrazce [6].



Obrázek 4: V horní části obrázku je uvedeno schéma interferometru, v dolní části obrázku pak schéma znázorňující umístění interferometru v depoziční komoře a princip měření tloušťky tenké vrstvy během jejího růstu. S úpravami převzato z [6].

3.2.2.2 Kosterův interferometr

Další možností měření mechanického napětí v tenkých vrstvách je použití Kosterova interferometru. V něm se využívá Kosterův hranol. Ten je složen ze dvou hranolů s vrcholovými úhly 30°, 60°a 90° vyrobenými s velkou přesností, které jsou stmeleny k sobě. Mezi hranoly je vrstva, která vytváří polopropustnou plochu, na které se část příchozího laserového svazku odráží do levé části hranolu a část prochází do pravé části hranolu. Ze spodní strany hranolu (znázorněno na obrázku 5) pak vycházejí dva laserové svazky, které se od měřeného povrchu umístěného pod hranolem odrazí, prostupují zpět hranolem a rekombinované vycházejí z jeho pravé stěny. Optická dráha obou větví v Kosterově hranolu je stejná pro průchod před dopadem na měřící plochu i pro průchod po dopadu na měřenou plochu.



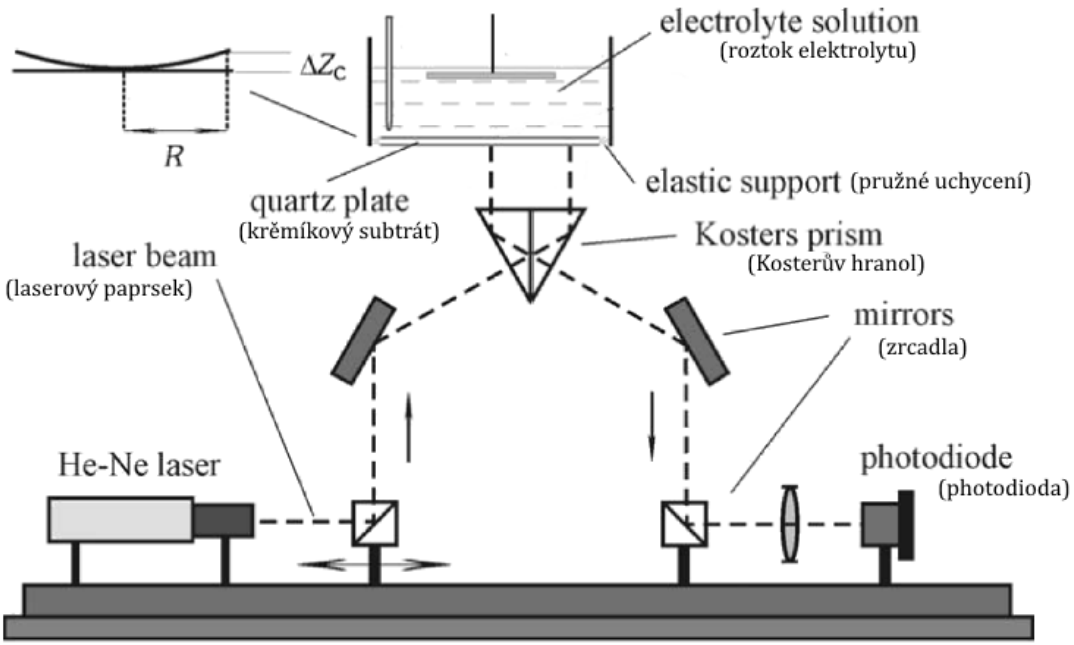
Obrázek 5: Schéma Kosterova hranolu a trasy laserového svazku, *převzato z* [7].

Při měření poloměru křivosti křemenné podložky vzorku se nepoužívá žádná referenční plocha (jak je u většiny interferometrů běžné), ale oba laserové svazky dopadají na měřený vzorek tak, jak je znázorněno na obrázku 6. Po zpětném průchodu Kosterovým hranolem a rekombinaci se laserový svazek pomocí zrcadel nasměruje na detektor. Křivost podložky se vyhodnocuje z rozdílu optických drah v jednotlivých větvích, který je dán právě křivostí podložky a vytváří interferenční proužky v obrazci zachyceném detektorem. U tohoto typu interferometru je důležité, aby vstupní laserový svazek dopadal kolmo na vstupní plochu Kosterova hranolu. Z tohoto důvodu obsahuje interferometr větší počet zrcadel ve srovnání s jinými druhy interferometrů (viz obrázek 6).

Výhodou tohoto typu interferometru je vysoká odolnost proti mechanickým vibracím (vzájemný translační pohyb Kosterova hranolu a měřeného vzorku. Další výhodu je, že oba laserové svazky dopadají na povrchy se stejnou odrazivostí (mluvíme o případu uniformního studovaného vzorku). Díky tomu má výstupní interferenční obrazec nejlepší možný kontrast bez ohledu na různou odrazivost různých měřených vzorků.

Nevýhodu tohoto typu interferometru je vysoká cena Kosterova hranolu která se pohybuje přibližně od 40 000 Kč pro hranol o rozměrech 2 cm x 1 cm až

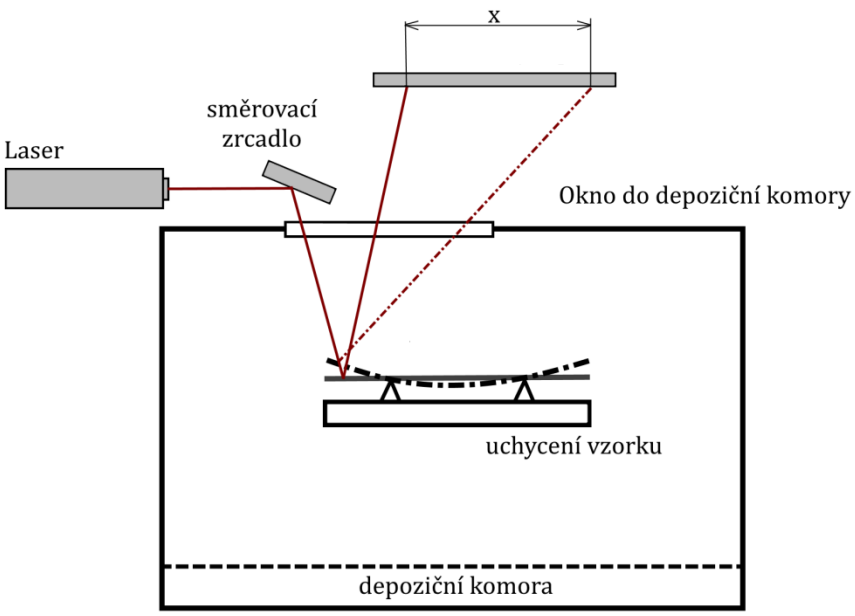
po 180 000 Kč pro hranol o rozměrech 10 cm x 8 cm. Velikost hranolu významně přispívá ke kvalitě a přesnosti měření. U větších velikostí hranolu bude ve výstupním interferenčním obrazci více proužků (laserové svazky mohou dopadat na vzorek ve větší vzájemné vzdálenosti, což vede k většímu rozdílu v jejich optických drahách z důvodů větší odchylky z vzorku od referenční roviny)



Obrázek 6: Schéma Kosterova interferometru při měření prohnutí podložky. Převzato s úpravami z [5].

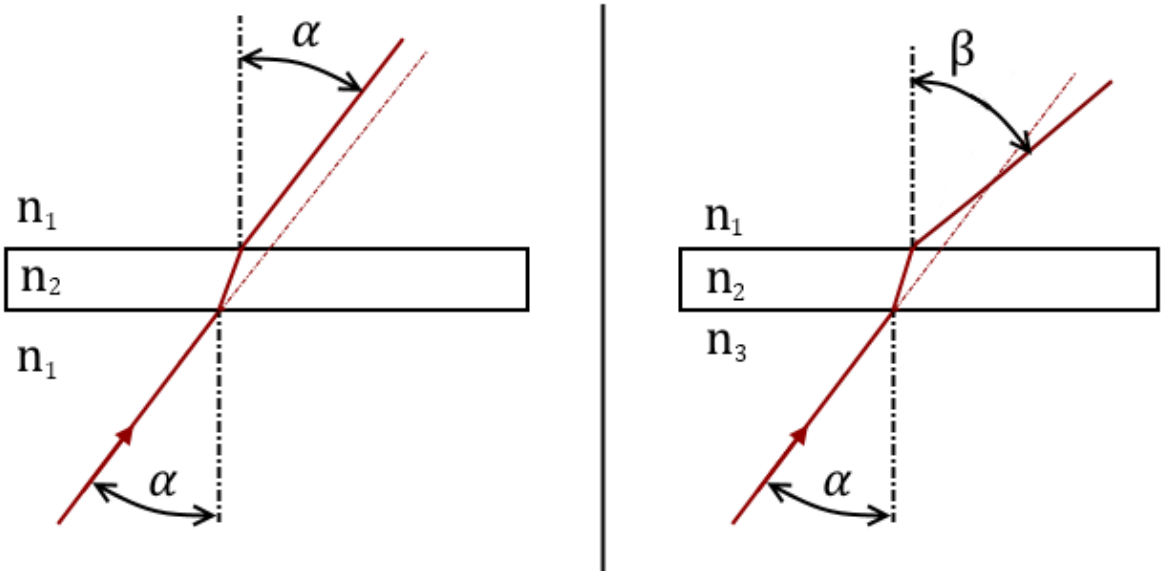
3.2.3 Měření pomocí odklonu laserového svazku

Metoda hojně využívaná zejména v počátcích měření mechanického napětí v tenkých vrstvách pro svou konstrukční jednoduchost. Laserový svazek je nasměrován na vzorek a od něj se odráží na detektor, který zaznamená jeho pozici. Při změně poloměru křivosti vzorku se laserový svazek odrazí na jiné místo na detektoru (jak je vidět na obrázku (7) a ze změny polohy jeho dopadu na detektor lze určit změnu v poloměru křivosti odrážejícího povrchu. Pro úspěšné vyhodnocení je potřeba znát přesně vzdálenost mezi vzorkem a detektorem. Tu lze jednoduše určit měřením dvou vzorků s různým známým poloměrem křivosti.



Obrázek 7: Schéma principu měření poloměru křivosti prohnutí podložky za pomoci odklonu laserového svazku

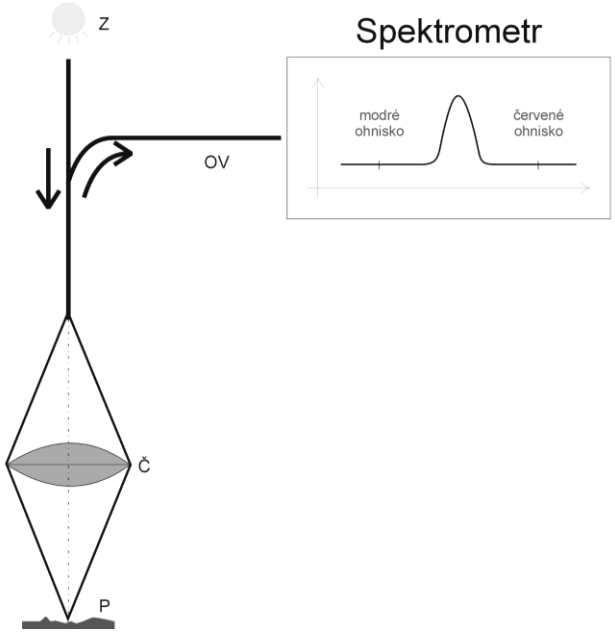
I přes celkovou jednoduchost metody je třeba vzít v úvahu další vlivy při in-situ měření, které se společně se změnou poloměru křivosti měřeného vzorku podílí na změně polohy laserového svazku na fotodetektoru. Laserový svazek vstupuje do komory přes vstupní okno, které má rozdílný index lomu než okolní prostředí a změní trajektorii svazku. Celková konstrukce může být navržena tak, aby vstupní svazek dopadal kolmo na vstupní okno. Po odrazu od zakřiveného měřeného vzorku už není možné, aby i výstupní svazek dopadal kolmo. V takovém případě dojde k posunutí svazku. V případě, že je v depoziční komoře prostředí jiného indexu lomu, než prostředí v okolí depoziční komory, dojde ke změně úhlu svazku na rozhraní okna a prostředí a svazek dopadá na jinou pozici v detektoru (viz obrázek 8). Pokud je měřený vzorek ponořen v nějaké kapalině a laserový svazek prochází rozhraním kapalina-prostředí, je nutno započítat i změnu úhlu šíření svazku vlivem tohoto rozhraní. Opomenutí zmíněných změn trasy laserového svazku může vést k chybě ve stanovení velikosti napětí až 30% [4].



Obrázek 8: Znázornění změny trajektorie laserového svazku při průchodu oknem do depoziční komory. Vpravo je změna trajektorie pro prostředí v depoziční komoře s vyšším indexem lomu, než je index lomu prostředí vně komory. Tenká červená čára znázorňuje trajektorii laserového svazku bez přítomnosti okna.

3.2.4 Měření optickým profilometrem

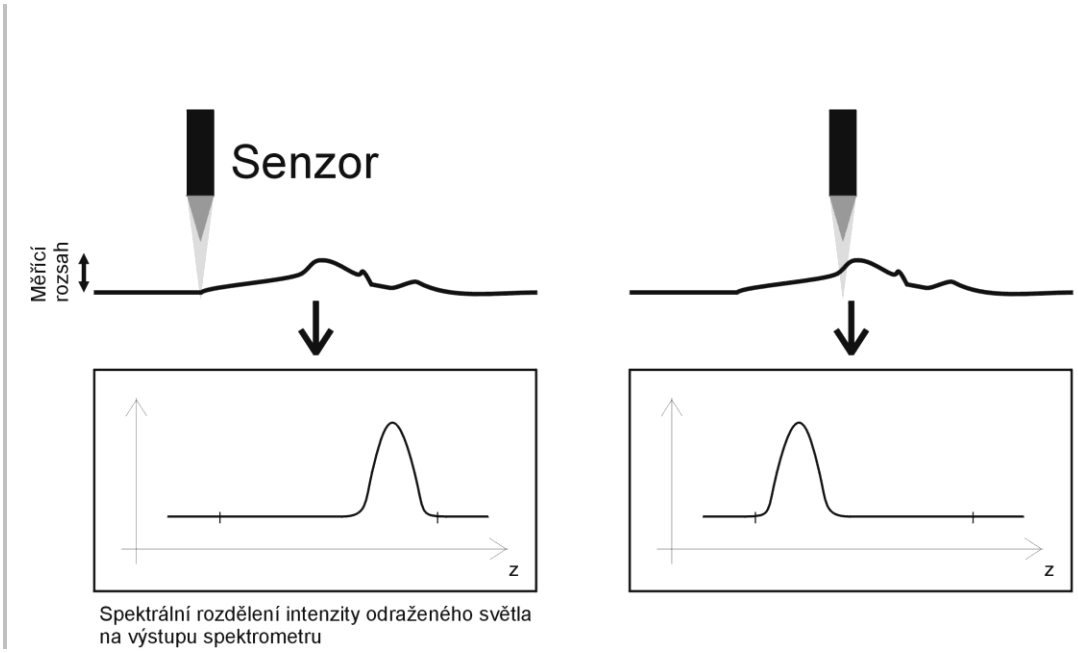
Optický profilometr MicroProf FRT je přístroj, který je navržen primárně pro měření drsnosti povrchů. Lze jej však použít i pro určování tvaru povrchu o relativně velké ploše (až do 10 cm x 10 cm). Princip jeho činnosti je znázorněn na obrázku (9).



Obrázek 9: Princip činnosti optického profilometru MicroProf FRT v základním provedení s optickým senzorem CHR 150 N. *Z*- zdroj bílého světla (halogenová výbojka), *OV* – optické vlákno, *Č* – čočka s velkou chromatickou aberací, *P* - studovaný povrch, *Spektrometr* - analyzuje spektrální rozdělení intenzity světla odraženého od povrchu. *Převzato z* [8].

Zdroj Z poskytuje bílé světlo, to je vedeno pomocí optického vlákna na spojnou čočku s velkou známou chromatickou vadou. Jednotlivé monochromatické složky

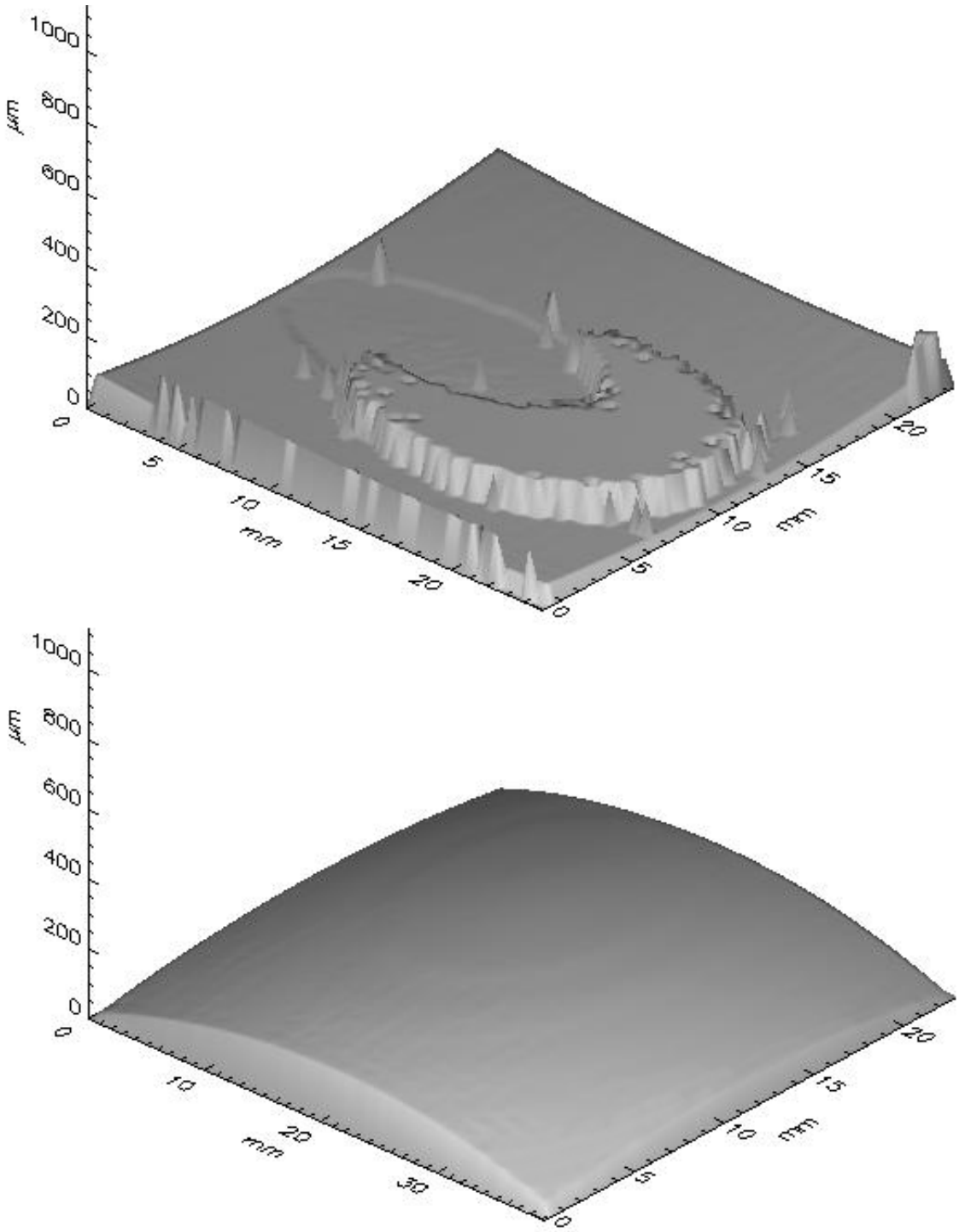
světla jsou fokusovány do různých výškových úrovní vůči referenční rovině (definované výrobcem profilometru). Složka, která je fokusována na zkoumaný povrch, se na rozdíl od ostatních složek odráží nejlépe zpět do čočky a prostupuje optickým vláknem až k spektrometru. Tato složka světla vystupujícího ze spektrometru je identifikována pomocí její nejvyšší intenzity řadou CCD prvků. Tato informace je pomocí kalibrační tabulky převedena na výšku bodu měřeného povrchu nad zmíněnou referenční rovinou. Měření je nedestruktivní a bezkontaktní. [8].



Obrázek 10: Princip činnosti senzoru CHR 150 N, *převzato z* [8].

Měřený vzorek je umístěn na stolku se dvěma navzájem kolmými posuvy řízenými procesorem navrženým speciálně k tomuto účelu. Procesor pohybuje stolkem v jedné nebo ve více rovnoběžných osách se stejnou vzájemnou vzdáleností pod nepohybujícím se senzorem (znázorněno na obrázku 10) a umožňuje tak vyhodnocování výšky jednotlivých navzájem stejně vzdálených bodů na těchto osách [8] .
Výsledek měření má formu vektoru či matice hodnot výškových nerovností povrchu.
Z hodnot prvků zmíněné matice je následně vytvořen 3D model povrchu, kterým pomocí softwaru přístroje můžeme vést libovolný řez a z něj vyhodnocovat příslušný lokální poloměr křivosti povrchu. Problémové pro měření jsou průhledné tenké vrstvy nebo tenké průhledné podložky. U takových senzor náhodně detekuje jako zaostřené horní či spodní rozhraní tenké vrstvy či podložky a z měření není možné s jistotou vyhodnotit poloměr křivosti vzorku (viz obrázek 11). Tento problém je možné odstranit vhodnou volbou výškové polohy optického senzoru profilometru. Tu však nejde nastavit pomoví běžných postupů[3], ale pouze manuálně pro každý měřený vzorek zvlášť. Proces manuálního doostření může přinést velice kvalitní výsledky, je však časově hodně náročný. To prodlužuje už tak poměrně vysokou dobu měření jednoho vzorku a značně komplikuje měření většího počtu vzorků.

