

Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích

Pedagogická fakulta – Katedra fyziky

Holografický interferometr Mach – Zehnderova typu

Bakalářská práce

Vedoucí práce: RNDr. Pavel Kříž, Ph.D.

Autor: Petr Jindra

Anotace:

Cílem mé bakalářské práce bylo zpracovat funkci holografického interferometru Mach – Zehnderova typu a popis jeho částí. Následně pak zpracovat možné využití holografických interferometrů v praxi. Dalším úkolem bylo vyhodnotit naměřené hodnoty pomocí programu DIPS a programů napsaných v programu MATLAB.

Abstract:

The goal of my bachelor's work is process of holographic interferometr Mach – Zehnder's type and exact description all of its parts and its application in practice. Another goal of my work is evaluation of measured values in program DIPS and Matlab.

Prohlašuji, že svoji bakalářskou - diplomovou - disertační práci jsem vypracoval/a samostatně pouze s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu citované literatury.

Prohlašuji, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb. v platném znění souhlasím se zveřejněním své bakalářské - diplomové - disertační práce, a to v nezkrácené podobě - v úpravě vzniklé vypuštěním vyznačených částí archivovaných pedagogickou fakultou elektronickou cestou ve veřejně přístupné části databáze STAG provozované Jihočeskou univerzitou v Českých Budějovicích na jejích internetových stránkách.

V Kostelní Radouni dne 25. 4. 2008

.....

Poděkování:

Tímto bych chtěl poděkovat svému vedoucímu práce RNDr. Pavlu Křížovi, Ph.D. za cenné rady a připomínky při zpracování mé práce.

Obsah:

1. Úvod	6
2. Teoretický popis	7
2.1 Holografický interferometr	7
2.1.1 Úvod	7
2.1.2 Součásti holografického interferometru	11
2.1.3 Hologram	14
2.1.4 Seřízení interferometru	16
3. Užití holografické interferometrie v praxi	18
3.1 Úvod	18
3.2 Metoda jednoho interferometru	18
3.3 Metoda dvou interferometrů	19
4. Měření teploty vysokofrekvenčních výbojů	20
5. Diskuse vyhodnocených údajů	43
6. Závěr	45
7. Seznam použité literatury	46

1. Úvod

V této bakalářské práci je hlavním cílem teoreticky vysvětlit funkci holografického interferometru Mach – Zehnderova typu. Tento teoretický popis funkce by se měl skládat hlavně z podrobného vysvětlení jak holografický interferometr Mach – Zehnderova typu funguje. Tento popis funkce by se měl skládat nejprve z vlastního popisu funkce. Následovat bude seznámení s jednotlivými částmi holografického interferometru a popsání konkrétních částí interferometru použitého při měření, ze kterého se vyhodnocovaly naměřené hodnoty pro tuto bakalářskou práci. Dále se uvede něco o hologramu a o získávání interferogramu. Nakonec tohoto popisu bude uvedeno, jak se seřizuje interferometr. V další části této bakalářské práce bude popsáno možné využití holografického interferometru v praxi. Praktické použití bude názorně vysvětleno na několika příkladech.

V druhé části mojí bakalářské práce bude seznámení s vyhodnocováním interferogramů. Zde bude popsán celý postup, jak jsem získával interferogramy ze záznamů pořízených vysokorychlostní CCD kamerou Motion Scope 1000S od výběru snímků, přes vyfiltrování, až po vyhodnocování pomocí programu MATLAB. Uveden bude také názorný příklad vyhodnocování v tomto programu.

Nejdůležitější a zároveň časově nejnáročnější částí této práce je vyhodnocení měření teploty vysokofrekvenčních výbojů. Zde budou prezentovány výsledky konkrétních měření, která byla již dříve provedena vedoucím práce RNDr. Pavlem Křížem, Ph.D. v laboratoři jihočeské univerzity. Uveden zde bude také příklad interferogramů vysokofrekvenčních výbojů i s uvedením maxim pro řezu interferogramem.