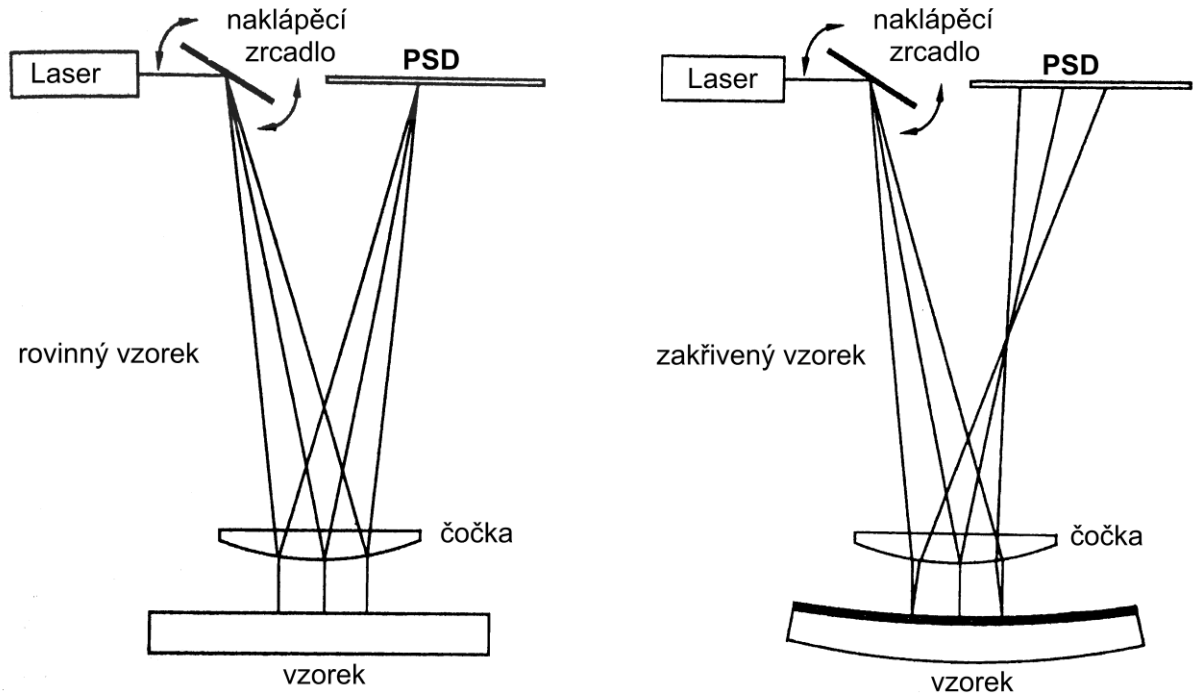
[3] K optickému systému je přidána kamera s objektivem. Kamera je zaostřena do roviny, ve které přístroj měří. Optický systém se automaticky přibližuje k povrchu, dokud se na obrazu pořízeného kamerou nezobrazí ostře. V této poloze je zaostřen i optický senzor profilometru.



Obrázek 11: V horní části se nachází 3D mapa povrchu měřeného při špatném zaostření. Na modelu lze rozpoznat tři povrchy. Nejvyšší povrch přísluší zadní stěně podložky. Povrch ve střední výšce náleží rozhraní tenké vrstvy a podložky, nejnižší povrch patří přední straně tenké vrstvy. První měření a zaostřování bylo provedeno na čtverci o rozměrech 25x25 mm se skenováním 25 bodů na 25 čar. Po doostření byl vzorek změřen s rozlišením 400 bodů na 250 čar v celé ploše 24 x 40 mm, jak je možné vidět v dolní části obrázku. Po doostření byl detekován pouze jeden povrch. Během zaostřovacích testovacích měření se ukázalo, že daný vzorek je snáze měřitelný v poloze s vrstvou nejblíže k senzoru.

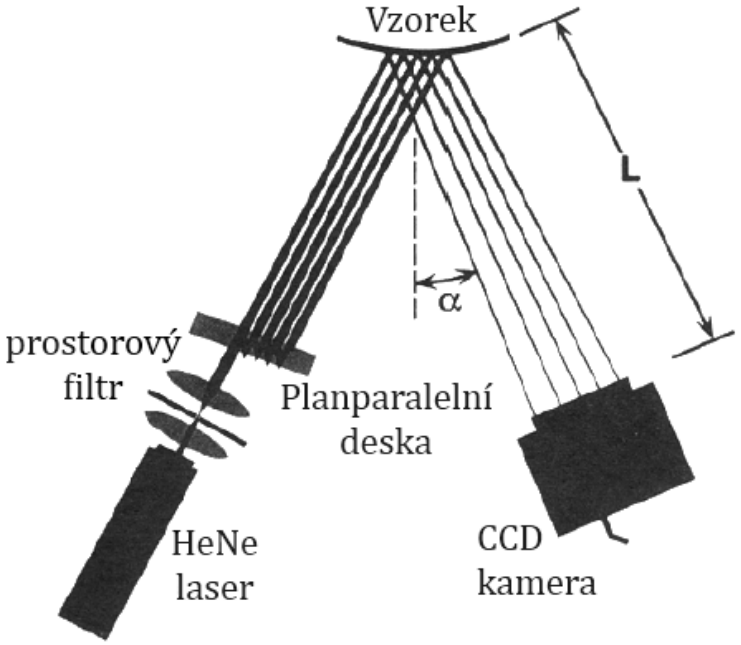
3.2.5 Měření deflektometrem

Deflektometr je přístroj založený na principu metody měření odklonu laserového svazku. Na rozdíl od této metody se pro získání více informací a podrobnější mapy povrchu měří průhyb vzorku ve více místech. Toho lze docílit dvěma různými způsoby. V prvním z nich se laserový svazek pohybuje po povrchu měřeného vzorku. Pohybovat se může vzorek pomocí řízených posuvů ve směru tečném s rovinou povrchu vzorku, nebo je možné měnit místo dopadu laserového svazku na vzorku pomocí naklápění směrovacího zrcadla, jak je znázorněno na obrázku (12).



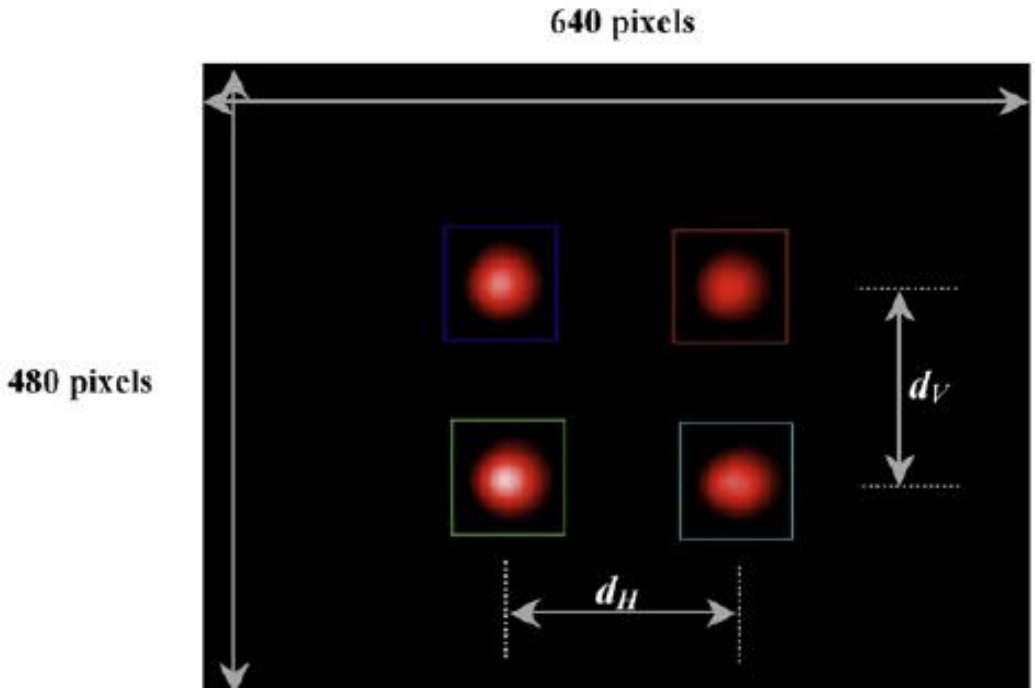
Obrázek 12: Schéma skenovacího deflektometru *převzato z* [9]. PSD (Position-sensitive Photodetector) je detektor zaznamenávající polohu dopadu laserového svazku.

U takovéhoto skenovacího konstrukčního uspořádání není potřeba žádných speciálních optických prvků. Pokud by posuvy či naklápění zrcadel nebyly řízeny elektronicky a propojeny společně s PSD s vyhodnocovacím zařízením, měření by mohlo býtznačně časově náročné. Skenovací metoda není příliš vhodná pro in-situ měření Poloměr křivosti vzorku v různých místech se během depozice vrstvy mění, jelikož tenká vrstva během depozice nepřetržitě roste a mění poloměr křivosti vzorku. Druhý způsob je založen na rozdělení primárního laserového svazku na více rovnoběžných svazků, které dopadají na různá místa vzorku současně. Jako dělič primárního svazku se nejčastěji používá planparalelní deska, pomocí které lze vytvořit dva a více rovnoběžných svazků. Ty se odrážejí od povrchu měřeného vzorku na čip CCD kamery (viz obrázek 13).



Obrázek 13: Schéma multisvazkového deflektometru. Převzato s úpravami z [10].

Hlavní výhodou takového konstrukčního uspořádání deflektometru je skutečnost, že deformace vzorku se měří ve všech místech dopadu laserových svazků na vzorek ve stejný okamžik. To je významné zejména v případě in-situ měření, kdy je křivost ve všech měřených bodech určováno pro stejnou tloušťku deponované vrstvy. Další výhodou deflektometru s více rovnoběžnými laserovými svazky ve srovnání se skenovacím typem deflektometru pro běžná měření před procesem nebo po procesu depozice vrstvy je absence pohyblivých částí, jako jsou posuvy vzorku nebo otáčení směrovacího zrcadla. Naopak nevýhodou v případě použití jedné planparalelní desky jako děliče je skutečnost, že všechny laserové svazky dopadající na vzorek leží v jedné rovině. To znamená, že deflektor měří poloměr křivosti vzorku (a následně se vyhodnocuje mechanické napětí pouze v jednom řezu). Tuto nevýhodu je možné kompenzovat pomocí posuvu vzorku nebo naklápění planparalelní desky. Tímto by se však ztratila hlavní výhoda oproti skenovacímu typu.
Další možností je pomocí dvou planparalelních desek vytvořit matici rovnoběžných svazků. Pak je možné měřit poloměr křivosti vzorku ve více místech vzorku současně [11] (viz obrázek 14).

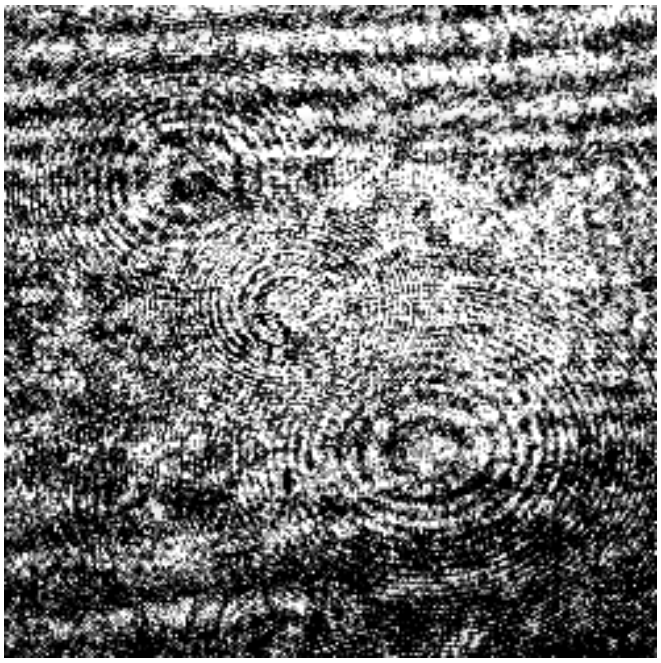


Obrázek 14: Zobrazení laserových svazků na CCD čipu kamery pro matici 2x2. Poloměr křivosti se vyhodnocuje s posunu dvojice bodů d_V a d_H, *převzato z* [11].

3.3 Srovnání metod

Metoda **měření extenzometrem** z uvedených metod vyhodnocuje mechanické napětí s nejmenší přesností. V praxi má však své místo pro svou jednoduchost a možnost měřit napětí u vrstev, které jsou nanášeny na obě strany substrátu zároveň. Vyhodnocování napětí z prodloužení substrátu je složitější, než v případě vyhodnocování ze změny poloměru křivosti.

Metoda **interferometrie** přináší vysokou přesnost při měření poloměru křivosti vzorku. Problém je ale měření průhledných vzorků, při kterém může docházet k interferenci nejen svazku odraženého na měřeném povrchu a referenčním povrchu, ale i odraženém na zadním rozhraní podložky či případně zadním rozhraní průhledné deponované tenké vrstvy. Při menších poloměrech křivosti vzorku je z interferenčního obrazce velice obtížné vyhodnotit křivosti povrchu vzniklé mechanickým napětím v tenké vrstvě. Na obrázku 15 je znázorněn interferenční obrazec právě takové podložky a vrstvy. Podélné proužky horizontálního charakteru vznikají klínovitostí podložky (objevovaly se v interferogramu podložky i před depozicí vrstvy) Tři uskupení interferenčních proužků kruhového tvaru vznikají interferencí svazků odražených od povrchu podložky, povrchu tenké vrstvy a rozhraní tenké vrstvy se svazky odraženými od předního povrchu referenční planparalelní desky (zadní povrch planparalelní deky je zmatněn). Interferometry je možné navrhnout v mnoha variantách podle potřeb, jako jsou typ měřené tenké vrstvy (průhledná nebo neprůhledná) či podmínky v depoziční komoře při in-situ měření. Experimentálně se také neprokázal vliv oken depozičních komor na proces měření ani v případě oken nízké optické kvality[5].



Obrázek 15: Interferenční obrazec pořízený na interferometru Askania za použití helium neonového laseru s vlnovou délkou 632,8 nm. Na obrázku je výřez o rozměrech 10x10 mm ze středu vzorku. (Kontrast obrazce byl upraven pro lepší rozeznatelnost po tisku)

Měření poloměru křivosti vzorku pomocí optického profilometru přináší několik výhod, které ostatní metody nemají. Z digitální mapy povrchu vzorku lze získat informace nejen o poloměru jeho křivosti, ale i o celkovém tvaru plochy. Díky tomu je možné určit, jestli se po depozici tenké vrstvy na podložku vzorek prohnul do kulového vrchlíku, elipsoidu nebo se vlivem špatné kvality podložky (zejména neuniformity podložky v tloušťce) či nějakých dalších neznámých důvodů zvlnil do obecně zborcené plochy, ze které napětí není možné vyhodnotit.
Značnou nevýhodou optického profilometru je doba měření jednoho vzorku, který je nutno pro vyhodnocení mechanického napětí ve vrstvě měřit dvakrát (před depozicí a po depozici vrstvy). Celková doba celkového měření jednoho vzorku se tak může snadno blížit několika hodinám. Komplikace se objevují u měření průhledných substrátů. Přístroj je nelze použít pro in-situ měření.
Metoda měření **odklonu laserového svazku** je z konstrukčního hlediska jednoduchá. To je její výhodou ve srovnání s metodami ostatními. Vykazuje však menší přesnost v určení poloměru křivosti studovaného vzorku. Proto může být vhodná pro první odhady mechanického napětí v tenkých vrstvách při vývoji nových technologií přípravy tenkých vrstev nových vlastností. Metoda je vhodná pro in-situ měření. v tomto případě je třeba dbát na správné započítání vlivu různých rozhraní (jako je okno do depoziční komory) na směr laserového svazku.

Metoda používající deflektometr je v současnosti nejpoužívanější metodou pro měření poloměru křivosti vzorku při vyhodnocování mechanického napětí v tenkých vrstvách. Přístroj je snadno modifikovatelný a přizpůsobitelný podmínkám pro různé depoziční procesy a je vhodný pro in-situ měření. Konstrukce přístroje bývá finančně nenáročná a oproti interferometrům má nižší nároky na kvalitu použitého laseru.

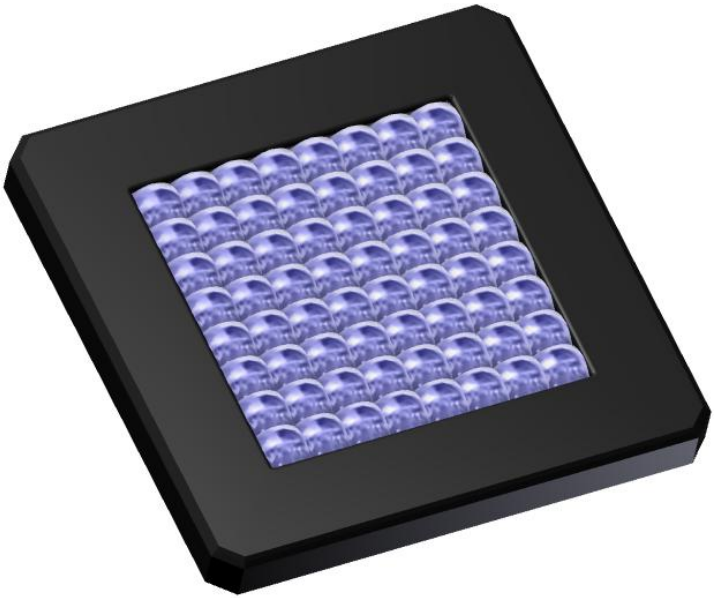
4. Návrh konstrukce deflektometru

4.2 Možné varianty

Prvním krokem při návrhu deflektometru je zhodnocení výhod a nevýhod dvou základních typů a výběr jednoho z nich.
Skenovací typ (viz kapitola 3.2.5) se pro rychlé a snadné měření neobejde bez elektronicky řízených posuvů vzorku nebo naklápění směrovacího zrcadla. Cena těchto posuvů v porovnání s ostatními komponenty potřebnými pro konstrukci je velká. Dalším nedostatkem tohoto typu je obtížné programování softwaru pro vyhodnocování křivosti, který musí provázat polohu vzorku nebo naklopení směrovacího zrcadla s polohou dopadu světelného svazku na detektor.
U multisvazkových defloktometrů není potřeba žádných řízených posuvů. Místo dopadu laserových svazků na vzorek je vždy známé a celkový proces měření je jednoduší a rychlejší. V konstrukci je nutno použít větší počet optických komponent, jejich cena s velkou pravděpodobností ale nepřesáhne cenu řízených posuvů.
S ohledem na předešlé výhody a nevýhody byla pro návrh deflektometru vybrána multisvazková verze přístroje. Tato verze může mít mnoho konstrukčních provedení, která se liší hlavně způsobem, jakým může být vícenásobný laserový svazek vytvořen. Ze všech možných způsobů byly vybrány tři. Deflektometr s maticí mikročoček, deflektometr s Powellovou čočkou a deflektometr s planparalelními deskami. Všechny tři typy byly důkladně zhodnoceny a porovnány. Nejslibnější z nich byl realizován ve formě laboratorní sestavy.

4.2.1 Deflektor s maticí mikročoček

Varianta deflektometru, u které je vícenásobný laserový svazek vytvořen pomocí dvou matic mikročoček. Matice mikročoček je optická sestava složená z čoček malých průměrů (většinou v řádech jednotek mm a menších), které jsou těsně uspořádány jedna vedle druhé (viz obrázek 16).

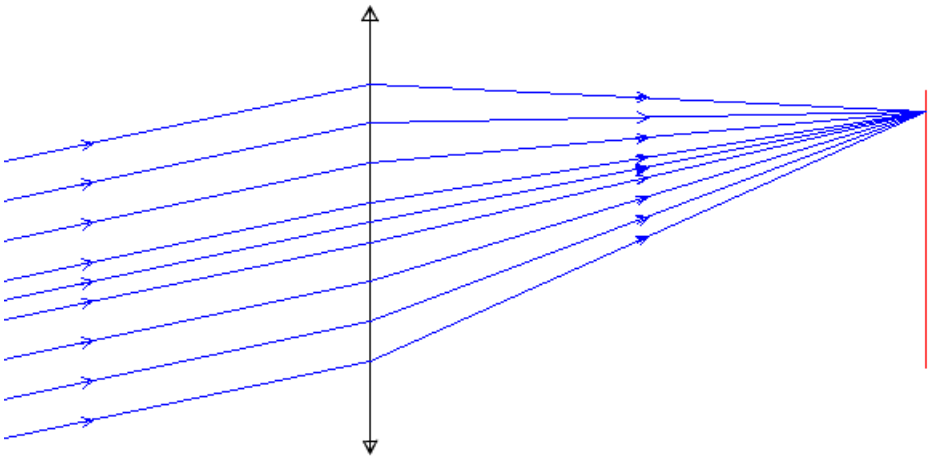


Obrázek 16: Matice mikročoček obsahující 8x8 malých čoček.

Laserový svazek vystupující z laseru nejdříve prochází prostorovým filtrem pro vytvoření čistého Gaussovského svazku. Za prostorovým filtrem je laserový svazek expandérem svazku rozšířen do většího průměru a nasměrován na první matici mikročoček, jak je znázorněno na obrázku 19. Každá čočka fokusuje část laserového svazku, která jí prochází, do ohniska na optické ose této čočky. Ohniskové vzdálenosti všech čoček v jedné matici jsou v tomto případě stejné a každá čočka má ohnisko na své vlastní optické ose. Za první maticí mikročoček je umístěna druhá matice mikročoček, pro kterou platí stejné předpoklady jako pro první. Čočky druhé matice mají kratší ohniskové vzdálenosti než čočky první matice. Matice jsou od sebe umístěny ve vzdálenosti, která je rovna součtu ohniskových vzdáleností jedné čočky první matice a jedné čočky druhé matice. Za druhou maticí každá její čočka vytvoří rovnoběžný paprsek. Počet paprsků je tedy roven počtu malých čoček, které jsou osvětleny laserovým svazkem vycházejícím z prostorového filtru. Průměr jednotlivých laserových svazků závisí na průměru čoček v jednotlivých maticích a poměru jejich ohniskových vzdáleností. Takto vzniklá matice laserových svazků je vyobrazena na obrázku 19 v modrém čtvercovém poli v jeho levé horní části. Matice paprsků je směrována na kubický dělič svazku (cube beamsplitter), tj. krychli, tmelenou ze dvou pravoúhlých trojúhelníkových hranolů z optického skla. V tmeleném rozhraní jsou nanesené vrstvy pro úpravu odrazivosti na rozhraní. Použitý dělič má poměr odražené a prošlé intenzity světelného paprsku na rozhraní dvou hranolů 0,5:0,5. Světelné svazky jsou děličem nasměrovány kolmo a od něj se odráží zpět na zmíněný dělič. Na rozhraní dvou hranolů uvnitř děliče se opět svazky dělí na odražené a prošlé. Prošlé svazky se čočkou fokusují na detektor (kameru).

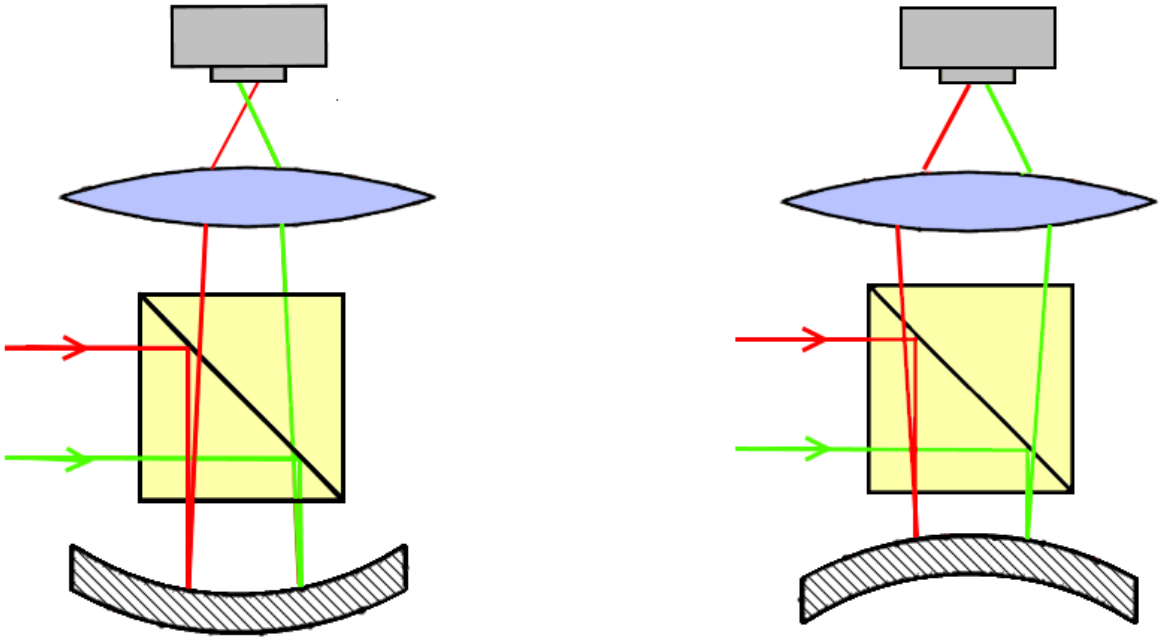
Výhodou popisované varianty deflektoru s maticemi mikročoček je velký počet laserových svazků dopadajících na vzorek. Díky tomu je možné vyhodnocovat poloměr křivosti v mnoha bodech zároveň. Z velkého počtu naměřených hodnot se dá snadno určit uniformita poloměru křivosti nebo případná zvlněnost povrchu.

Nevýhodou je stejná hodnota intenzity jednotlivých laserových svazků. Čočka fokusující svazky na kameru soustřeďuje všechny paprsky stejného směru do stejného místa, jak je znázorněno na simulaci v programu ZEMAX v obrázku 17.



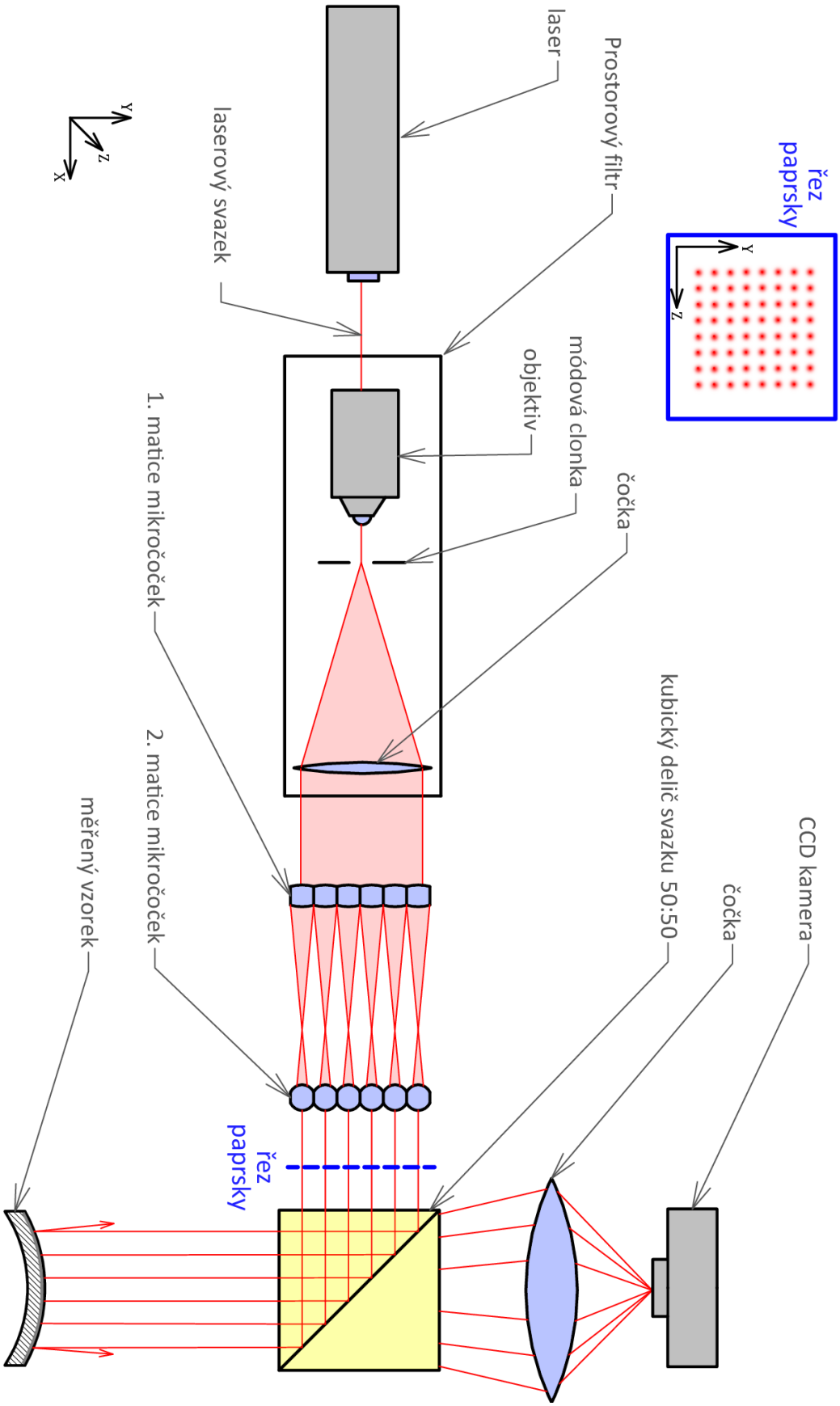
Obrázek 17: Trasa svazků procházejících čočkou při šikmém úhlu dopadu. Pro trasování byla použita ideální čočka (virtuální čočka, která nemá žádné zobrazovací vady) a paraxiální zobrazení. Svazky dopadají na čočku pod úhlem 12°.

Pro kladný a záporný poloměr křivosti měřeného vzorku o stejné absolutní hodnotě mají odražené svazky od vzorku stejnou hodnotu úhlu odrazu. Červený svazek v levé části obrázku 18 se odráží od měřeného vzorku pod stejným úhlem jako zelený svazek v pravé části obrázku. Po průchodu čočkou jsou oba svazky směrovány na stejné místo na kameře. Pokud by oba svazky měly stejnou intenzitu, není možné rozpoznat, který je který a z měření nebude možné určit konkávnost či konvexnost poloměru křivosti, nebude tedy možné určit charakter mechanického napětí, tj. zda toto napětí je tahové či tlakové.



Obrázek 18: Schéma odrazu svazků od vzorku a jejich následná fokusace na kameru. Vzorek vlevo i vzorek vpravo mají stejnou absolutní hodnotu poloměru křivosti. Červená a zelená barva svazku znázorňuje jinou hodnotu intenzity svazků. Pro lepší přehlednost je schéma vyobrazeno pouze pro chod dvou svazků.

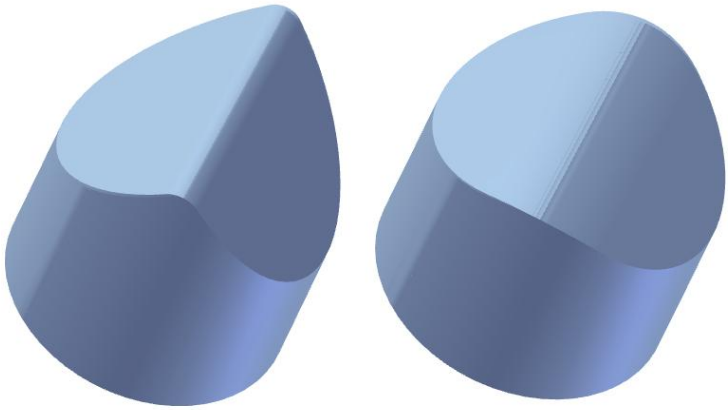
Pro některé aplikace může být důležitá pouze hodnota celkového mechanického napětí v tenké vrstvě bez potřeby znát i jeho charakter. Obecně však platí, že charakter napětí je neopomenutelná vlastnost. Zejména pak při deponování multivrstvého systému, u kterého ve vrstvách může vznikat napětí tahového i tlakového charakteru pro jednotlivé vrstvy v systému.



Obrázek 19: Schéma Deflektoru s pláty mikročoček

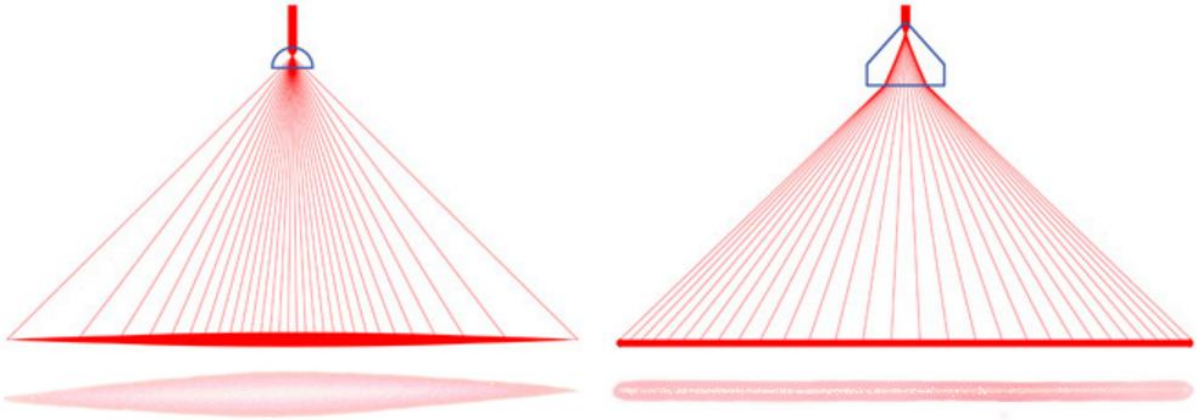
4.2.2 Deflektometr s Powellovou čočkou

Druhá varianta je založena na vytvoření dvou rovnoběžných laserových svazků s obdélníkovým průřezem pomocí Powellovy čočky a planparalelní desky. Powellova čočka je optické těleso válcového průřezu s přední stranou popsanou dvoudimenzionálním polynomem a zadní rovinnou stěnou (viz obrázek 20).



Obrázek 20: Model dvou různých Powellových čoček

Každá čočka je navržena pro konkrétní průřez dopadajícího laserového svazku s gaussovským rozložením intenzity. Čočkou je laserový svazek rozšířen pouze v jedné ose podobně, jako je tomu u cylindrické čočky. Na rozdíl od cylindrické čočky rozložení intenzity ve směru osy roztažení nemá gaussovský charakter, ale dá se považovat za rovnoměrné[4]. Trasy laserových svazků procházejících čočkou jsou znázorněny na obrázku 21.

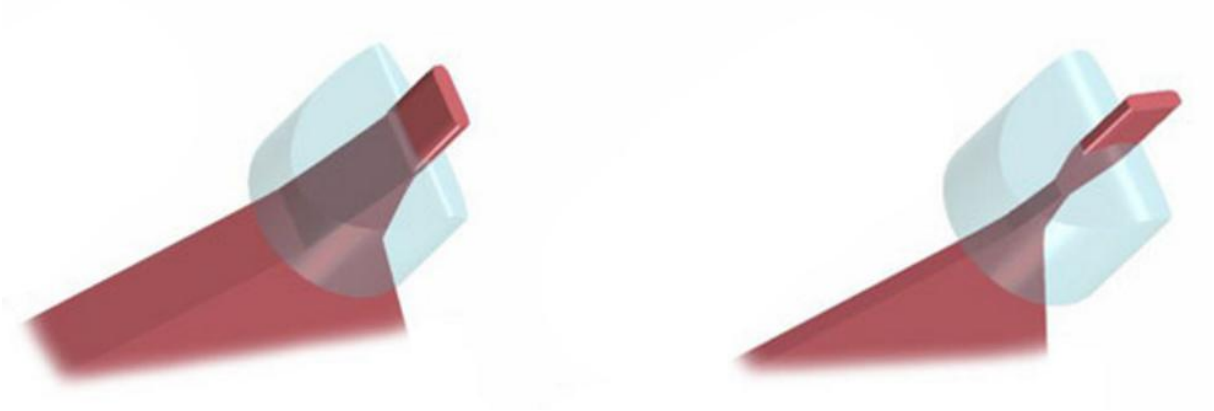


Obrázek 21: Srovnání tras procházejících svazků cylindrickou čočkou (vlevo) a Powellovou čočkou (vpravo) [12]. Pod trasovanými svazky je vyobrazení laserového svazku za jednotlivými čočkami zachyceném na stínítko [13].

Úhel svazků vystupujících z Powellovy čočky je dán její konstrukcí. Většina výrobců nabízí výstupní úhly o hodnotách 30°, 45°, 60° a 75°. Někteří výrobci nabízejí i kusovou výrobu na zakázku, kdy si zákazník může určit průřez laserového svazku, pro který je čočka navržena, a libovolný výstupní úhel. Šířka svazku ve směru

[4] Podle katalogů výrobců by se intenzita v podélném řezu neměla odchýlit od střední hodnoty o více než 10% .

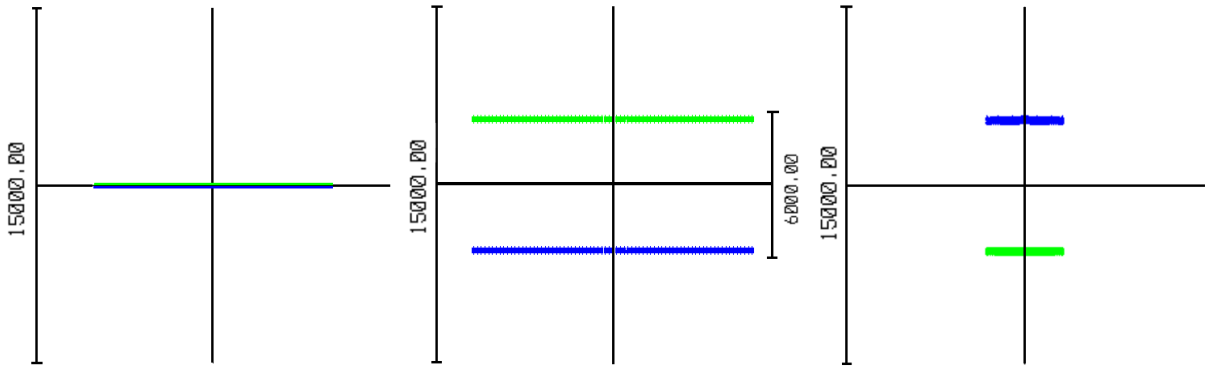
kolmém k směru roztažení je dána šířkou laserového svazku v příslušném směru vstupujícího do čočky, jak je znázorněno na obrázku 22.



Obrázek 22: Znázornění vlivu šířky dopadajícího svazku na výstupní svazek.

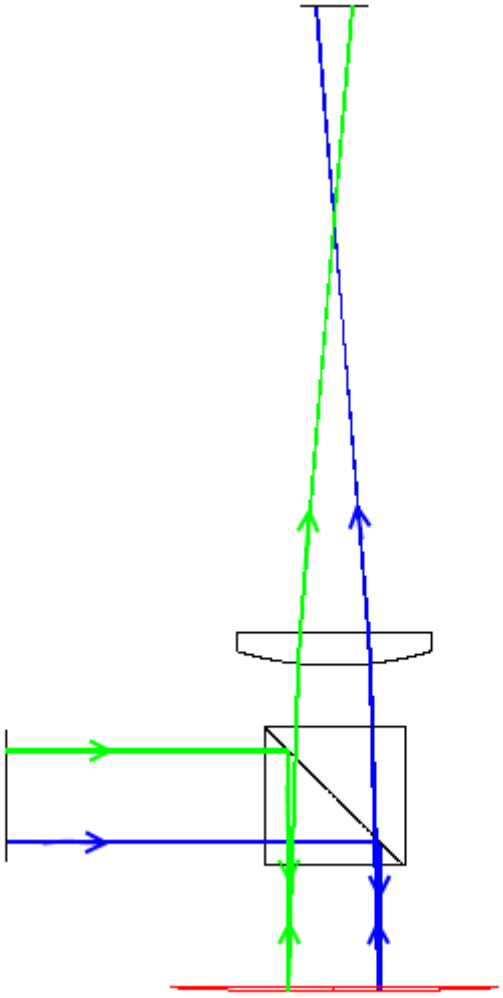
Powellova čočka musí být velice přesně umístěna tak, aby laserový svazek dopadal přesně na střed její přední plochy. Také je důležité, aby dopadající svazek byl rovnoběžný s optickou osou Powellovy čočky. Při nesplnění těchto podmínek nastává nerovnoměrné rozložení intenzity a celková deformace laserového svazku za čočkou. Čočka vyžaduje upevnění s nastavitelnou polohou ve dvou osách kolmých k optické ose a nastavitelné úhlové natočení kolem stejných os. Pokud je potřeba přesně definovat i směr roztažení svazků, upevnění musí mít i možnost úhlového natočení kolem optické osy čočky.
Celé schéma deflektometru s Powellovou čočkou je znázorněno na obrázku 25. Za laserem je umístěn prostorový filtr a expander svazku vytvářející svazek o požadovaném průměru s gausovským rozložením intenzity. Z prostorového filtru pokračuje svazek na Powellovu čočku, která jej protáhne v jednom směru. Z čočky vystupuje divergentní svazek v tomto směru a je pomocí cylindrické čočky transformován na rovnoběžný svazek obdélníkového průřezu. Průřez svazku ve směru jeho delší strany je dán výstupním úhlem svazku opouštějícího Powellovu čočku a její vzdáleností od cylindrické čočky. Pomocí planparalelní desky je vytvořena dvojice svazků s obdélníkovým průřezem. Poměr intenzit této dvojice je dán odrazivostí přední a zadní plochy planparalelní desky. Kubickým děličem svazku je dále dvojice svazků směrována kolmo na vzorek. Oba svazky se odrážejí od měřeného vzorku a přes dělič se dostávají ke druhé cylindrické čočce. Ta fokusuje oba svazky na CCD kameru.
Výhodou deflektometru s Powellovou čočkou je snadné vyhodnocování poloměru křivosti povrchu vzorku, který se určí ze vzájemné pozice dvou rovnoběžných čar. Pro rovinný povrch měřeného vzorku (poloměr křivosti je roven nekonečnu) se obě čáry překrývají. Se zmenšujícím se poloměrem křivosti povrchu vzorku se čáry postupně rozestupují. Znaménko poloměru křivosti povrhu vzorku (konkávní resp. konvexní povrch) se dá určit dvěma způsoby. První z nich je určení pomocí rozdílných hodnot v intenzitách jednotlivých svazků (jak bylo nastíněno v kapitole 4.2.1). Druhý způsob vyhodnocení znaménka poloměru křivosti vzorku je pomocí zkrácení či prodloužení délky větší strany obdélníkových průřezů laserových svazků. Ve směru delší strany průřezu svazků velikost této strany u žádného ze svazků cylindrická čočka neupravuje. Jejich zkrácení nebo prodloužení je vyvoláno křivostí povrchu vzorku v daném směru. Pokud se svazky zachycené na kameře prodlouží,

je poloměr křivosti vzorku kladný (vzorek je konvexní, vydutý) a v tenké vrstvě, která je nanesena na odrazové ploše, vzniká tahové mechanické napětí (je označováno jako kladné). Pokud jsou průřezy svazků na kameře v tomto směru zkrácené, poloměr křivosti vzorku je záporný a v tenké vrstvě je tlakové mechanické napětí (je označováno jako záporné). Oba způsoby jsou znázorněny na obrázku 23, který byl vytvořen pomocí trasování svazků v programu Zemax. Optická soustava použitá pro trasování je uvedena v obrázku 24.
Další výhodou je možnost rozpoznání deformovaného nebo obecně zvlněného povrchu vzorku. Jakákoliv odchylka tohoto povrchu od rovinného nebo sférického tvaru se projeví zvlněním, zakřivením nebo obecnou deformací čárových stop laserových svazků zachycených na kameře. Z mnoha simulací provedených v programu Zemax (všechny v sestavě znázorněné na obrázku 24) vyplývá, že pokud se měřený vzorek prohne do tvaru elipsoidu a nikoliv do tvaru koule, zakřivení stop zachycených na kameře není patrné[5]. Jediným způsobem, jak vyhodnotit případnou odchylku povrchu vzorku ve tvaru elipsoidu od koule, je porovnávat podélnou délku stop se vzdáleností mezi nimi. V případě kulového povrchu vzorku s daným poloměrem křivosti (etalon či simulace) nabývá poměr délka stop/ vzdálenost stop dvou možných hodnot. Pokud uvedený poměr zjištěný měřením studovaného vzorku nabude hodnot odlišných, měřený povrch má tvar elipsoidu.