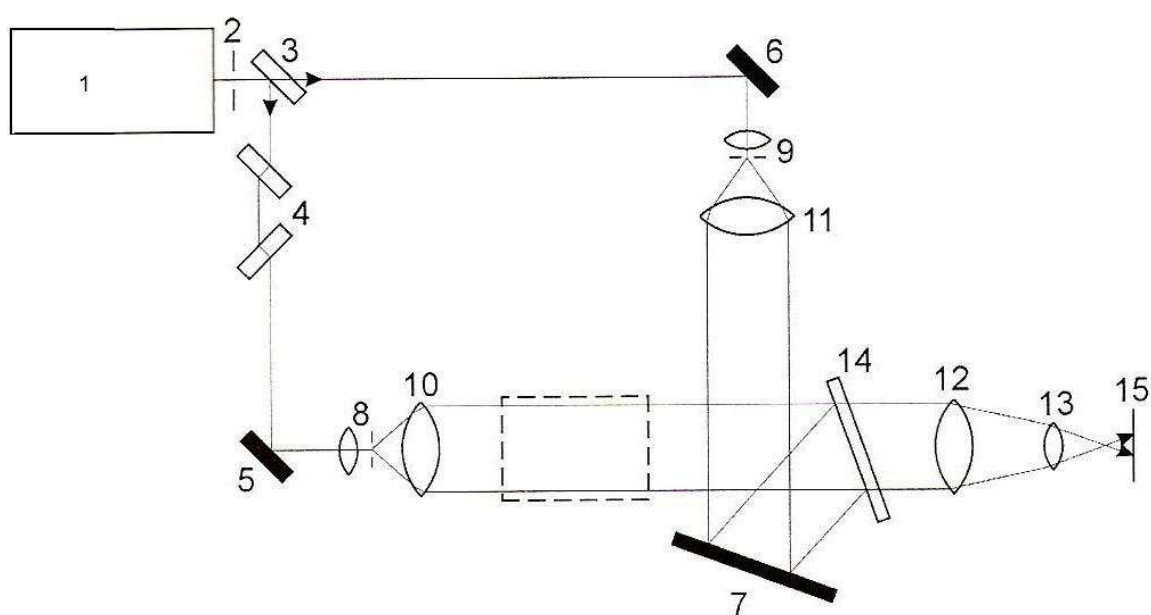
V poslední části budou diskutovány výsledky vyhodnocení naměřených hodnot a jejich chyby a možnosti zvýšení přesnosti vyhodnocování těchto měření.

2. Teoretický popis

2.1 Holografický interferometr

2.1.1 Úvod

Holografický interferometr je zařízení, které se skládá z těchto částí: Zdroj koherentního světla (He-Ne laser), fotografická uzávěrka, dělič laserového svazku, půlvlnné destičky, zrcadla, prostorové filtry, čočky, držák s holografickou destičkou, stínítko. Znázornění uspořádání holografického interferometru Mach-Zehnderova interferometru je znázorněno na obr. 2.1 (převzato z [1]).



obr. 2.1 Schematické uspořádání holografického interferometru Mach – Zehnderova typu (1 – zdroj koherentního světla, 2 – fotografická uzávěrka, 3 – dělič laserového svazku, 4 – půlvlnné destičky, 5-7 – zrcadla, 8-9 – prostorové filtry, 10-13 – čočky, 14 – držák s holografickou destičkou, 15 – stínítko).

Pomocí holografického interferometru lze měřit například teplotu plamene svíčky, nebo teplotu plazmatu. Schematické znázornění interferometru Mach Zehnderova typu je na obr. 2.1. Tento interferometr má dvě větve: předmětovou větev a referenční větev. Jak už napovídá název, tak v předmětové větvi je umístěn předmět, který chceme studovat. Na obr. 2.1 je místo, kde je umístěn předmět označeno

čárkovaně. Tento studovaný předmět musí být transparentní a musí mít index lomu odlišný od okolního prostředí. Po zapojení celé soustavy a v průběhu měření nám tento předmět bude vyvolávat změnu fáze světelné vlny, která jím bude procházet. Z tohoto důvodu je tento předmět označován jako fázový objekt. Fázový objekt bude vyvolávat fázové posunutí procházejícího laserového paprsku oproti referenčnímu stavu zachycenému na hologram. Referenční stav je, když do předmětové větve neumístíme studovaný předmět a na holografickou destičku necháme zobrazit hologram interferujících paprsků bez studovaného předmětu. To znamená, že slouží k rekonstrukci původních světelných vln z hologramu.