Obrázek 23: Spot diagram z programu Zemax znázorňující svazky zachycené kamerou v deflektometru s Powellovou čočkou. Jednotlivé diagramy vyobrazují svazky zachycené kamerou při měření vzorků s různým poloměrem křivosti. Vlevo vzorek s rovinným povrchem, ve středu vzorek s poloměrem křivosti 500 mm a vpravo s poloměrem -500 mm. Vzdálenosti uvedené v obrázku jsou v μm.

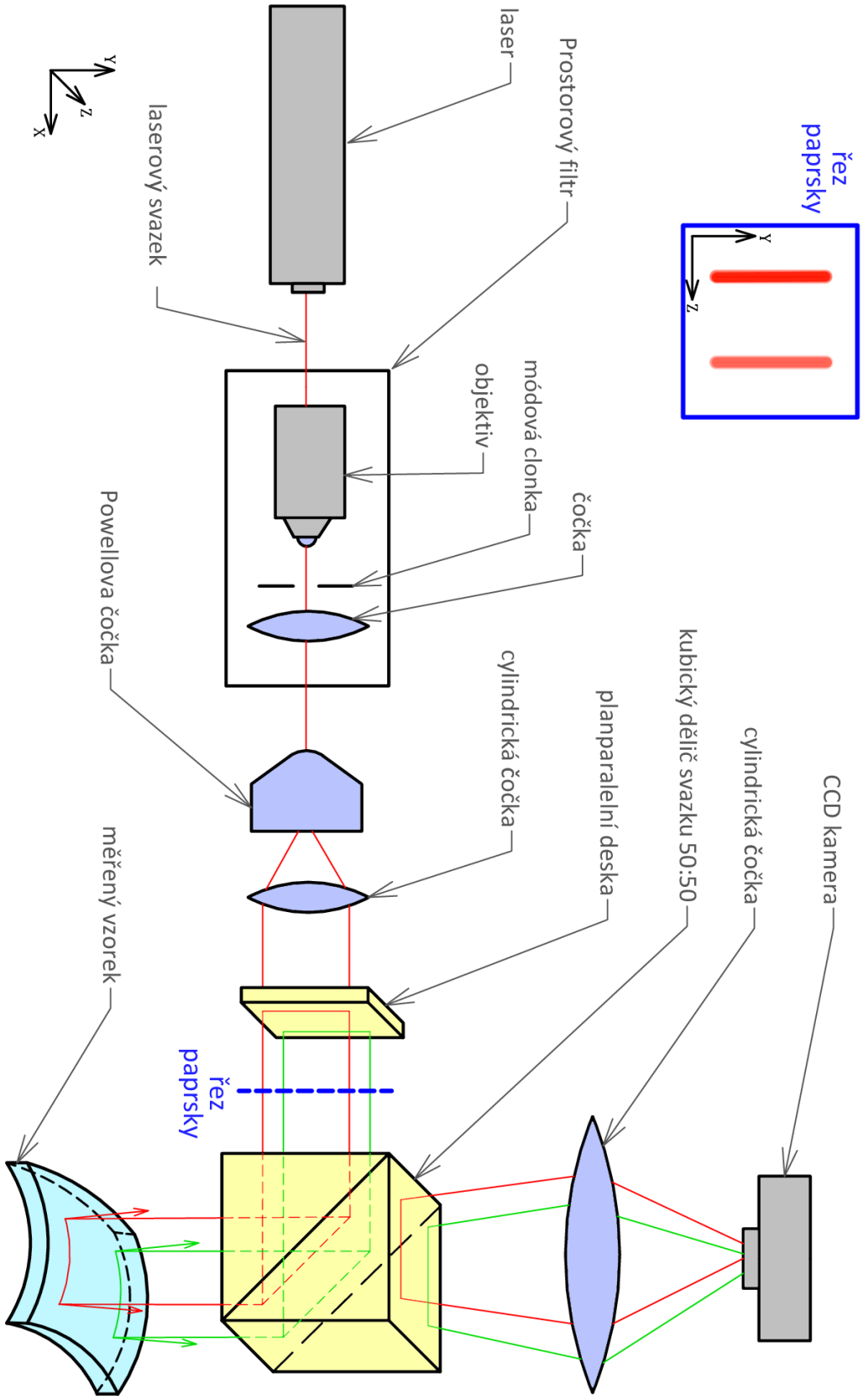
[5] Platí pro elipsoidy, u kterých je rozdíl v poloosách velice malý ve srovnání s celkovým rozměrem poloos.



Obrázek 24: Optická sestava pro trasování svazků vytvořená v programu Zemax použitím funkce 3D layout. Červeně je znázorněn měřený vzorek s poloměrem křivosti povrchu 500 mm. Nad vzorkem je kubický dělič svazku a nad ním cylindrická čočka s ohniskovou vzdáleností 100 mm, ve které je umístěn detektor. Průřez obou laserových svazků je 0,8 mm x 14 mm (pro hodnotu 1/e maxima intenzity) a jsou od sebe vzdálené 14 mm. Na obrázku není vyobrazen prostorový filtr, Powellova čočka a planparalelní deska.

Nevýhodou deflektometru je měření poloměru křivosti pouze ve směru, který je kolmý k oběma stopám. Poloměr křivosti ve směru rovnoběžném se stopami se dá přibližně určit z délek stop.

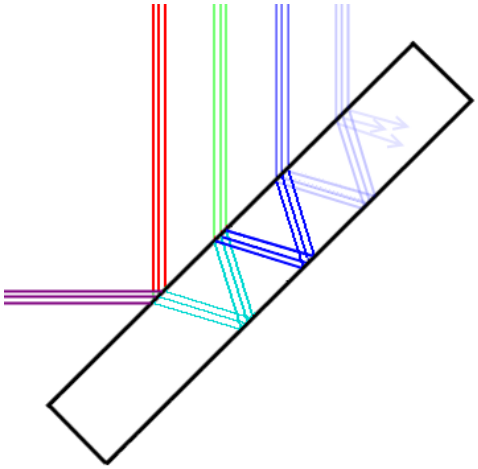
.



Obrázek 25: Schéma deflektometru s Powellovou čočkou

4.2.3 Deflektometr s dvěma planparalelními deskami

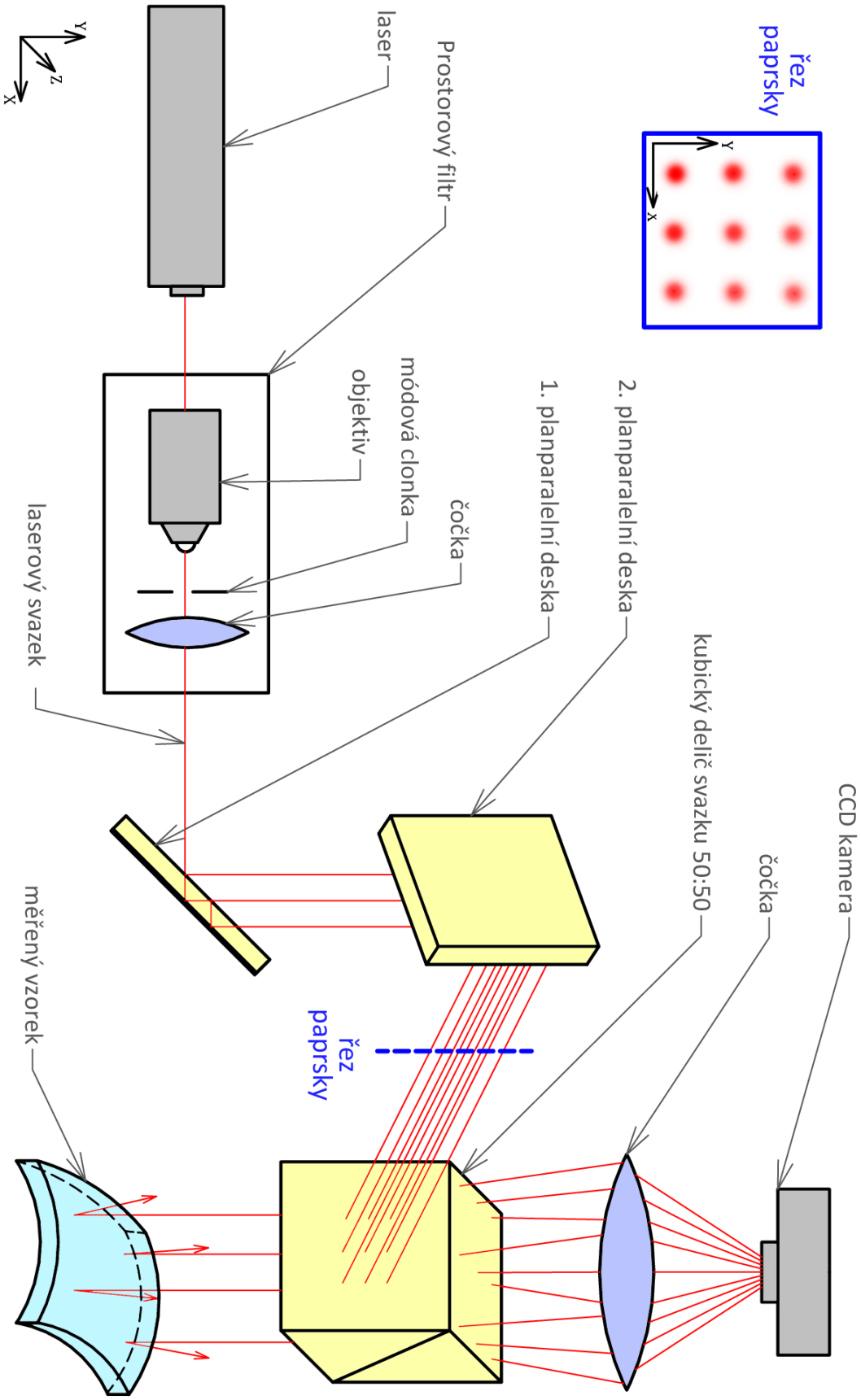
Vícenásobný laserový svazek může být vytvořen pomocí planparalelní desky, jak je znázorněno na obrázku 26. Laserový svazek dopadá na přední rozhraní planparalelní desky, část se od něj odráží a část jím prochází. Na rozhraní dochází k lomu svazku k ose a lomený svazek pokračuje až k zadnímu rozhraní planparalelní desky. Na toto rozhraní je nanesena vrstva kovu pro vytvoření zrcadlově odrazného povrchu. Od něj se svazek odráží zpět k přednímu rozhraní, na kterém se opět část svazku odráží a část jím prochází. Poměr intenzity odraženého a prošlého svazku je určen indexy lomu okolního prostředí a materiálu planparalelní desky, úhlem dopadu děleného svazku a (případnými) nanesenými vrstvami pro úpravu odrazivosti[6]. Vzdálenost mezi vystupujícími laserovými svazky je určena vzdáleností mezi přední a zadní stranou planparalelní desky.



Obrázek 26: Trasa svazků vytvořených pomocí planparalelní desky se zadní zrcadlovou stěnou. Průměr dopadajícího svazku je 2 mm. Vzdálenost ploch funkčních planparalelní desky je 7 mm. Úhel dopadu svazku na přední stěnu desky je 45°.
Různé barvy svazků značí jejich různou intenzitu.

Uvažujme jako výchozí polohu planparalelních desek polohu, v níž obě leží v rovině xz. Pokud nyní bude jedna planparalelní deska natočena kolem osy z (jak je znázorněno na obrázku 27) o 45° a druhá planparalelní deska bude umístěna nad ní a natočena o 45° kolem osy x, vytvoří dvojice desek matici laserových svazků. Primární laserový svazek dopadající na první planparalelní desku nejdříve prochází přes prostorový filtr a expander svazku kvůli úpravě svazku. Po vytvoření matice pomocí desek jsou svazky směřovány na kubický dělič svazku (viz kapitola XY), který zajistí kolmý dopad měřících svazků na vzorek. Tyto svazky se odrazí od povrchu a procházejí znovu děličem. Poté jsou čočkou fokusovány na čip CCD kamery. Schéma celého deflektometru s planparalelními deskami znázorňuje obrázek 27).

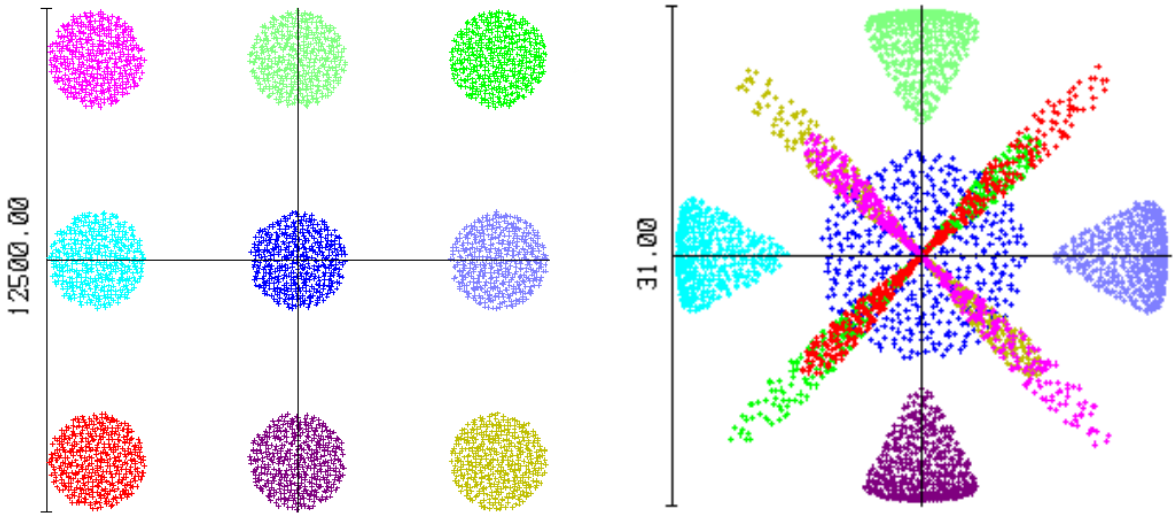
[6] Běžně sériově vyráběné planparalelní desky mají upravenou odrazivost a propustnost v poměrech 10:90, 25:75, 40:60, 50:50, 60:40, 75:25 a 90:10. (první číslo v poměru udává odraženou intenzitu v procentech, druhé číslo udává projitou intenzitu v procentech)



Obrázek 27: Schéma deflektometru s planparalelními deskami

4.2.3.1 Výhody deflektometru s planparalelnímy deskami

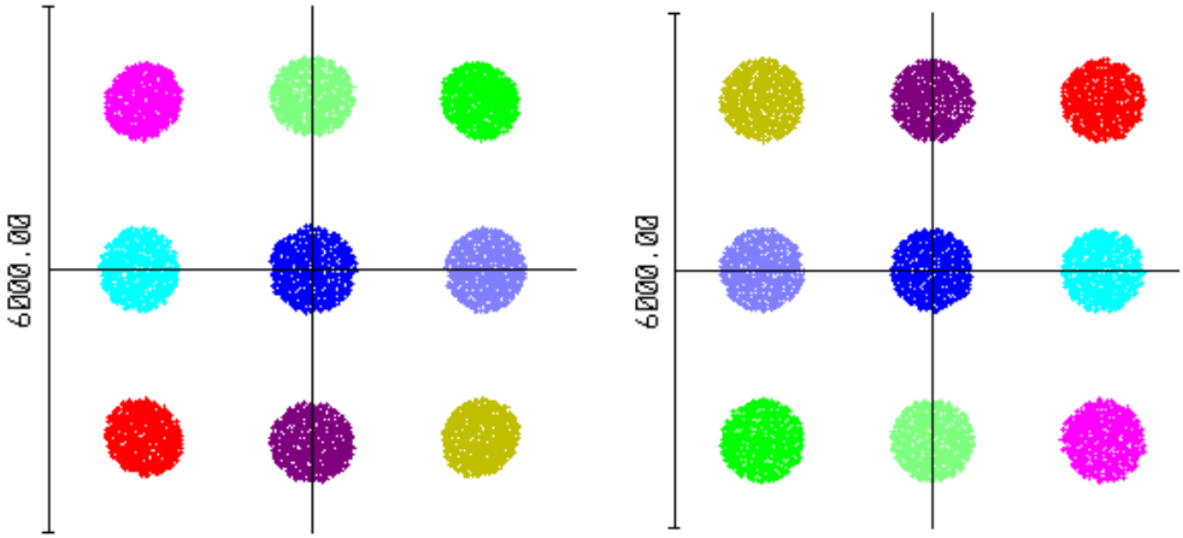
Volbou hodnoty odrazivosti předních stran planparalelních desek je možné určit poměr intenzit v jednotlivých laserových svazcích dopadajících na vzorek a tím i počet svazků, který po odrazu od studovaného vzorku měřicí kamera dokáže zachytit. Nejmenší počet svazků takto vytvořených je roven čtyř, stopy těchto svazků v rovině čipu kamery pak tvoří matici 2x2. I v tomto případě je možné určovat poloměr křivosti měřeného vzorku ve dvou navzájem kolmých osách (viz obrázek 14 v kapitole 3.2.5). Poloměr křivosti se vyhodnocuje ze vzájemného posuvu stop dvojice laserových svazků zachycených kamerou- posun dvojice bodů v ose y pro poloměr křivosti v ose x a posuv dvojice bodů v ose x pro poloměr křivosti v ose y. Větší počet měřících laserových svazků zvyšuje přesnost měření a přidává možnost měřit poloměr křivosti pro více os. Konstrukční návrh počítá s vytvořením matice 3x3 stop svazků na čipu CCD kamery (viz obrázek 28). U této matice je možné vyhodnocovat poloměr křivosti ve dvou navzájem kolmých osách. Pro každou osu jsou naměřeny celkem tři údaje ze vzájemných posunů tří trojic bodů v dvou kolmých směrech.



Obrázek 28: Vlevo – stopy laserových svazků dopadající na vzorek. Průměry jednotlivých laserovýh svazků jsou 2 mm. Vpravo – deformace stop laserových svazků na čipu kamery umístěné v ohniskové rovině reálné čočky (plankonvexní čočka s ohniskovou vzdáleností 100 mm) pro rovinný vzorek. Různé barvy značí různé hodnoty intenzity svazků. Velikost os je v μm. Simulace vytvořená v programu Zemax.

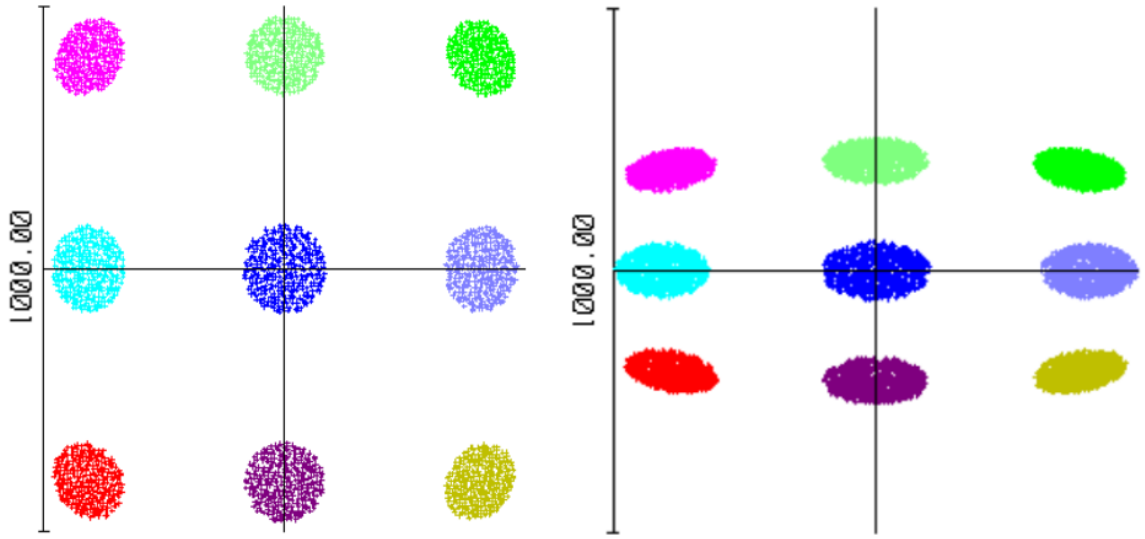
Výhodou většího počtu svazků je také možnost snadného rozpoznání rovinnosti měřených vzorků. Pro vzorky s poloměrem křivosti rovným nekonečnu se všechny dopadající svazky odrazí pod stejným úhlem a čočkou jsou fokusovány do stejného „bodu“ na čipu kamery (v případě, že by čočka neměla zobrazovací vady). U reálné čočky se zobrazovací vady projeví zvětšením bodu do plochy a deformací jednotlivých laserových svazků. Na obrázku 28 je znázorněno zobrazení laserových svazků odražených rovinným vzorkem a fokusovaných plankonvexní čočkou s ohniskovou vzdáleností 100 mm. Je patrné, že došlo k roztažení a deformaci jednotlivých stop vlivem otvorové vady čočky. Největší rozměr obrazce je 31 μm, což je hodnota blízká rozměru jednoho pixelu na průměrné kameře. Simulace je také vytvořená pro planparalelní desky s dokonale rovnoběžnými plochami. Reálné

planparalelní desky budou mít odchylku od rovnoběžnosti a budou mírně klínovité. Je možné tedy předpokládat, že se na kameře zobrazí jeden nebo několik světlých pixelů, na kterých nebude možné rozeznat deformovanou strukturu jednotlivých svazků. Pro zmenšující se poloměr křivosti měřeného vzorku dojde k defokusaci laserových svazků na čipu a otvorová vada přestane být patrná. Poloměr křivosti vzorku, u kterého otvorová vada čočky při zobrazování nebude vůbec patrná, záleží na dané čočce a jejich vadách.
Další výhodou je možnost rozeznání kladného či záporného poloměru křivosti měřeného vzorku. Díky tomu je u zkoumaných tenkých vrstev možné určit, zda mechanické napětí ve vrstvě je tahové nebo tlakové. Totiž rozdíl v intenzitách jednotlivých měřících svazků (a tedy stop v matici) umožňuje jejich rozlišitelnost na kameře. Pro záporný poloměr křivosti dostáváme středově převrácený obrazec, který přísluší kladnému poloměru křivosti o stejné absolutní hodnotě (viz obrázek 29 uspořádání barevných stop).



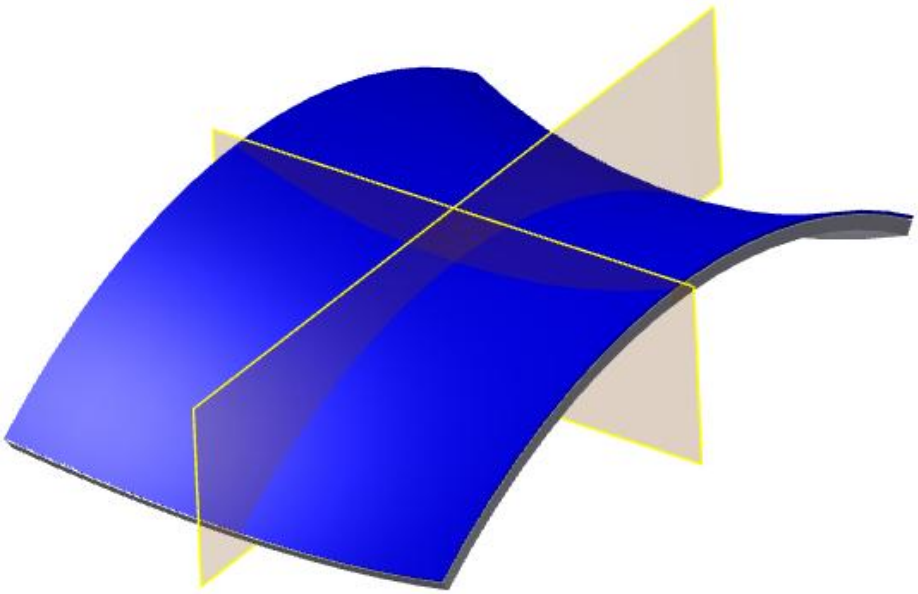
Obrázek 29: Stopa laserových svazků v rovině čipu kamery pro poloměr křivosti 500 mm vlevo a -500 mm vpravo. Simulace vytvořená v programu Zemax. Stejná barva na obou obrázcích odpovídá stejnému svazku. Různé barvy značí různé hodnoty intenzity. Měřítka os jsou v μm. Simulace vytvořená v programu Zemax.

Díky většímu množství bodů a měření ve dvou osách je možné určit, zda má povrch vzorku tvar kulové plochy, nebo jestli je povrch tvaru elipsoidu. V případě elipsoidu dojde ke smrštění obrazce v rovině čipu kamery ve směru delší poloosy elipsoidu, jak je možné vidět na obrázku 30 (vertikální směr).



Obrázek 30: Porovnání obrazu svazků v rovině čipu kamery pro vzorek s kulovým povrchem o poloměru křivosti 2500 mm (vlevo) a pro vzorek s povrchem ve tvaru elipsoidu s délkou poloos 2500 mm v horizontálním směru a 5 000 mm ve vertikálním směru (vpravo). Různé barvy značí různé hodnoty intenzity. Velikost os je v μm. Simulace vytvořená v programu Zemax.

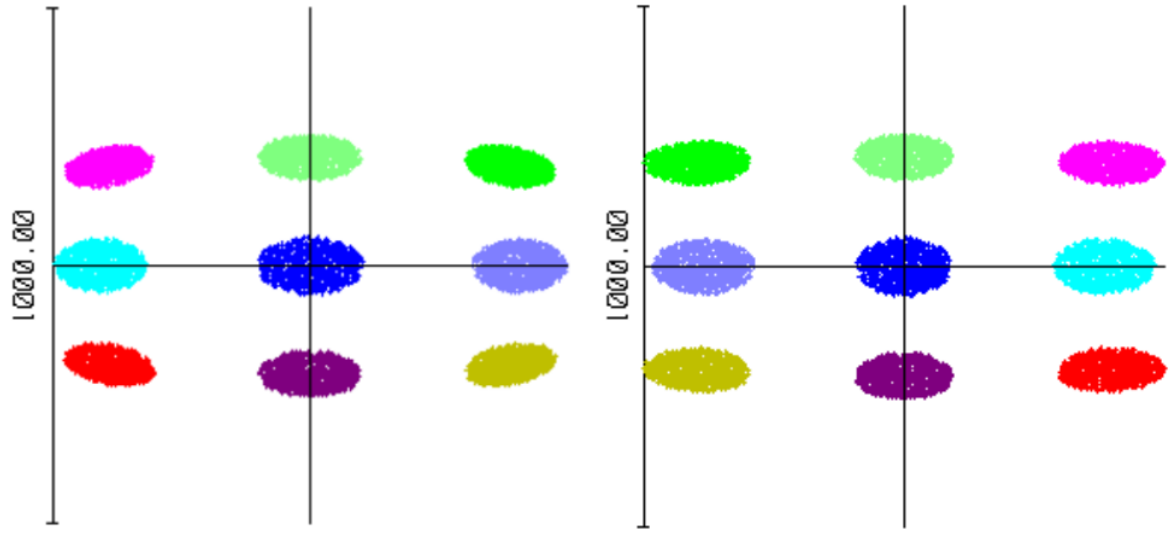
U některých vzorků v důsledku neuniformity tloušťky podložky se po depozici vrstvy na podložku stává, že se deformují do komplikovaného tvaru specifické zborcené plochy (viz obrázek 31).



Obrázek 31: Znázornění plochy s kladným poloměrem křivosti ve směru jejího delšího rozměru a se záporným poloměrem křivosti ve směru kratšího rozměru

Použití těchto vzorků pro vyhodnocování mechanického napětí ve vrstvě napětí je nevhodné a je třeba je odlišit od těch, které jsou ve tvaru elipsoidu a dají se použít s jistým snížením přesnosti ve vyhodnocování tohoto napětí. U těchto složitých tvarů dojde k deformaci čtvercové matice stop laserových svazků v rovině čipu kamery do podobného obdélníkového tvaru jako u elipsoidů. Svazky jsou ale zrcadlově

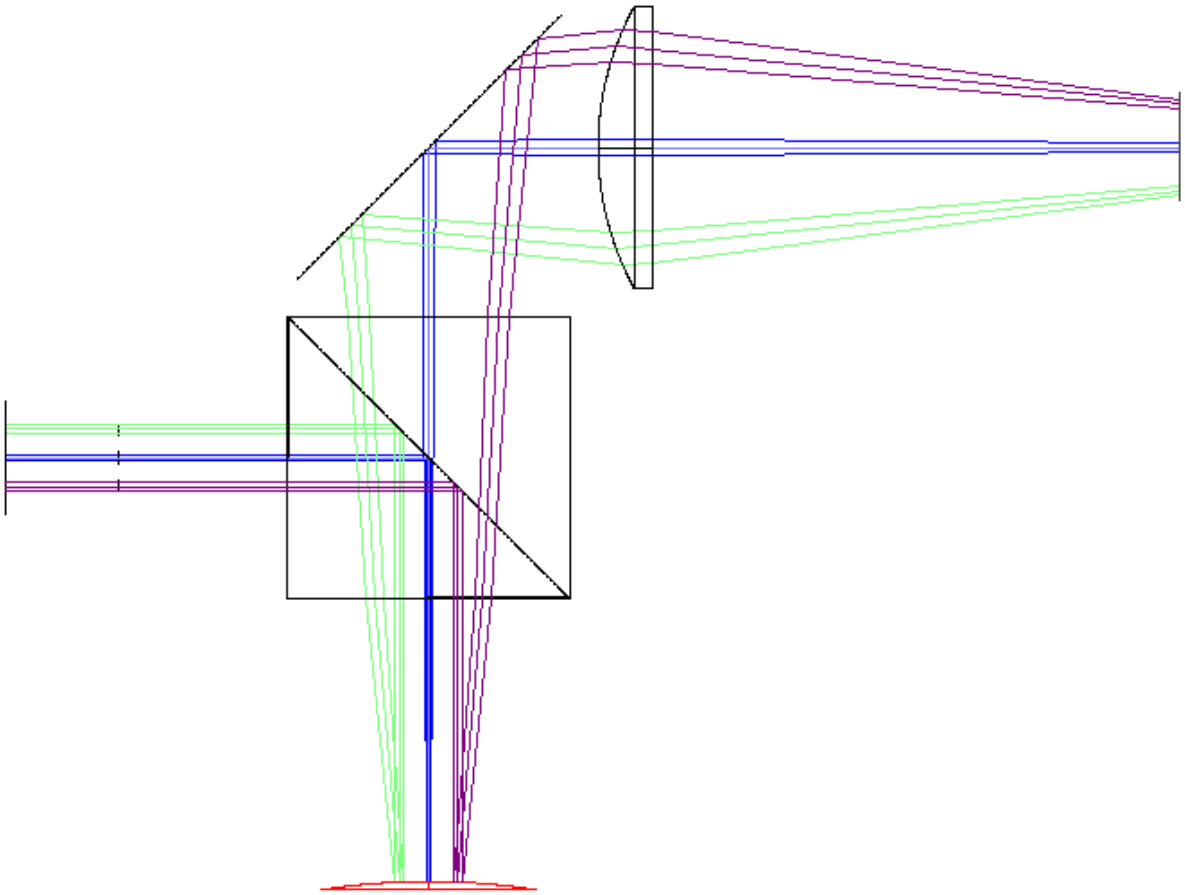
obrácené vzhledem k ose kolmé[7] k poloměru křivosti opačného znaménka, jak je vidět na obrázku 32.



Obrázek 32: Porovnání obrazu svazků v rovině čipu kamery pro vzorek tvaru elipsoidu s poloosami 2 500 mm a 5 000 mm (vlevo) a pro plochu se dvěma poloměry křivosti2 500 mm a -5 000 mm. Obrazec vpravo je zrcadlově převrácený k obrazci vlevo kolem vertikální osy procházející středem obrazce. Různé barvy značí různé hodnoty intenzity svazků. Měřítka os jsou v μm. Simulace vytvořená v programu Zemax.

Poslední výhodou většího počtu svazků je rozpoznání obecně zvlněných povrchů vzorků, které nemůžou být použity pro měření napětí. Takové vzorky deformují jinak čtvercový nebo obdélníkový tvar matice stop svazků do obecně deformovaného tvaru, jak vyplývá z mnoha simulací v programu Zemax. Z obrazu stop v rovině kamery sice není možné určit přesný tvar plochy, ale je možné s jistotou říci, že se nejedná o sférickou nebo elipsoidickou plochu, a že ze vzorku není možné vyhodnocovat mechanické napětí diskutovanou metodou. Všechny simulace v programu Zemax byly provedeny na sestavě znázorněné v obrázku 33. Z důvodů větší kompaktnosti sestavy bylo mezi čočku, která fokusuje svazky na čip kamery a dělič svazků přidáno rovinné zrcadlo. To zalamuje optickou osu o 90°. Úhly, pod kterými svazky dopadají na čočku, nejsou zrcadlem změněny a zrcadlo tedy neovlivňuje obraz svazků v rovině čipu kamery. To bylo ověřeno simulací v programu Zemax.

[7] Konvexní a konkávní elipsoid se dá rozlišit stejným způsobem jako konvexní a konkávní kulová plocha.



Obrázek 33: Optická sestava pro trasování svazků vytvořená v programu Zemax použitím funkce 3D layout. Červeně je znázorněn měřený vzorek s poloměrem křivosti 500 mm. Nad vzorkem je dělič svazků a nad ním rovinné zrcadlo směřující svazky na plankonvexní čočku s ohniskovou vzdáleností 100 mm. Průměr všech laserových svazků je 2 mm a jsou od sebe vzdálené 5 mm. Na obrázku není vyobrazen prostorový filtr a planparalelní desky.

4.2.3.2 Nevýhody deflektometru s planparalelními deskami

Nevýhodou je potřeba kvalitního primárního laserového svazku dopadajícího na planparalelní desky. Každý světelný svazek odkloněný od hlavního směru vytvoří pomocí planparalelních desek několik stop podobně jako primární svazek. Větší počet těchto „falešných“ stop může úplně zastínit některou z měřicích stop a tím značně zkomplikovat či úplně znehodnotit proces vyhodnocování mechanického napětí.

4.3 Porovnání jednotlivých variant deflektometru

Varianta **deflektometru s maticí mikročoček** mohla přinést přesné měření poloměru křivosti vzorku. K jeho vyhodnocení mohlo být použito různých kombinací jednotlivých řad laserových stop ve dvou kolmých osách. Díky tomu mohla být získána vcelku podrobná informace o charakteru povrchu měřeného vzorku. Mezi sériově vyráběnými maticemi mikročoček se bohužel nenachází dvojice, která by vyhovovala našim požadavkům. Na zakázku vyrobená dvojice matic je extrémně finančně náročná a řešení této varianty přestalo být výhodné.

Deflektor s Powellovou čočkou umožňuje přesné měření poloměru křivosti povrchu vzorku pouze v jedné ose. Umožňuje odhad, zda je měřený povrch ve tvaru koule, nebo ve tvaru elipsoidu či obecně deformované plochy. Také umožňuje rozeznávat znaménko poloměrů křivosti povrchu. Přesné měření poloměrů křivosti ve dvou kolmých osách je pro adekvátnost použití Stoneyovy rovnice pro výpočet napětí důležité.

Varianta **deflektometru s planparalelními deskami** umožňuje přesné měření poloměrů křivosti ve dvou kolmých osách, rozpoznávání znaménka poloměru křivosti povrchu, vyhodnocování, zda je povrch tvaru koule, elipsoidu, povrchem se dvěma poloměry křivosti opačných znamének, nebo obecně zvlněnou plochou. Konstrukce tohoto deflektometru neobsahuje žádné finančně náročné či jinak komplikované prvky. Varianta se jeví jako nejvýhodnější pro dané potřeby měření mechanického napětí. Proto byla zvolena pro realizaci.

5 Konstrukce deflektometru

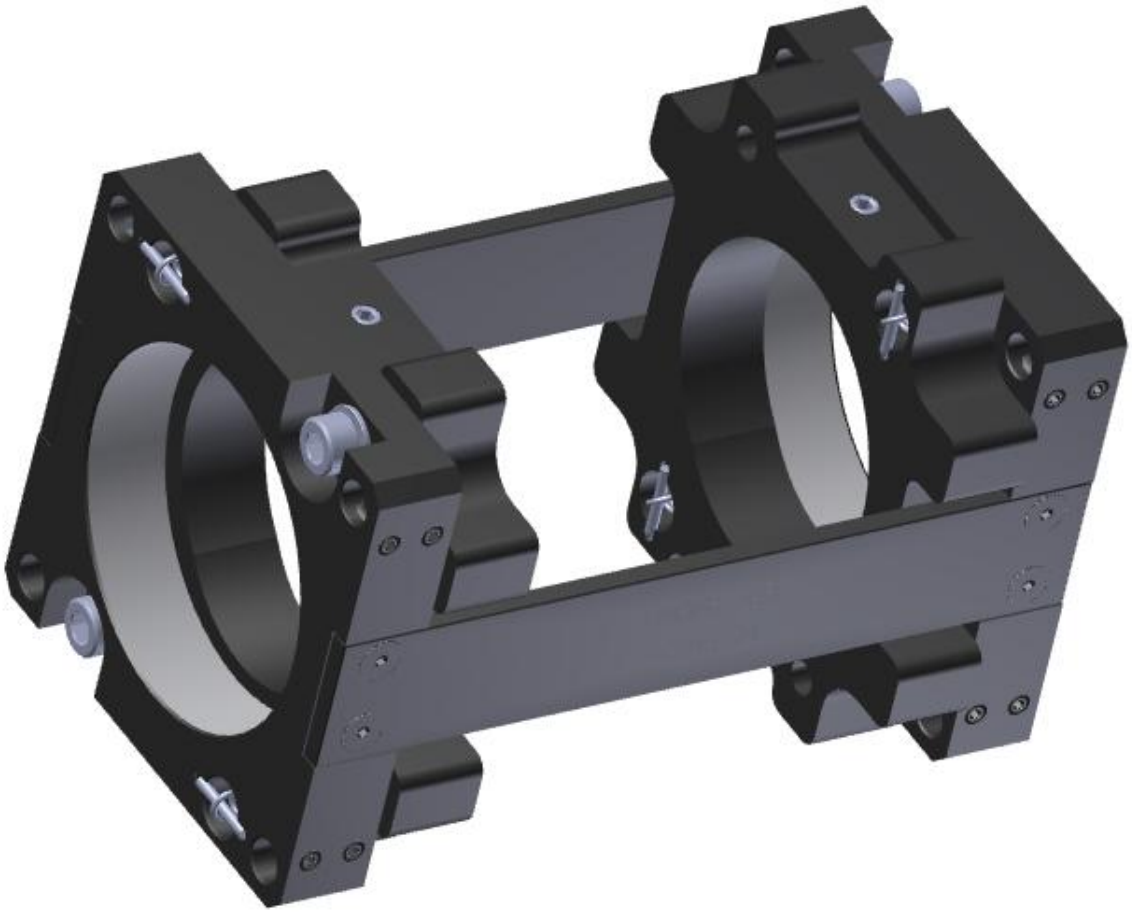
Konstrukce přístroje obsahuje 7 hlavních částí:
1. laserový zdroj a jeho upevnění,
2. prostorový filtr,
3. planparalelní dělič svazku a jeho upevnění,
4. upevnění kubického děliče svazků a čočky,
5. uchycení vzorku,
6. kamera a její upevnění,
7. základní deska.

Tyto části jsou všechny znázorněny a barevně rozlišeny ve vykresleném modelu v příloze č. 1.

Optické komponenty všech hlavních částí byly voleny s ohledem na dodávané vzorky s firmou Meopta-optika, s.r.o. Z prvních několika připravených podložek, na které byla nanesena tenká vrstva, bylo přibližným měřením pomocí optického profilometru zjištěno rozmezí, ve kterém se poloměr křivosti vzorků může pohybovat. Toto rozmezí bylo stanoveno na 1 - 5 metrů. V případě rotačně symetrických podložek budou jejich průměry v rozmezí od 1 do 2 palců. Také je plánováno měření napětí na podložkách čtvercového tvaru 1x1 palec a obdélníkového tvaru 1x2 palce. Mechanická část deflektometru byla navrhována s ohledy na potřeby optické části tak, aby každý optický prvek měl dostatek stupňů volnosti pro přesné ustálení jeho polohy a aby nebyl zatěžován externím napětím, které by mohlo vyvolat změny optických vlastností daného prvku nebo jeho trvalé deformace. Popis a rozbor každého optického i mechanického prvku je v příslušné podkapitole hlavních částí.