Princip holografického interferometru je založen na vlastnostech holografických záznamů a jejich využití při rekonstrukci referenčního stavu zachyceného na hologram a při vytváření interferenčního obrazce. První co musíme udělat je zholografování oblasti, kam budeme později umisťovat studovaný předmět, tzn. expozice holografického záznamu referenčního stavu této oblasti na fotocitlivou holografickou destičku umístěnou v držáku 14 (obr. 2.1). To se děje osvitem fotocitlivé destičky oběma světelnými svazky (referenčním i předmětovým). Tímto osvitem vznikne na fotografické destičce velmi jemná interferenční struktura, kterou rozpoznáme pouze pod mikroskopem. Tato struktura se nazývá hologram. Hologram má v sobě informace o fázi světelné vlny procházející v době expozice předmětovou větví interferometru.



obr. 2.2 Držák hologramu

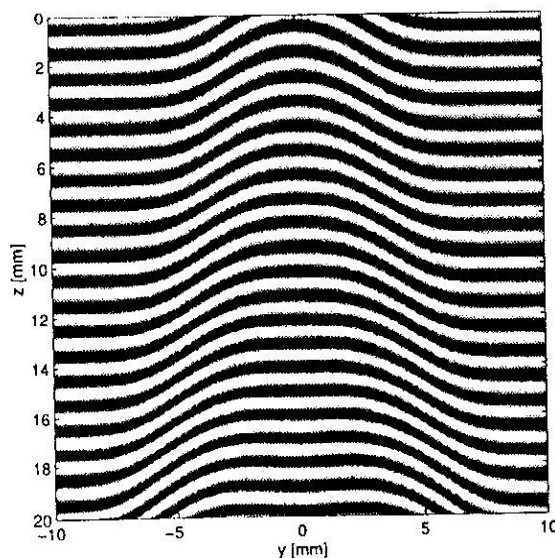
Když je toto hotovo destičku s exponovaným hologramem vyjmeme z držáku a hologram vyvoláme klasickou fotografickou cestou a následně holografickou destičku s vyvolaným hologramem umístíme zpět do držáku 14 (obr. 2.1) na původní místo. Když hologram osvítíme alespoň zčásti stejnou referenční vlnou, dojde k tzv. rekonstrukci původní vlnoplochy v prostoru za holografickou destičku směrem ke stínítku (obr. 2.2). To způsobí, že se za destičkou šíří celkem čtyři světelné vlny. Reálná referenční vlna a reálná předmětová vlna nesou velice jemnou interferenční strukturu zachycenou na hologram a šíří se beze změny i za hologramem. Zbývající dvě vlny jsou světelné rekonstruované vlny (referenční a předmětová). Tyto vlny jsou rekonstruované z hologramu dopadem reálné referenční vlny a mají parametry shodné s jejich původními parametry v době expozice hologramu. Z toho logicky vyplývá, že rekonstruovaná světelná vlna je prakticky totožná s původní světelnou vlnou šířící se v aparatuře v době expozice hologramu, a to jak v případě rekonstruované referenční vlny tak i rekonstruované předmětové vlny. K interferenci pozorovatelné pouhým okem může docházet pouze mezi oběma referenčními světelnými vlnami, reálnou a rekonstruovanou, nebo mezi oběma předmětovými vlnami, opět mezi reálnou a rekonstruovanou.

Důležitou úlohu v celém interferometru má zrcadlo 7 (obr. 2.1). Jelikož při seřizování interferometru na konečnou šířku proužků musí být zajištěn fázový posun mezi oběma referenčními svazky, reálným a rekonstruovaným. Tento posun nám právě zajišťuje toto zrcadlo, které změni směr šíření reálného referenčního svazku. Zrcadlo je otáčivé kolem dvou os, vodorovné a svislé. Když zrcadlo natočíme tak, aby svíralo se svým původním stavem úhel α budou směry šíření obou referenčních vln, reálné a rekonstruované, od sebe odkloněny o úhel 2α . Tímto úkonem dojde k vzájemnému fázovému posunutí a k vzniku makroskopické interferenční struktury ve formě rovnoběžných interferenčních proužků. Zrcadlem 7 (obr. 2.3) můžeme jemně pootáčet a tím měnit úhel α tak, aby vzniklá interferenční struktura proužků měla požadovanou hustotu a směr. Směr se volí takový, aby předpokládaná osa symetrie studovaného fázového objektu byla kolmá k těmto proužkům. Hustotu interferenčních proužků budeme volit v každé situaci jinak kvůli rozlišení optického zařízení použitého k snímání vzniklého obrazce.



obr. 2.3 Držák se zrcadlem

K naměření určitých informací pomocí holografického interferometru musíme docílit toho, aby nám interferovali obě předmětové vln, reálná a rekonstruovaná. Aby obě vlny interferovaly, musí mezi nimi vzniknout fázový posun. V tomto případě fázového posunu nemůžeme docílit posunutím zrcadla 7 (obr. 2.3). Fázového posunu docílíme tak, že do reálné předmětové vlny vložíme studovaný fázový objekt. Tím zapříčiníme deformaci této rovinné vlny a tím nám dojde k interferenci s předmětovou vlnou rekonstruovanou z hologramu. Vzniklá interferenční struktura se superponuje na strukturu rovnoběžných proužků vzniklých interferencí referenčních vln při seřizování na konečnou šířku proužků. Tato rovnoběžná struktura se tím deformuje tak, že vznikne prohnutí těchto proužků určitým směrem (obr. 2.4). Z této nové interferenční struktury lze za určitých předpokladů zpětně zjistit fázové posunutí způsobené vložením fázového objektu do předmětové větve.



obr. 2.4. Ukázka prohnutí proužků

2.1.2 Součásti holografického interferometru

Zdroj koherentního světla:

Při měření bylo jako zdroje světla pro interferometr použito plynového He – Ne laseru LGK 7665 P německé firmy LASOS. Laser je ochranné třídy 3 B a jeho minimální výkon dosahuje hodnoty 15 mW. Laserová hlavice pracuje v kontinuálním režimu a vlnová délka emitovaného světla 632,8 nm odpovídá červené oblasti viditelného spektra. Rezonátor laseru má základní kmitový vid TEM_{00} , ostatní vidy jsou potlačeny. Laserový paprsek je lineárně polarizován. Polarizační poměr je 500 : 1, rovina polarizace je kolmá k holografickému stolu. Průměr svazku, na kterém klesne intenzita světla na $1/e^2$ násobek své maximální hodnoty, je 0,97 mm a jeho divergence je menší než 0,85 mrad. Laserová hlavice je opatřena ochranou mechanickou uzávěrkou laserového paprsku.

Laser je napájen zdrojem LGN 7470 A2 doporučeným výrobcem. Zápalné napětí laseru je 10kV, která poté klesá na hodnotu (4000 ± 300) V. Operační proud je přibližně 7 mA.

Dělič laserového svazku:

Jako polarizačního děliče svazku bylo použito Glan – Thomsonova dvojlomného hranolu [2]. Konstrukce děliče je opatřena dvěma otáčivými planparalelními destičkami

ovládanými dvěma páčkami, jednou na vstupu svazku pro děliče a druhou na výstupu jednoho z rozdělených svazků. Půlvlnná planparalelní destička ve výstupní části děliče umožňuje spojitou změnu poměru intenzit předmětového a referenčního svazku. Pomocí této destičky byl poměr intenzit předmětového laserového svazku ku intenzitě referenčního laserového svazku nastaven na hodnotu 1 : 3, který je nejvhodnější pro rekonstrukci původních vln a následnou interferometrii v reálném čase [2]. Správné nastavení tohoto poměru bylo překontrolováno měřičem intenzity laserového svazku pro vlnovou délku 633 nm. Druhá planparalelní destička umístěná v části, kde vystupuje referenční svazek z děliče, zabezpečuje otočení jeho roviny polarizace o 90° do stejné polohy, jakou má rovina polarizace předmětového svazku.