5.1 Laserový zdroj a jeho upevnění

Jako zdroj laserového svazku byl zvolen helium neonový laser Lasos LGK 7653 8. Svazek má průměr 0,7 mm v $1/e^2$ maxima intenzity a vlnovou délku 632,8 nm. Výrobce udává divergenci svazku 1,2 mrad. Údaj však není příliš podstatný, neboť je za laserem umístěný prostorový filtr, který mění divergenci svazků. Je potřeba, aby optická osa laseru byla shodná s optickou osou prostorového filtru, převážně pak objektivu, na který laserový svazek dopadá. Proto musí mít uchycení laseru naklápění kolem dvou navzájem kolmých os. Pro zaručení shodnosti optických os, je potřeba, aby měl laser nastavitelnou polohu ve stejných osách jako nastavení jeho naklápění. Všechny tyto požadavky splňuje použité uchycení laseru od společnosti Thorlabs, znázorněné na obrázku 34. Posuv a náklon tohoto upevnění nejsou řízeny pomocí šroubů. Přesnou polohu je třeba nastavit manuálně. Ustálení může být někdy časově náročnější, velkou výhodou tohoto upevnění je ale možnost pevného zafixování nastavené polohy. Další výhodou uchycení laseru jsou otvory pro tyče klecového systému. Do nich se dají zasunout ocelové tyče, které mechanicky spojí uchycení laseru s prostorovým filtrem a zajistí přibližnou shodnost optických os. Klecový systém takto značně usnadňuje nastavení konečné přesné polohy laseru.

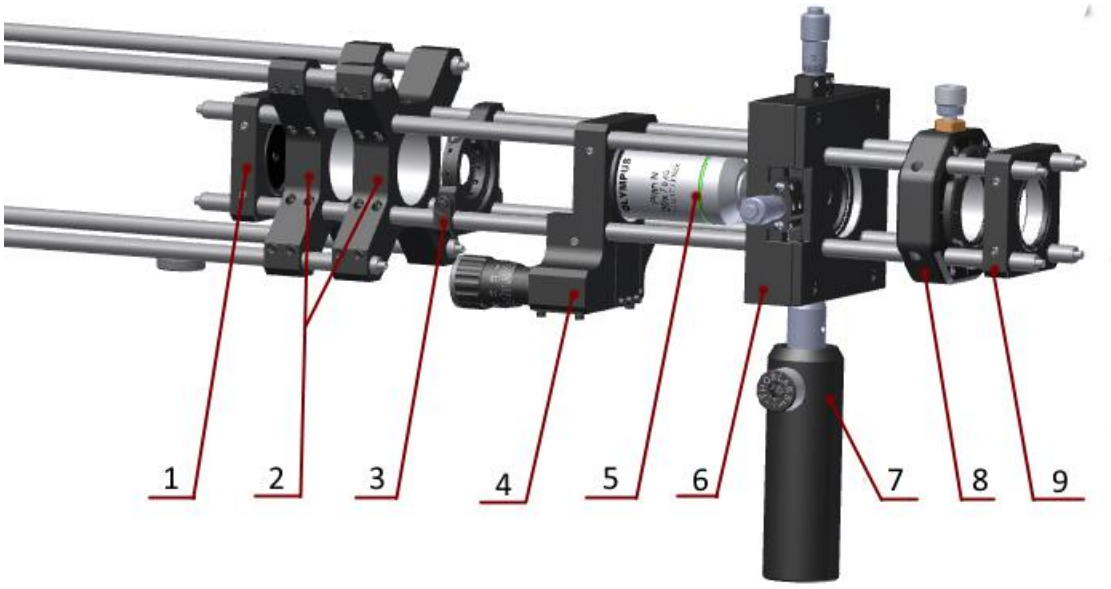


Obrázek 34: Upevnění laseru sériově vyráběné firmou Thorlabs. Pro vytvoření obrázku byl použit step model z oficiálních stránek výrobce.

Upevnění laseru stojí na dvou nohách, jedna s pevnou délkou 80 mm, která je připevněná k podložce s podélnými drážkami pro šrouby pro možné nastavení vhodné podélné polohy na základní desce a druhá s nastavitelnou délkou. K oběma nohám je upevnění připevněno pomocí závrtných šroubů M5. Délkově nastavitelná noha je k základní desce uchycena taktéž závrtným šroubem M5. Pevná noha je k podložce připevněná šroubem s válcovou hlavou M5 a podložka je k základní desce připevněná dvojicí šroubů M5 s válcovou hlavou.

5.2 Prostorový filtr

Prostorový filtr slouží k úpravě laserového svazku. Mění průměr laserového svazku a odstraňuje jeho nežádoucí defekty. Jednotlivé komponenty prostorového filtru jsou navzájem spojeny klecovým systémem o rozteči tyčí 30mm. Pro přechod z 60mm klecového systému vycházejícího z upevnění laseru slouží dvě redukce (pozice číslo 2 na obrázku 35).

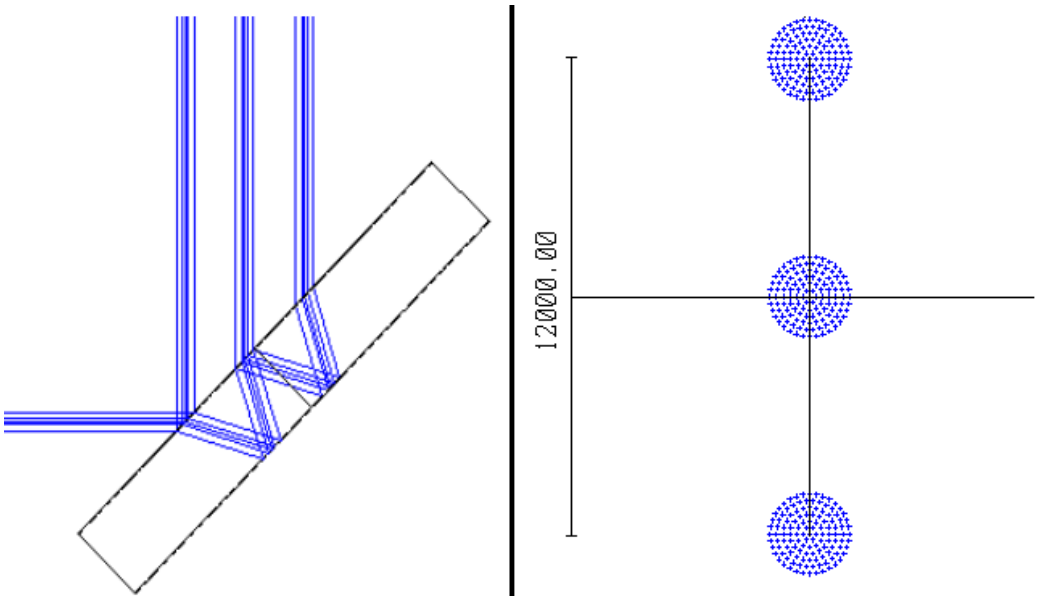


Obrázek 35: Model prostorového filtru. Pozice: 1-aperturní clona, 2-redukce klecového systému, 3-irisová clona, 4-posuv objektivu ve směru optické osy, 5-objektiv, 6-posuv pro módovou clonku ve dvou navzájem kolmých směrech v rovině kolmé na optickou osu, 7-výškově nastavitelná noha, 8-posuv čočky ve dvou navzájem kolmých směrech v rovině kolmé na optickou osu, 9-šedý filtr pro redukci intenzity svazku. Pro vytvoření obrázku byly použity step modely z oficiálních stránek výrobce.

Při vstupu do prostorového filtru je laserový svazek ořezán clonou o průměru 5 mm (pozice 2) a následně irisovou clonou s nastavitelným průměrem. Po té vstupuje svazek do objektivu, který jej fokusuje do otvoru módové clonky o průměru 50 μm. Objektiv je značky Olympus s dvacetinásobným zvětšením. Módová clonka se musí nacházet v ohniskové rovině objektivu a její optická osa musí být shodná s optickou osou objektivu. Pro vzájemné nastavení objektivu a módové clonky ve směru optické osy slouží diferenciální šroubem řízený posuv (pozice 4), který posouvá s objektivem. Pro nastavení ve dvou navzájem kolmých osách v rovině kolmé na optickou osu slouží šrouby řízený posuv (pozice 5), který nastavuje polohu otvoru módové clonky. Za tímto otvorem se nachází plankonvexní čočka s ohniskovou vzdáleností 25,4 mm a s nanesenými antireflexními vrstvami na obou stěnách čočky. Čočka je místěna tak, aby její ohnisko bylo v rovině otvoru. Čočka je uchycena v posuvu, který umožňuje přesné nastavení polohy ve dvou navzájem kolmých osách v rovině kolmé na optickou osu (pozice 8). Tato čočka mění rozbíhavý laserový svazek vycházející z otvoru na rovnoběžný. Za čočkou je umístěn držák pro šedé filtry ke snížení intenzity laserového svazku (pozice 9). Intenzita laseru je dostatečně vysoká, aby kamera dokázala zachytit svazky odražené i od vzorku s poměrně nízkou odrazivostí. Pro vzorky s vysokou odrazivostí je pak nutno intenzitu snížit z důvodů ochrany kamery. Celý prostorový filtr je umístěn na výškově nastavitelné noze. K té je připevněn pomocí zápustného šroubu M3. Noha je připevněna k základní desce zápustným šroubem M5. Všechny komponenty prostorového filtru (vyjma objektivu) jsou sériově vyráběné firmou Thorlabs. Přesný průměr laserového svazku v hodnotě intenzity $1/e^2$ maxima je obtížné určit. Z přibližného měření pomocí kamery se průměr jeví jako 2 mm. Přesná hodnota průměru pro funkčnost přístroje není potřebná.

5.3 Planparalelní dělič svazku a jeho upevnění

Pro vytvoření více laserových svazků byly vybrány dvě planparalelní desky s tloušťkou 8 mm. Na obě dopadají svazky pod úhlem 45°. Tyto desky vytvoří měřící svazky, kdy dva sousední svazky jsou od sebe vzdáleny 6 mm, jak je vidět na simulaci v programu Zemax, která je znázorněna na obrázku 36.

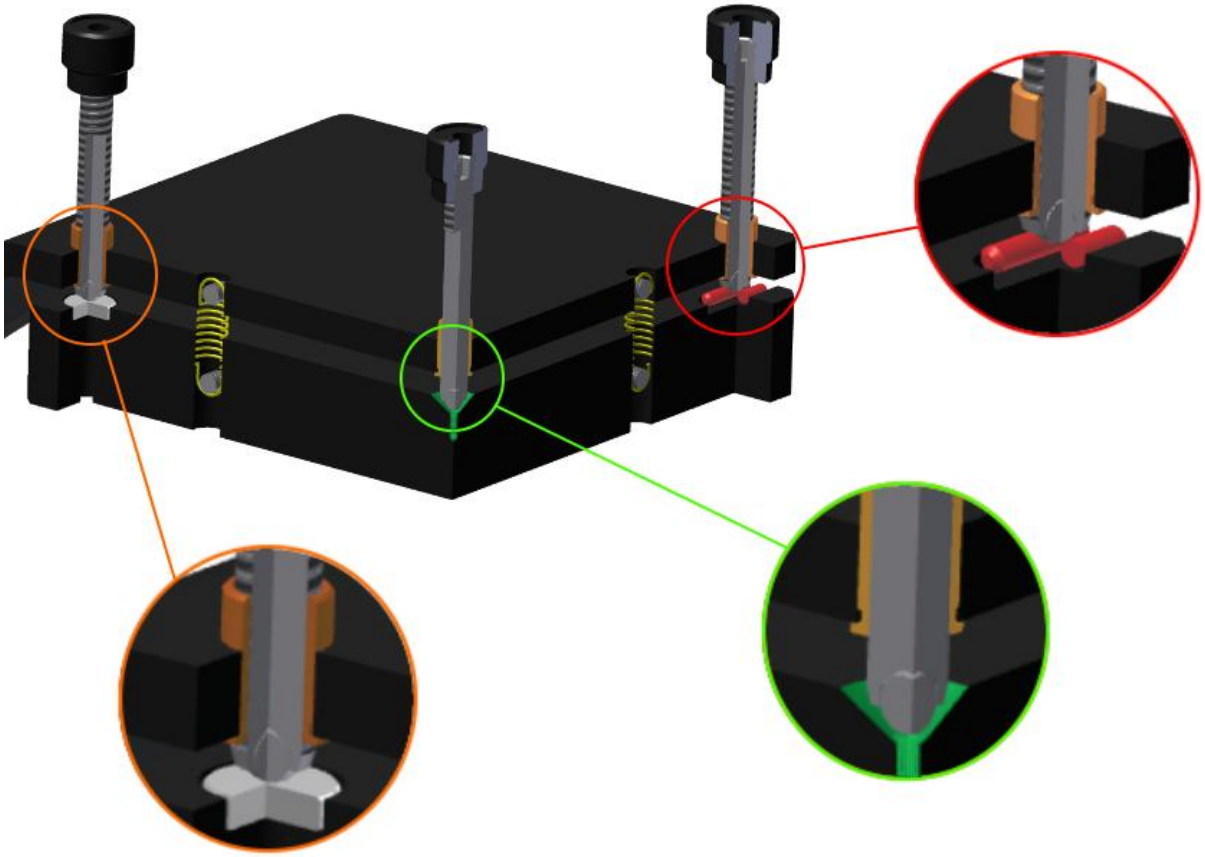


Obrázek 36: Vlevo znázornění trasy svazků procházejícími přes planparalelní desku ze skla N-BK7 se zadní zrcadlovou stranou. Průměr svazků je 2 mm. Tloušťka planparalelní desky je 8 mm. Vpravo Spotdiagram pro tyto svazky. Měřítko spotdiagramu je v μm.

Planparalelní desky jsou kruhové o průměru dva palce a jsou uchyceny v navrženém upevnění, které umožňuje jejich přesné naklápění pomocí šroubů kolem dvou navzájem kolmých os v rovině zrcadlových ploch příslušných desek a jejich posun pomocí šroubů v ose kolmé k této rovině. Upevnění je znázorněno na obrázku 37. Celé upevnění stojí na noze o pevné délce 60 mm a průměru 25 mm (pozice 2 na obrázku 37). Noha je k upevnění i k podložce připevněná pomocí šroubu M5 s válcovou hlavou. Podložka je opatřena drážkami pro šrouby M5 ve směru dopadajícího svazku. Díky tomu je možné celé upevnění planparalelních desek posouvat ve směru dopadajícího svazku. Po průchodu oběma deskami jsou svazky zalomeny o 90° a směrovány na kubický dělič svazku. Posuvem upevnění planparalelních děličů ve směru drážek je možné nastavovat místa dopadů v tomto směru na kubický dělič svazků.

Obrázek 37: Model upevnění planparalelních desek. Pozice: 1-podložka, 2-ocelová noha s pevnou délkou, 3-hlavní deska, 4 a 10-pevné části kinematického uložení, 5 a 8-klopné části kinematického uložení, 6 a 9-planparalelní desky.

Planparalelní desky jsou uchyceny k náklopným částem (pozice 5 a 7) pomocí dvojice kroužků s vnějším závitem (jeden kroužek podpírá zadní zrcadlovou stranu desky a druhý přední stranu desky). Náklopné části jsou umístěné na tříbodovém kinematickém uložení tvořeném třemi šrouby se závitem 3/16"-100. Každý ze šroubů je ukončen vsazenou kuličkou o průměru 3 mm, která se v místě středu rotace dotýká díry kuželového tvaru (zelené pole na obrázku 38), povrch kuželové díry a její válcové zakončení je znázorněno zelenou barvou). U druhého šroubu se kulička dotýká dvou válečků z oceli vsazených do náklopné části (červené pole na obrázku 38), válečky jsou znázorněny červenou barvou). Kulička třetího šroubu se dotýká vsazené kovové destičky. Do pevných částí kinematického uložení (pozice 4 a 10) jsou vsazené závitové vložky. Závit na šroubu je příliš jemný pro jeho vytvoření do hliníku a jeho slitin. Náklopná a pevná část kinematického uložení je k sobě tlačena dvojicí pružin. Pružiny jsou k jednotlivým částem uchyceny pomocí zápustného šroubu M3 a jsou umístěny v osách mezi jednotlivými body kinematického uložení. Pružiny jsou vždy ve dvou třetinách vzdálenosti mezi bodem rotace a druhým bodem kinematického uložení ve směru od bodu rotace.

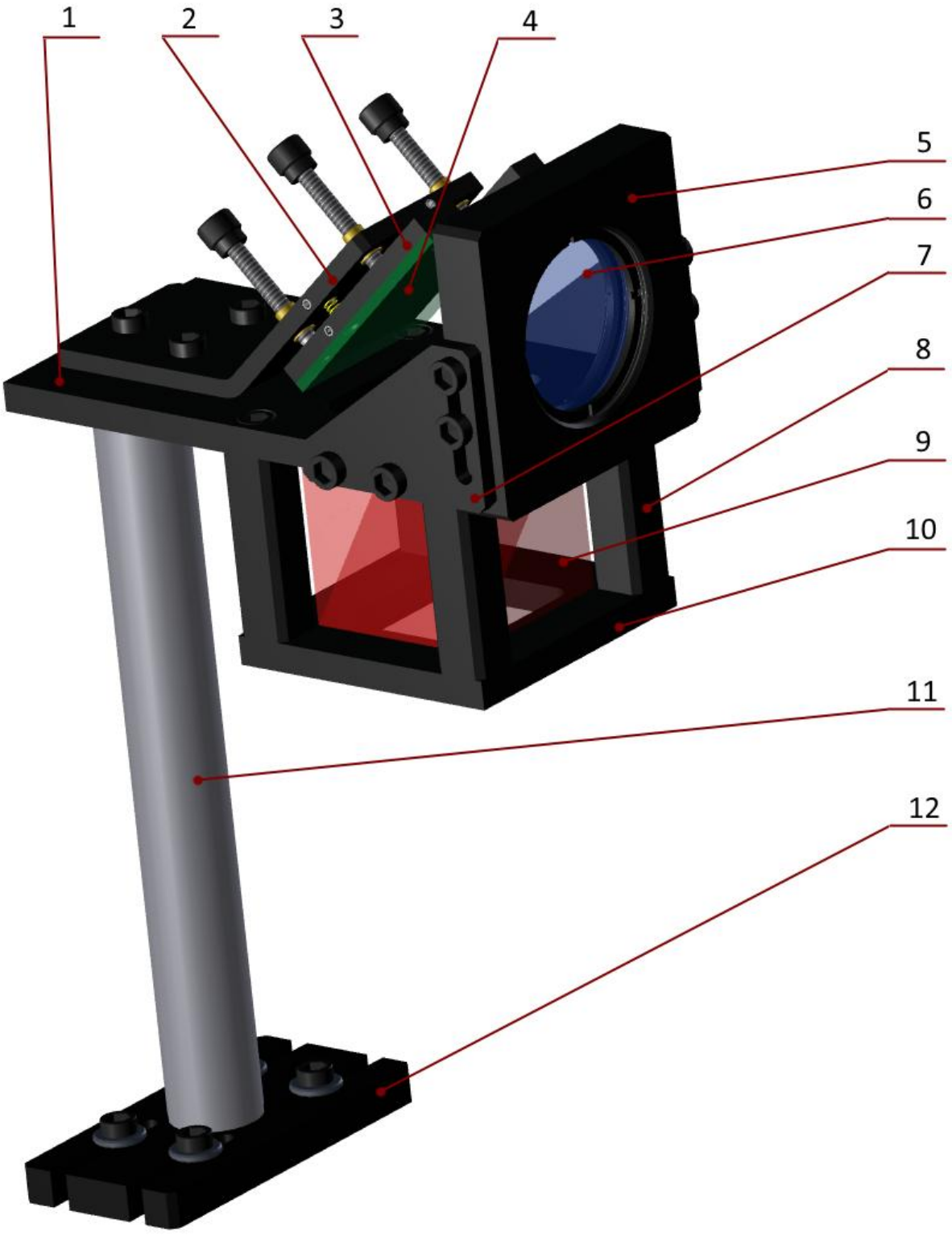


Obrázek 38: Řez tříbodovým kinematickým uložením s barevným rozlišením. V zeleném poli je střed rotace. V červeném poli je dotek kuličky šroubu na dva vsazené válečky. V oranžovém poli je dotek kuličky šroubu na vloženou ocelovou destičku. Pružiny přitahující pevnou a klopnou část k sobě jsou znázorněny žlutou barvou. Závitové vložky jsou znázorněny bronzovou barvou.

Obě pevné části kinematických uložení jsou uchyceny pomocí trojice šroubů M5 s válcovou hlavou k hlavní desce (pozice 3).
Všechny šrouby a závitové vložky jsou sériově vyráběné. Ostatní části jsou vyrobené z duralu a černěné povrchovou úpravou.

5.4 Upevnění kubického děliče svazků a čočky

Kubický dělič svazků (CB)je sevřen mezi hlavní deskou (pozice 1 na obrázku 39) a spodní deskou (pozice 10). Vzdálenost mezi nimi vymezují čtyři tyče čtvercového průřezu s délkou rovnou délce strany CB. Na vnitřních stranách desek v místě jejich dotyku s CB je nanesena tenká vrstva plastického tmelu, která zabraňuje poškrábání či poškození CB. Desky jsou k čtvercovým nohám staženy pomocí osmi šroubů M5 s válcovou hlavou. Čočka fokusující svazky na kameru je uchycená v rámu (pozice 5) s otvorem o průměru dva palce s vnitřním závitem. Čočku v rámu drží dvojice tenkých kroužků s vnějším závitem. Rám je upevněn k hlavní desce pomocí dvojice žeber a osmi šroubů. Žebra mají pro šrouby podélné drážky pro nastavení výškové pozice celého rámu a čočky. Svazky vycházející z CB jeho horní stranou jsou směrovány na čočku rovinným zrcadlem. To je přilepeno k náklopné části kinematického uložení, která je řešena stejným způsobem jako u upevnění planparalelních desek a umožnuje naklápění zrcadla kolem dvou navzájem kolmých os v rovině zrcadla a posun v ose kolmé na tuto plochu. To umožňuje přesné nasměrování svazků na střed čočky. Pevná část kinematického uložení zrcadla je připevněna pomocí trojice šroubů M5 s válcovou hlavou k hlavní desce.

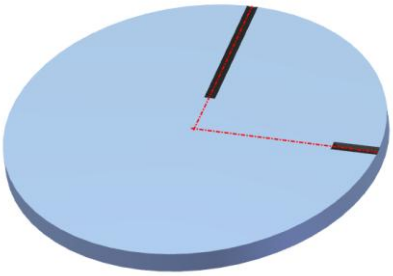


Obrázek 39: Model upevnění kubického děliče svazků a čočky. Pozice: 1-hlavní deska, 2-pevná část kinematického uložení zrcadla, 3-náklopná část kinematického uložení zrcadla, 4-rovinné zrcadlo, 5-rám čočky, 6-čočka, 7-žebro, 8-noha čtvercového průřezu, 9-kubický dělič svazků, 10-spodní deska, 11-ocelová noha pevné délky, 12-podložka

Zrcadlo je umístěno v sestavě z důvodů omezení výškového rozměru přístroje. Pro měření větších poloměrů křivosti vzorku je vhodnější použití čoček s větší ohniskovou vzdáleností. Pro takové čočky by bylo obtížné umísťovat kameru v jejich ohniskové vzdálenosti. Hlavní deska je připevněna šroubem M5 s válcovou hlavou k ocelové noze délky 205 mm. Ta je ve spodní části stejným způsobem připevněna k podložce. Podložka má podélné drážky pro šrouby umožňující posun celého upevnění CB a čočky ve směru laserových svazků dopadajících na CB. Posouváním celého upevnění v tomto směru je možné nastavovat polohu místa dopadu svazků na vzorek umístěný pod CB.
Všechny šrouby jsou sériově vyráběné. Navrhované komponenty jsou vyráběné z duralu a povrchovou úpravou černěny.

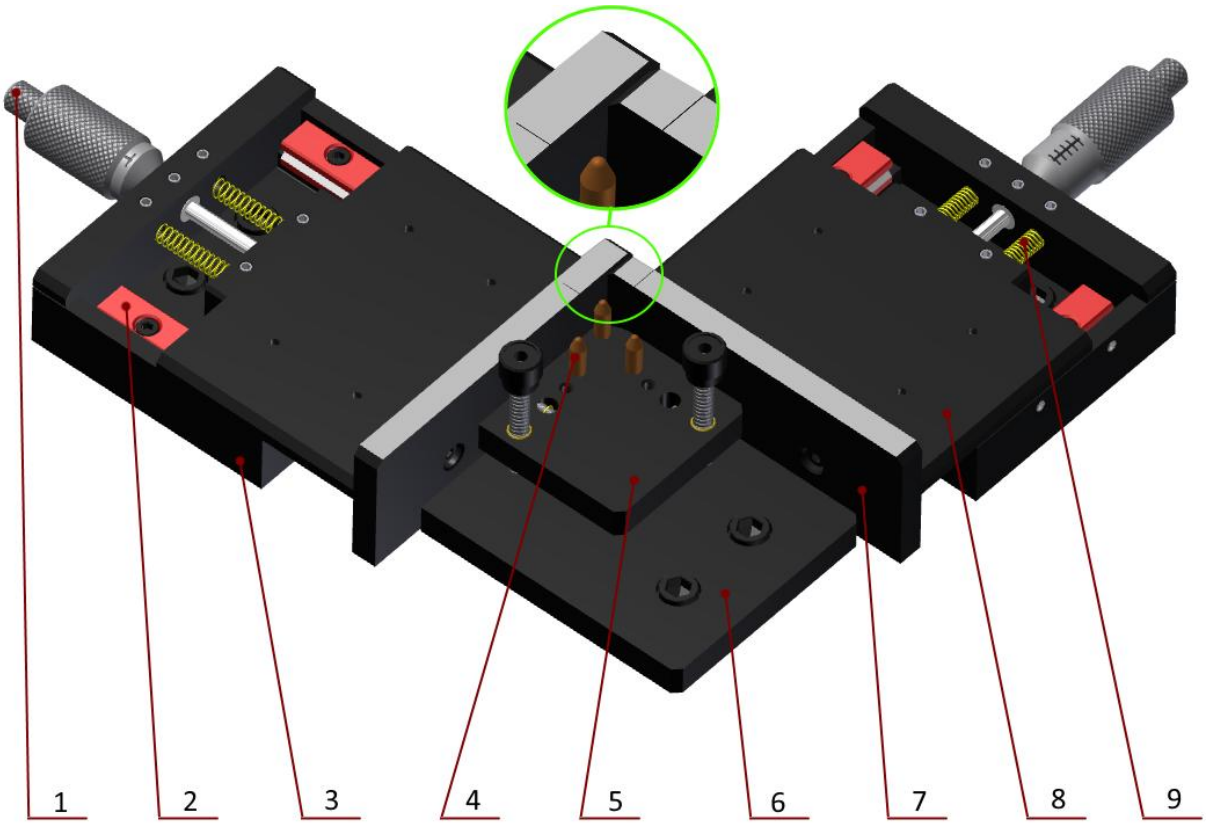
5.5 Uchycení vzorku

Pro vyhodnocování mechanického napětí v tenkých vrstvách ve dvou osách je třeba znát změnu poloměru křivosti vzorku před depozicí a po depozici tenké vrstvy. Měření před depozicí a po depozici je třeba provést ve stejných osách. Toho může být u rotačně symetrického vzorku docíleno pouze jeho uložením při stejném úhlu natočení vůči měřícím laserovým svazkům. Přesného úhlu natočení vzorku se dosáhne pomocí dvojice černých drážek na jinak kontrastně bílém povrchu horní stěny dorazu (pozice číslo 7 na obrázku 41). Rotačně symetrický vzorek má na svém povrchu (opačném, než na kterém se nachází vrstva) dvě středící značky v podobě nakreslených tenkých čar. Jedna z čar je kratší a obě směřují ke středu vzorku (viz obrázek 40). Tyto čáry na vzorku se nastaví vůči čarám na dorazech tak, aby byly shodné dvojice s příslušnou délkou, tedy kratší na vzorku s kratší na dorazu.



Obrázek 40: Schéma justážních čar na rotačně symetrickém vzorku.

Čáry na dorazu směřují do středového bodu trojice hrotů (pozice 4), na kterých je vzorek položen. Trojice hrotů zajišťuje, že vzorek je při všech měřeních umístěn v přesně definovaném uložení. Pokud by se vzorek pokládal na rovinnou plochu, po zakřivení vyvolaném napětím v tenké vrstvě by se mohl podpírat o podložku v jiném místě. To by vyvolávalo vznik nedefinovatelného externího napětí v tenké vrstvě a mohlo znehodnotit měření. Trojice hrotů je závitem připojená k náklopné části tříbodového kinematického uložení (pozice 5). Kinematické uložení je řešeno stejným způsobem jako u ostatních částí deflektometru s výjimkou bodu naklápění, kde je šroub zakončený kuličkou nahrazen pouze kuličkou a kuželová díra nahrazuje válcovou díru pro závitovou vložku šroubu. Šroub byl nahrazen kuličkou z důvodů umístění středu naklápění mezi trojicí hrotů, tedy v místě, kde se nachází střed vzorku. Šroub by překážel v umístění vzorku. Použití kuličky připravilo kinematické uložení o možnost posuvu ve směru optické osy, na této pozici vzorku při měření ale nezáleží.



Obrázek 41: Model uchycení vzorku. Pozice: 1-mikrometrický šroub, 2-lineární vedení, 3-spodní část posuvu dorazu, 4-trn, na který dosedá vzorek, 5-náklopná část kinematického uložení vzorku, 6-pevná část kinematického uložení vzorku, 7-doraz, 8-vrchní část posuvu dorazu, 9-tažná pružina.

Vzorek se opírá o dva posuvné dorazy. Díky mikrometrickým šroubům (pozice 1) můžeme nastavit jejich přesnou polohu pro každý vzorek a zajistit opakovatelnost měření ve stejných podmínkách. Dorazy jsou umístěny na lineárním vedení od firmy SKF a umožňují rozsah pohybu dorazů o 26 mm. Měřeny můžou být vzorky v rozmezí průměru 25 až 77 mm nebo čtvercového či obdélníkového průřezu s rozměry v rozmezí 25 až 77 mm. Vrchní část posuvů proti mikrometrickým šroubům táhne dvojice tažných pružin (pozice 9). Mikrometrický šroub je umístěn ve stejné vzdálenosti od obou lineárních vedení a obě pružiny jsou ve stejné vzdálenosti od mikrometrického šroubu. Mikrometrický šroub i pružiny jsou ve stejné výškové rovině. Díky tomuto uspořádání není vedení namáháno žádným silovým momentem. Všechny šrouby jsou sériově vyráběné komponenty. Zbylé součásti jsou vyráběné z duralu, s výjimkou trnů, které jsou z hliníku.

5.6 Kamera a její upevnění

Kamera je uchycená na výškově nastavitelné noze (pozice 2 v obrázku 42) pomocí šroubu v dolní části kamery. Noha je upevněna k základní desce pomocí svorky (pozice 3), která umožňuje uchycení nohy v libovolné pozici. Pro experiment byla vybrána kamera s označením G-2000 od firmy Moravské přístroje. Technická specifikace kamery je uvedena v tabulce parametrů kamery.

Obrázek 42: Kamera a její uchycení. Pozice: 1-kamera, 2-výškově nastavitelná noha, 3-svorka

Výrobce na požádání odstranil krycí sklíčko čipu. Na čipu samotném dochází k difrakci a zpětnému odrazu dopadajícího laserového svazku. Ten se odrážel od krycího sklíčka zpět na čip kamery, který tak zaznamenával mnoho dalších falešných světlých bodů. Většinu bodů bylo možné odstranit pomocí snížení doby expozice, avšak existence i nízkého počtu bodů může znehodnotit měření.

Tabulka parametrů kamery [14]	
Označení	G1-2000
výška kamery	83 mm
šířka kamery	76 mm
hloubka kamery	26 mm
Typ čipu	CCD
výška čipu	5,4 mm
šířka čipu	7,2 mm
rozměr pixelu	4,4 µm × 4,4 µm
rozlišení	1628 × 1236 pixelů
Rozlišení ADC	16 bitů
Nejkratší expozice	0,000 125 s
Nejdelší expozice	Neomezena, limitována saturací

5.7 Základní deska

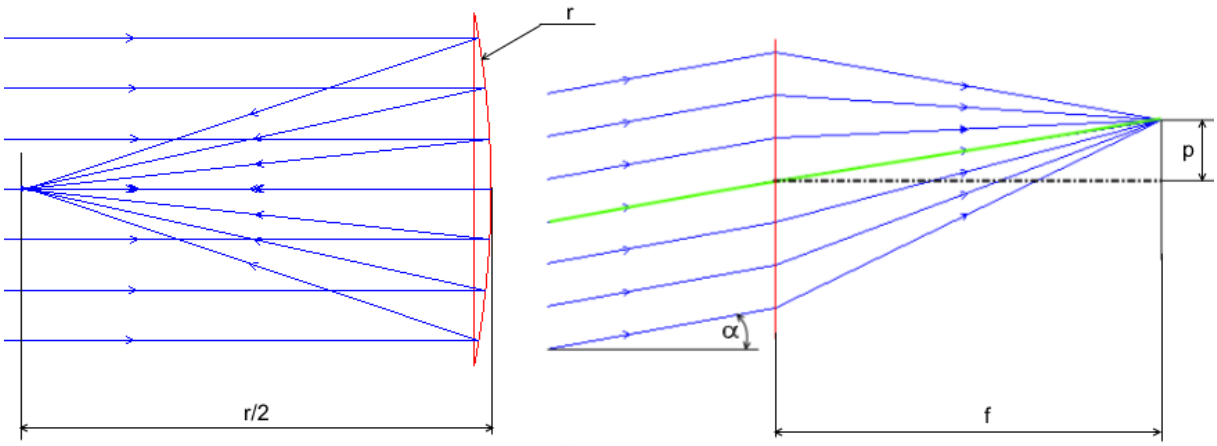
Všechny hlavní části deflektometru jsou připevněny k základní desce sériově vyráběné firmou Thorlabs. V základní desce je vyvrtaná síť děr M5 které jsou od sebe vzdáleny 25 mm. Deska má délku 600 mm, šířku 400 mm, tloušťku 12,7 mm a je vyrobena z hliníku s povrchovou úpravou černěním. Deska je znázorněna na obrázku 43.

Obrázek 43: Základní deska deflektometru

6 Experimentální měření

6.1 Vyhodnocování poloměru křivosti

Pro proces měření využijeme dvou ze základních vět geometrické optiky.
Všechny vzájemně rovnoběžné paprsky dopadající na čočku se setkají ve stejném bodě v ohniskové rovině čočky (znázorněno vpravo na obrázku 44).
Všechny paprsky rovnoběžné s optickou osou dopadající na kulové vyduté zrcadlo protínají optickou osu ve vzdálenosti poloviny poloměru zrcadla od bodu, kde povrch zrcadla protíná optickou osu (znázorněno vlevo na obrázku 44).

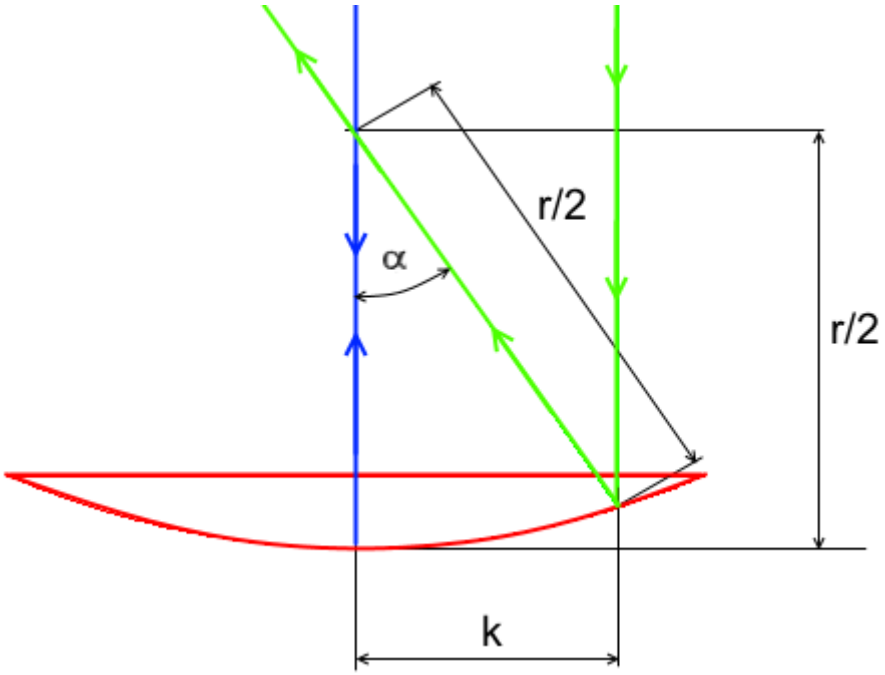


Obrázek 44: Trasa paprsků dopadajících na kulovou zrcadlovou plochu (vlevo) a procházejících paraxiální čočkou (vpravo). Vytvořeno v programu Zemax a upraveno v programu pro grafickou úpravu.

Trasa paprsku procházejícího čočkou v místě optické osy není změněna. Po průchodu čočkou svírá stále stejný uhel s otickou osou jako před průchodem (Zelený paprsek na obrázku 43). Úhel tohoto paprsku můžeme určit ze vzdálenosti bodu, ve kterém se paprsky protínají, od optické osy v ohniskové rovině čočky pomocí vztahu

$$\alpha = \operatorname{artg}\left(\frac{p}{f}\right). \tag{6.1}$$

Úhel α, pod kterým paprsky dopadají na čočku, je zároveň úhel (měřený od optické osy sestavy deflektometru), pod kterým se paprsky odrážejí od měřeného vzorku. Předpokládejme, že vzorek má tvar kulového vrchlíku, tj. odráží paprsky stejně jako kulové zrcadlo. Dále se omezíme pouze na paprsky ležící v osách jednotlivých svazků dopadajících na vzorek. Dvojce takových paprsků je znázorněna na obrázku 45.



Obrázek 45: Dvojce paprsků odrážejících se od měřeného vzorku. Vytvořeno v programu Zemax a upraveno v programu pro grafickou úpravu.

Zelený paprsek dopadá na vzorek a odráží se tak, že s optickou osou svírá úhel α. Modrý paprsek je shodný s optickou osou a jeho úhel dopadu a odrazu je roven nule. Z hodnoty úhlu α můžeme určit poloměr křivosti vzorku pomocí vztahu

$$\mathrm{r} = \frac{2k}{\sin(\alpha)}, \tag{6.2}$$

kde k je vzdálenost mezi dvěma uvažovanými rovnoběžnými paprsky.
Pokud se zelený paprsek odráží od vzorku pod úhlem α a pod tímto úhlem dopadá na čočku, pak také modrý paprsek odrážející se pod nulovým úhlem, dopadá na čočku pod nulovým úhlem. Pak p v rovnici (6.1) můžeme považovat za vzdálenost mezi bodem dopadu modrého paprsku a bodem dopadu zeleného paprsku v ohniskové rovině čočky. Dosazením vztahu (6.1) za úhel α dostaneme vztah pro výpočet poloměru křivosti měřeného vzorku ze vzdálenosti mezi body dopadu dvou paprsků v ohniskové rovině čočky, tedy mezi dvěma světlými body zachycenými na čipu kamery

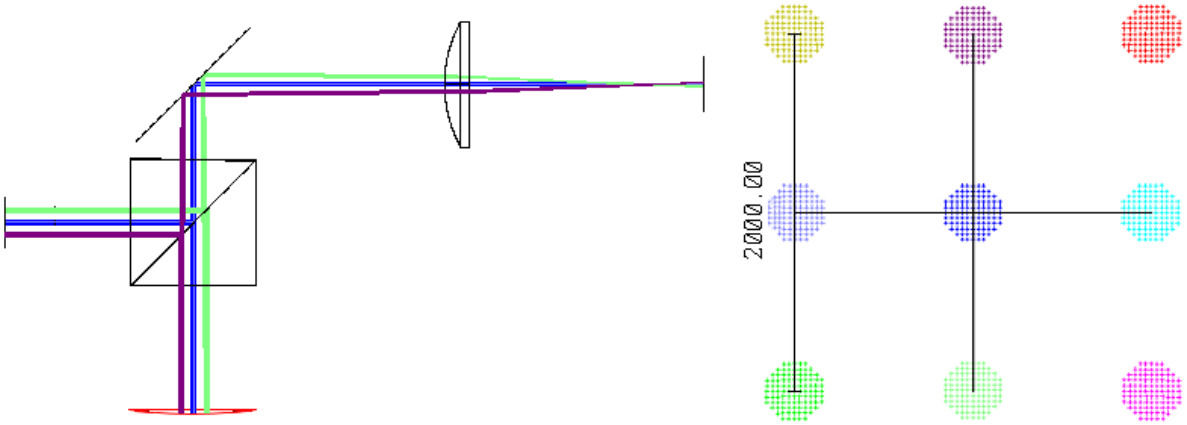
$$\mathrm{r} = \frac{2k}{\sin\left(\mathrm{artg}\left(\frac{p}{f}\right)\right)}, \tag{6.3}$$

kde r je poloměr křivosti vzorku ve směru spojnice dvou bodů na čipu kamery, mezi kterými je měřena vzdálenost p.
Rovnice 6.3 je odvozena za předpokladů, že kulová plocha povrchu vzorku ani čočka nemají žádné zobrazovací vady.
Kulová plocha vzorků mívá poloměr křivosti v řádech metrů až desítek metrů. Laserové svazky dopadající na tuto plochu jsou v těsné blízkosti její optické osy (jsou vzdáleny od osy v řádech milimetrů). V tomto případě se sférická vada kulové plochy vzorku v měření neprojeví.

Čočka má mnohonásobně menší poloměr křivosti než kulová plocha vzorku, její sférická vada se v měření projeví, avšak pouze v určitém rozmezí hodnot měřených poloměrů křivosti vzorku. Při klesajícím poloměru křivosti vzorku začne v pozorovaném obrazci laserových svazků v ohniskové rovině čočky převládat vliv defokusace a sférická vada přestane být patrná. Vhodnou volbou čočky je tedy možné odstranit vliv sférické vady čočky.
Vztah (6.3) můžeme tedy považovat za platný v případě měření poloměrů křivosti vzorků v řádech metrů a větších a pro vhodně zvolenou plankonvexní čočku k těmto měřeným poloměrům křivosti.

6.1.2 Ověření platnosti rovnice pro určení poloměru křivosti vzorku

Pro ověření platnosti vztahu (6.3) a předpokladů o zanedbání zobrazovacích vad byly srovnány výsledky získané tímto vztahem s výsledky získanými simulací v programu Zemax.
Po dosazení hodnot $k = 6\,mm, p = 1\,mm$ a $f = 100\,mm$ do vztahu (6.3) dostaneme hodnotu poloměru křivosti vzorku $r = 1\,202\,mm$.
Pro simulaci v programu Zemax byla použita vzájemná vzdálenost k sousedních dopadajících laserových svazků rovna $6\,mm$ a poloměr křivosti měřeného vzorku $1\,202\,mm$. Ze spotdiagramu vykresleného programem Zemax můžeme určit vzájemnou vzdálenost p dvou sousedních bodů v ohniskové rovině čočky. Ta byla stanovena na 1 mm. Optická sestava, na které byla simulace vytvořena, je znázorněna na obrázku 46 i se záznamem spotdiagramu.