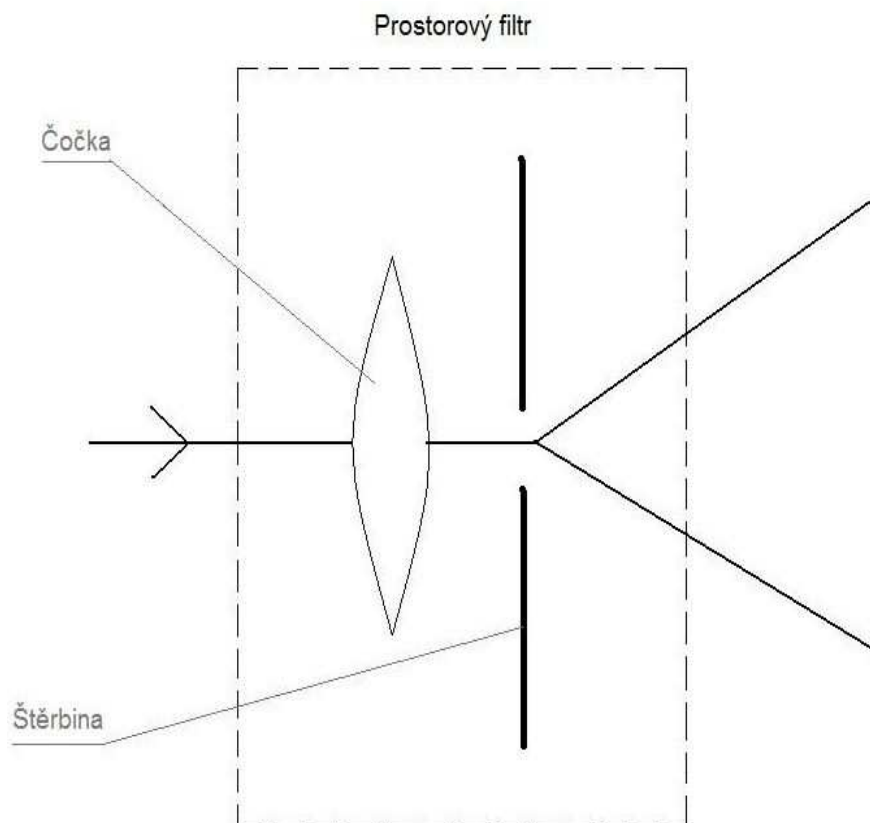


Obr. 2.5 Prostorový filtr

Prostorové filtry:

Prostorové filtry jsou velmi důležitou částí celého interferometru. V celém zařízení se nacházejí dva. Jeden se nachází v předmětové větvi za zrcadlem 5 jak je vidět na obr. 1. Druhý se nachází v referenční větvi a je umístěn za zrcadlem 6 (obr. 1). Prostorové filtry se skládají ze dvou částí. Jedna část je spojná čočka. Druhá část je štěrbinová. Způsob uspořádání prostorového filtru je na obrázku 2.6. Prostorový filtr má své zákonitosti. Nejdůležitější je, že štěrbinová musí být umístěna v ohniskové vzdálenosti

čočky. Prostorový filtr funguje asi takto: Laserový svazek, který už v době kdy vchází do filtru je hodně tenký, tam ho čočka spojí v ještě tenčí paprsek, který se spojí přesně ve štěrbině. Ta ho následně zase rozptýlí. Štěrbinu má ale hlavní úkol, aby vyfiltrovala rušivé paprsky z prostoru. Odtud se odvíjí celý název tohoto filtru.



obr. 2.6 Uspořádání prostorového filtru

Zrcadla:

Zrcadla jsou velmi důležitou částí celého holografického interferometru. Použitá zrcadla jsou velmi kvalitní rovinná zrcadla s vysokou odrazivostí. V celé sestavě se nacházejí zrcadla tři. Jak je vidět na obr.2.1, tak v holografickém interferometru slouží zrcadla 5 a 6 slouží pouze k nasměrování světelného svazku. Zrcadlo 7 je z těchto tří zrcadel nejdůležitější. To slouží ke změně směru šíření reálného referenčního svazku. Zrcadlo 7 je otáčivé kolem dvou na sebe kolmých os, vodorovné a svislé. Zrcadlo použité v interferometru můžeme vidět na obr. 2.3.

Čočky:

Čočky 10 a 11 (obr. 2.1) jsou umístěny tak, aby kruhové clonky prostorových filtrů byly přesně v jejich předmětových ohniscích, potom mají obě větve interferometru tvar rovinných vlnoploch. Nastavení polohy těchto čoček je možné kontrolovat kvalitní planparalelní deskou použitou ve funkci Murtyova interferometru [3]. Čočka 11 také omezuje zorné pole aparatury na průměr 8 cm a tím stanovuje i maximální možnou velikost studovaného fázového objektu.

2.1.3 Hologram

Holografická destička je neelektrické datové medium. Je paměťový nosič datových informací (dat) používající k záznamu dat nějaký vhodný fyzikální princip. Podle charakteru signálu, který je nosičem datového záznamu, existuje záznam digitální nebo analogový. Pokud je nosičem informace analogový signál, je potřeba použít vhodné modulace digitálních veličin. Pro digitální záznam se digitální hodnota uloží většinou v binární formě. Záznam dat na datovém médiu může být permanentní (trvalý), semipermanentní (přepisovatelný) nebo volatilní (nestálý, např. po vypnutí napájení se obsah ztratí). Mezi datová média můžeme zařadit všechny druhy a typy datových pamětí. V praxi se pod pojmem datové médium často myslí přenosné výměnné datové médium. Tyto datové média jsou především určena k ukládání datových souborů a způsob uložení souborů na datovém médiu určuje typ použitého souborového systému.

Holografie je vyspělá forma záznamu obrazu, která umožňuje zachytit jeho trojrozměrnou strukturu. Tato technologie může být využita i ke skladování binárních dat. Narozdíl od běžné fotografie, která zachycuje bod po bodu intenzitu jednotlivých paprsků světla, holografie umožňuje trojrozměrný záznamu předmětu na dvourozměrný obrazový nosič (citlivá vrstva fotografického filmu, emulze na skle, plastová fólie), kam se zapíše informace jak o intenzitě, tak i o fázi světla odraženého od předmětu.

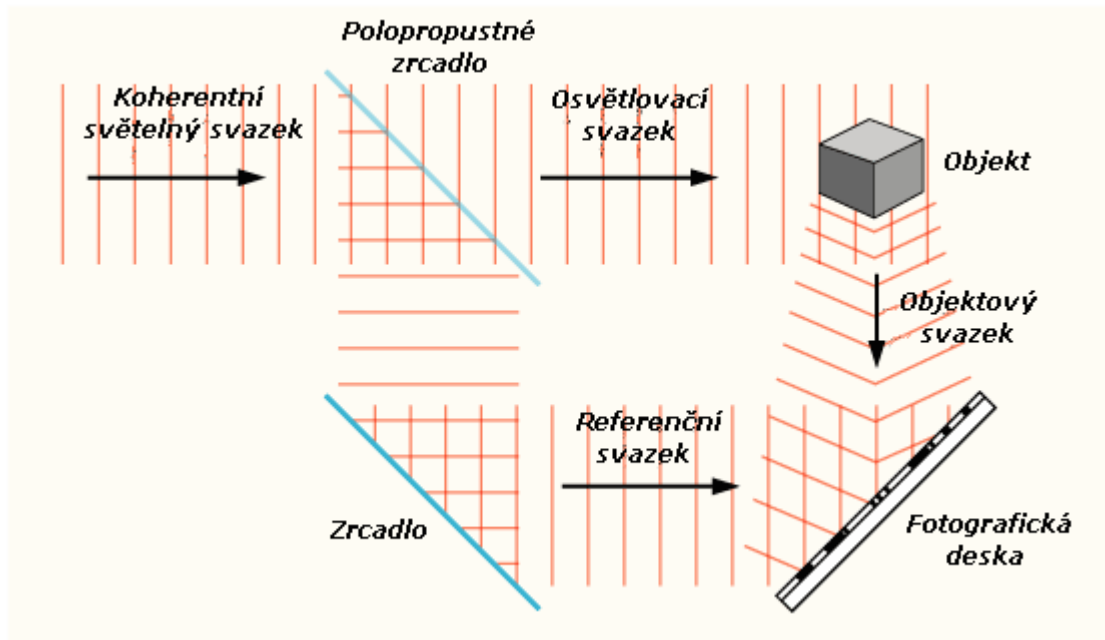
Záznam na fotocitlivou destičku:

Svazek koherentních světelných paprsků, které vyzařuje laser, a který je dostatečně široký, aby mohl zaznamenat úplně celý předmět, se obvykle pomocí optických prostředků (např. polopropustné zrcadlo) rozdělí na svazek osvětlovací a svazek referenční. Po dopadu a následném odrazu osvětlovacího svazku od snímaného předmětu vzniká předmětový svazek, jenž nese informaci nejen o intenzitě světla, ale i

jeho fázi, která vypovídá o trojrozměrné struktuře. Tyto informace se zaznamenají v obrazovém nosiči (např. fotografický film) díky referenčnímu svazku, jenž v místě obrazového nosiče interferuje s obrazovým svazkem. Vznikne tak interferenční obrazec - hologram, kde se nepravidelně zapíší rozmístěná interferenční maxima a minima.

Pro správné zobrazení zaznamenaného předmětu je nutné hologram osvětlit koherentním svazkem paprsků (rekonstrukční svazek) vyzařovaným obvykle laserem pod stejným úhlem, pod jakým dopadal během snímání referenční svazek. Díky difrakci rekonstrukčního svazku se vytvoří světelné pole (rekonstruovaný svazek) odpovídající trojrozměrnému obrazu předmětu, který je v hologramu zaznamenan. Jednoduše řečeno, hologramem projdou jen paprsky odpovídající paprskům odraženým od zaznamenaného předmětu. Výsledkem je zdánlivý prostorový obraz.

U vyhodnocovaného měření bylo použito jako fotocitlivý materiál holografické destičky Holotest Scientia 10E75 belgické firmy Agfa Gevaert. Tyto destičky mají rozlišení 2800 čar na mm a jejich citlivost je přibližně $5 \mu\text{J}/\text{cm}^2$ [2]. Protože tloušťka citlivé vrstvy těchto destiček je pouze $7 \mu\text{m}$, odpovídají vlastnosti vytvořeného hologramu transparentního předmětu vlastnostem plošného hologramu.

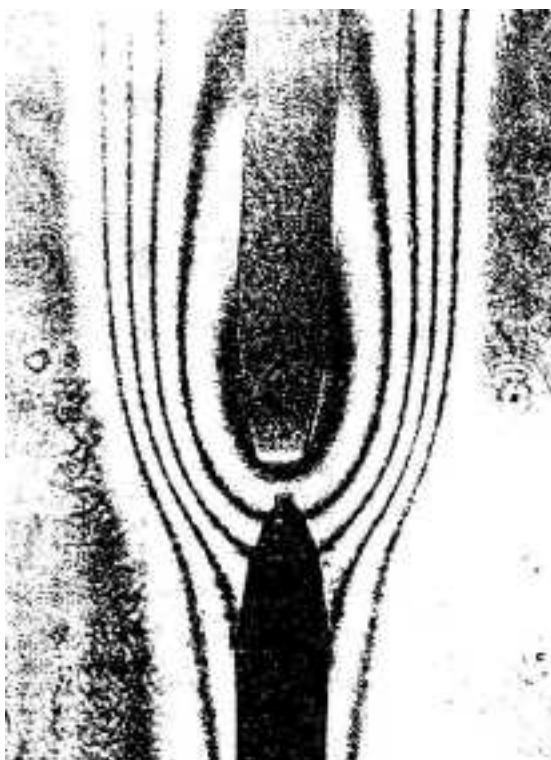


obr. 2.7 Schéma záznamu hologramu. (převzato z [4])