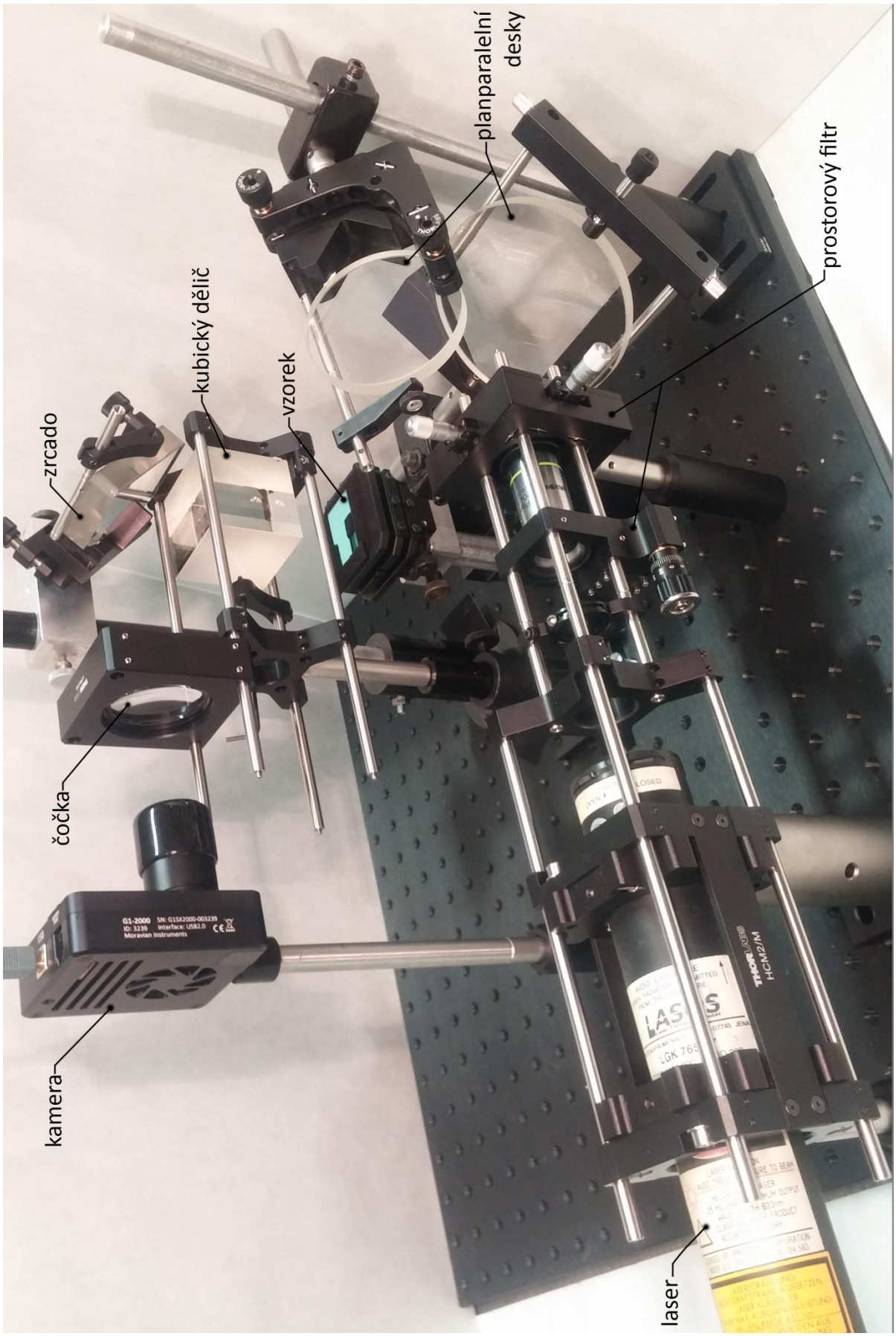


Obrázek 46: Schéma optické sestavy pro trasování paprsků vytvořené funkcí 3DLayout (vlevo) a záznam spotdiagramu (vpravo). Velikost úseček ve spotdiagramu je uvedená μm. Vytvořeno v programu Zemax.

Simulace v programu Zemax souhlasí s výpočtem podle vztahu (6.3).

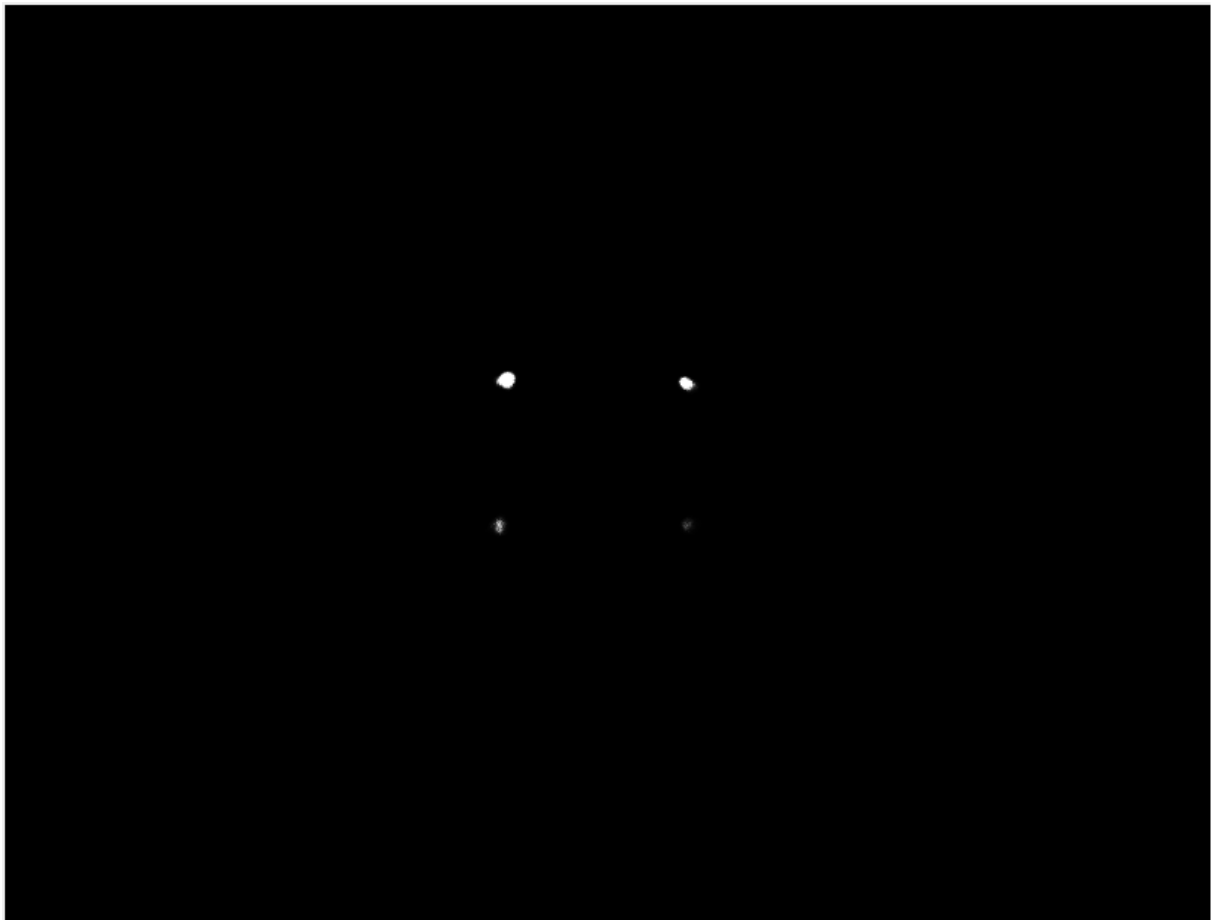
6.2 Ověření funkčnosti deflektometru

Ověření funkčnosti deflektometru s dvěma planparalelními deskami bylo provedeno na experimentální sestavě, která je zachycena na fotografii v obrázku 47. V sestavě byly využity dvě planparalelní desky o tloušťce 8 mm bez úpravy odrazivosti její přední i zadní strany.



Obrázek 47: Sestava pro ověření funkčnosti deflektometru

Planparalelní desky vytvořily čtveřici rovnoběžných laserových svazků o různých intenzitách, které byly zachyceny kamerou v ohniskové rovině čočky. Obraz pořízený kamerou pro typický měřený vzorek je znázorněn na obrázku 48.



Obrázek 48: Obraz laserových stop zachycených kamerou v ohniskové rovině čočky. Reálná velikost pořízeného záznamu je 7,2 x 5,4 mm. Podélná osa snímku odpovídá směru kratšího rozměru měřených vzorků.

Vzdálenost mezi jednotlivými body na čipu kamery je dána vztahem

$$\mathrm{p} = n_p \,\mathrm{j}, \tag{6.4}$$

kde n_p je počet pixelů mezi středy dvou světlých bodů a *j* je rozměr jednoho pixelu kamery v příslušném směru. Počet pixelů mezi jednotlivými body lze snadno odečíst pomocí softwaru, který výrobce kamery poskytuje k jejímu ovládání.

6.2.1 Porovnání naměřených hodnot

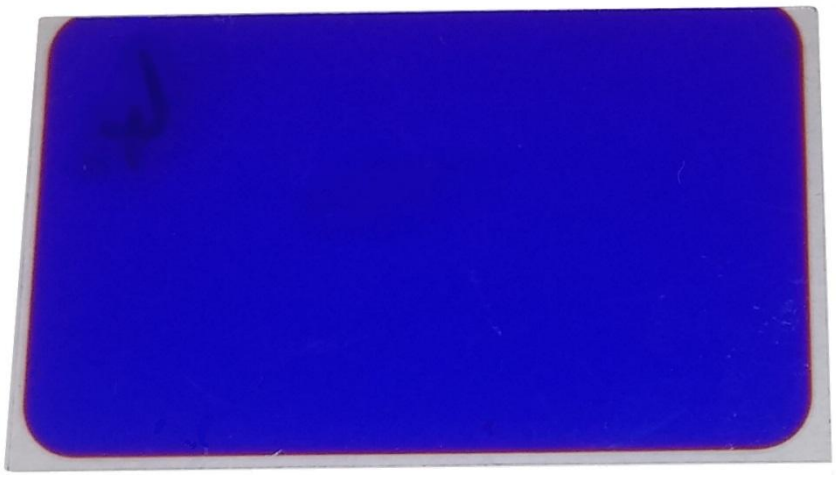
Pro měření za účelem ověření funkčnosti deflektometru byl vybrán reprezentativní vzorek, který je zachycený na fotografii v obrázku 48. Jedná se o systém dvaceti tří tenkých vrstev TiO_2/SiO_2 o celkové tloušťce 1,84 μm deponovaný na podložce ze skla N-BK7. Podložka má rozměry 45 x 25 mm a tloušťku 1,5 mm. Pro stanovení neurčitosti v měření bylo měření daného vzorku opakováno dvacetkrát pro směr rovnoběžný s kratším a delším rozměrem vzorku. Hodnoty jednotlivých měření jsou uvedeny v tabulce naměřených poloměrů křivosti.

Tabulka naměřených poloměrů křivosti				
	r_x [mm]	$(r_x - \bar{r})$ [mm]	r_y [mm]	$(r_y - \bar{r})$ [mm]
	1171	11	1503	-2
	1175	15	1517	13
	1147	-13	1474	-31
	1156	-3	1521	16
	1128	-32	1533	29
	1179	19	1460	-45
	1202	42	1543	38
	1148	-12	1475	-29
	1154	-6	1525	20
	1167	7	1462	-43
	1151	-8	1519	14
	1161	2	1483	-21
	1161	2	1527	22
	1169	9	1525	20
	1151	-8	1460	-45
	1172	12	1517	12
	1156	-3	1511	6
	1137	-23	1475	-29
	1147	-13	1532	27
	1161	2	1529	24
Průměr $\bar{r}$	1159		1505	

Za výslednou hodnotu měření je považována průměrná hodnota všech změřených hodnot. Pro vyhodnocení rozšířené nejistoty typu A byl použit následující vztah [15] :

$$\delta \mathrm{r} = k_{20} \sqrt{\frac{1}{n\,(n-1)} \sum_{i=1}^{n} (r_i - \bar{r})^2}\,, \tag{6.4}$$

kde $k_{20} = 2{,}09$ je koeficient pro konfidenční pravděpodobnost 95% a počet měření $n = 20$.



Obrázek 48: Fotografie měřeného vzorku

Dosazením hodnot z tabulky naměřených poloměrů křivosti do rovnice (6.4) dostaneme hodnotu poloměrů křivosti vzorku ve dvou navzájem kolmých směrech, kterou můžeme porovnat s hodnotou poloměrů křivosti vzorku v odpovídajících směrech, která byla naměřena pomocí optického profilometru.

Hodnota naměřená pomocí deflektometru:
Poloměr křivosti ve směru delšího rozměru vzorku: $r_y = (1\,505 \pm 28)$ mm, $\rho r_x = 1{,}8\%$
Poloměr křivosti ve směru kratšího rozměru vzorku: $r_x = (1\,159 \pm 17)$ mm, $\rho r_y = 1{,}7\%$

Hodnota naměřená pomocí optického profilometru:
Poloměr křivosti ve směru delšího rozměru vzorku: $r_y = (1\,511 \pm 3)$ mm
Poloměr křivosti ve směru kratšího rozměru vzorku: $r_x = (1\,162 \pm 3)$ mm,

kde ρr značí relativní neurčitost uvedené hodnoty,

Ze srovnání uvedených hodnot příslušných poloměrů křivosti vzorku lze konstatovat souhlas výsledků získaných deflektometrem a optickým profilometrem. Tím můžeme považovat funkčnost deflektometru za prokázanou.

7 Závěr

Diplomová práce se zaměřuje na návrh a ověření funkčnosti přístroje (deflektometru) pro měření poloměrů křivosti povrchu systému podložka-tenká vrstva (soustava vrstev) pomocí odrazu laserových svazků od tohoto povrchu. Zmíněný poloměr křivosti je nejvýznamnějším parametrem pro určení mechanického napětí v tenkých vrstvách nedestruktivními metodami, které jsou založeny na měření deformace výše uvedeného sytému způsobené mechanickým napětím ve vrstvě. Práce obsahuje přehled takových metod používaných pro měření mechanického napětí v tenkých vrstvách a rozbor jejich možných výhod, nevýhod či omezení použití.
Po uvážení několika možných variant přístroje je vybrána jedna z nich – deflektometr s planparalelními deskami. Jeho nově navržená konstrukce disponuje mnohými výhodami, jako jsou:

- kolmý dopad laserových svazků (díky kterému není nutné měřit úhel dopadu a přepočítávat podle něj naměřené hodnoty poloměru křivosti vzorku),
- možnost měření poloměru křivosti povrchu vzorku (a tím i mechanického napětí) ve dvou navzájem kolmých směrech,
- možnost rychlého vyhodnocování měření v každém směru z několika hodnot vzdáleností stop laserových svazků na čipu kamery, které jsou zachycené všechny během jednoho snímku,
- rozpoznání tahového nebo tlakového charakteru mechanického napětí ve vrstvě,
- rozlišení vhodných nebo nevhodných podložek pro depozici vrstev,
- snadná změna rozsahu měření.

V práci je prezentován konstrukční návrh deflektometru a provedení laboratorní sestavy sloužící k ověření funkčnosti navrženého deflektometru. Je provedena simulace konfigurace stop laserových svazků na čipu kamery pro různé tvary povrchu vzorku. Rovněž je provedeno určení měřicích nejistot v měření poloměru křivosti vzorku a srovnání s výsledky získanými pomocí optického profilometru MicroProf FRT.

Poznatky získané při řešení úkolů diplomové práce budou využity při realizaci funkčního vzoru deflektometru v Laboratoři koherenční optiky Ústavu fyzikálního inženýrství VUT v Brně.

8 Seznam použitých zdrojů

[1] THIELSCH, Roland; GATTO, Alexandre; KAISER, Norbert. Mechanical stress and thermal-elastic properties of oxide coatings for use in the deep-ultraviolet spectral region. *Applied optics*, 2002, 41.16: 3211-3217.

[2] TAMULEVIČIUS, S. Stress and strain in the vacuum deposited thin films. *Vacuum*, 1998, 51.2: 127-139.

[3] STONEY, G. Gerald. The tension of metallic films deposited by electrolysis. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character*, 1909, 82.553: 172-175.

[4] Nickel - Properties, Fabrication and Applications of Pure Nickel. Nickel Alloys . Net: Everything You Wanted To Know About Nickel Alloys [online]. [cit. 2016-04-02]. Dostupné z: http://www.nickel-alloys.net/commercially_pure_nickel.htm

[5] LÁNG, G. G.; SAS, N. S.; VESZTERGOM, S. Experimental Determination of Surface Stress Changes in Electrochemical Systems–Possibilities and Pitfalls. *Chemical and Biochemical Engineering Quarterly*, 2009, 23.1: 1-9.

[6] ENNOS, Anthony E. Stresses developed in optical film coatings. *Applied optics*, 1966, 5.1: 51-61.

[7] BeamSplitters cataloge. *Foctek Photonics: Professional manufacturer of optical components* [online]. Fujian [cit. 2016-04-23]. Dostupné z: http://www.foctek.com/products/optics/PDF/other%20beamsplitter.pdf

[8] OHLÍDAL, M.; PÁLENÍKOVÁ, K. Možnosti optického profilometru MicroProf FRT při 3D hodnocení kvality povrchu. *Jemná mechanika a optika*, 2004, 49.9: 251-255.

[9] NIX, William D. Mechanical properties of thin films. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 1989, 20.11: 2217-2245.

[10] FLORO, J. A., et al. Real-time stress evolution during Si1-xGex heteroepitaxy: Dislocations, islanding, and segregation. *Journal of Electronic Materials*, 1997, 26.9: 969-979.

[11] SETHURAMAN, Vijay A., et al. In situ measurements of stress evolution in silicon thin films during electrochemical lithiation and delithiation. *Journal of Power Sources*, 2010, 195.15: 5062-5066.

[12] Powell Lens Buyer's Guide. *Laserline Optics Canada* [online]. [cit. 2016-04-22]. Dostupné z: http://www.laserlineoptics.com/powell_primer.html

[13] Laser Line Generator Lenses. Thorlabs [online]. [cit. 2016-04-22]. Dostupné z: http://www.thorlabs.de/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=9394

[14] Pointační a zobrazovací CCD kamery řady G0 a G1. Moravské přístroje: CCD kamery pro astronomii [online]. Malenovice (Zlín) [cit. 2016-05-17]. Dostupné z: http://www.gxccd.com/art?id=328&lang=405

[15] Zápis číselných hodnot a nejistoty měření. *Ústav fyzikálního inženýrství: Fakulta strojního inženýrství* [online]. Brno [cit. 2016-05-17]. Dostupné z: http://physics.fme.vutbr.cz/~mcerny/vyuka/chyby.pdf

9 Seznam použitých zkratek a symbolů

b	[m]	vzdálenost neutrální osy od povrchu substrátu
CB		Cube Beamsplitter (kubický dělič svazků)
CCD		druh čipu kamery
d	[m]	tloušťka nosníku
dy	[m]	deponovaný přírůstek vrstvy niklu
dz	[m]	přírůstek v poloměru křivosti
d_V	[m]	změna vzdálenosti dvou bodů na kameře v podélném směru
d_H	[m]	změna vzdálenosti dvou bodů na kameře v příčném směru
E	[Pa]	Youngův modul pružnosti
f	[m]	ohnisková vzdálenost čočky
In-situ		proces měření napětí v tenké vrstvě během její depozice
j	[m]	rozměr jednoho pixelu čipu kamery
k	[m]	vzdálenost mezi sousedními laserovými svazky dopadajícími na vzorek
k_{20}	[-]	koeficient pro konfidenční pravděpodobnost 95%
l	[m]	vzdálenost odkloněného bodu od roviny středu poloměru křivosti
mm		milimetr
n	[-]	počet měření
nm		nanometr
n_p	[-]	počet pixelů mezi středy dvou světlých bodů
p	[m]	vzdálenost dvou světlých bodů na čipu kamery
r	[m]	poloměr křivosti

r_x	[m]	poloměr křivosti ve směru rovnoběžném s delším rozměrem vzorku
r_y	[m]	poloměr křivosti ve směru rovnoběžném s kratším rozměrem vzorku
$\bar{r}$	[m]	Průměrná hodnota poloměru křivosti příslušného směru
s		sekunda
t	[m]	tloušťka tenké vrstvy
T_d	[K]	teploty během depozice
T_p	[K]	teploty prostředí
y	[m]	tloušťka nadeponované vrstvy niklu
z	[m]	velikost odklonu bodu od osy
α	[rad]	úhel, který svírá odražený paprsek s optikou osou
α_{film}	[K^{-1}]	koeficient tepelné roztažnosti matriálu vrstvy
α_{sub}	[K^{-1}]	koeficient tepelné roztažnosti matriálu substrátu
δr	[m]	rozšířená nejistota typu A
μm		mikrometr
σ_{ext}	[Pa]	vnější napětí
σ_{intr}	[Pa]	vnitřní napětí
$\sigma_{phys-chem}$	[Pa]	fyzikálně-chemické
σ_{therm}	[Pa]	tepelné napětí
σ_{tot}	[Pa]	celkové napětí
ρr	[%]	relativní neurčitost
ν		Poissonovo číslo

10 Seznam příloh

- Obrázek 3D modelu navrženého deflektometru v programu Autodesk Inventor
- Výkres sestavy deflektometru
- Výkresy jednotlivých vyráběných komponent