2.1.4 Seřízení interferometru

K seřízení interferometru pro další měření dojde po umístění vyvolané, ustálené, vybělené a usušené holografické destičky zpět do aparatury. Podaří-li se umístit hologram úplně přesně do původní polohy, nedojde mezi světelnou vlnou rekonstruovanou z hologramu referenčním paprskem a novou předmětovou vlnou procházející prostorem studovaného fázového objektu k žádnému fázovému posuvu. Z tohoto důvodu nenastane interference obou vln a stínítko zůstane rovnoměrně osvětleno. V takovém případě je interferometr seřízen tzv. na nekonečnou šířku proužků. Deformováním předmětové vlny vložením studovaného předmětu, v našem případě zapálením výboje a jeho stabilizací proudem pracovního plynu, dojde k fázovému posunutí obou interferenčních vln, což se projeví vznikem charakteristické interferenční struktury na stínítku. Pro účely vyhodnocování je ovšem lepší seřídit interferometr na tzv. konečnou šířku proužků [5]. K tomu se využívá hlavního zrcadla 7 systému (obr. 2.1). Toto zrcadlo je, obdobně jako všechna směrová zrcadla připevněno na stojánek tak, aby s ním bylo možno otáčet ve dvou na sebe kolmých směrech. Na rozdíl od směrových zrcadel je podstatně větší, protože musí odrážet celou rovinnou vlnu o průměru 8 cm namísto úzkého laserového svazku. Mírné naklonění tohoto zrcadla má za následek malou změnu směru dopadu paprsku rekonstruujícího původní předmětovou vlnu na hologram, a proto má i rekonstruovaná vlna mírně odlišný směr od původního. Proto dojde k interferenci obou předmětových vln a na stínítku se objeví soustava rovnoběžných proužků. Se vzrůstajícím úhlem naklonění hlavního zrcadla se hustota proužků zvyšuje. Hustota interferenčních proužků potom představuje hodnotu prostorové frekvence, jednoho z nejdůležitějších parametrů ovlivňujících přesnost a citlivost zařízení.

Pro další vyhodnocování je důležité volit naklonění hlavního zrcadla tak, aby vzniklé proužky měly směr osy symetrie zkoumaného fázového objektu. Je-li nová předmětová vlna porušena vloženým studovaným fázovým objektem, dochází k další interferenci superponující se na soustavu rovnoběžných proužků a projevující se na stínítku prohnutím této soustavy. Velikost tohoto prohnutí souvisí s velikostí a směrem fázového posunutí obou interferujících předmětových vln, a tudíž v sobě nese i informace o studovaném fázovém objektu.



Obr. 2.8 Ukázka interferogramu při seřízení interferometru na nekonečnou šířku proužků



Obr. 2.9 Ukázka interferogramu při seřízení interferometru na konečnou šířku proužků
(převzato z [6])

3. Užití holografické interferometrie v praxi

3.1 Úvod

Holografická interferometrie může podobně jako klasická interferometrie měřit nepatrné změny s poměrně velkou přesností, která odpovídá zlomkům vlnové délky použitého světla. Na rozdíl od klasické interferometrie však může zkoumat prostorové útvary a stanovit tak rozdíly ve tvarech nebo jiných vlastnostech i u velmi složitých trojrozměrných těles. Druhou výhodou oproti klasické interferometrii je fakt, že se nemusí omezovat pouze na lesklé povrchy, ale lze ji využít i pro předměty difúzně odražející světlo. Třetí, a to největší předností holografické interferometrie oproti klasické je možnost porovnávat dříve zaznamenaný stav studovaného fázového objektu. To je umožněno záznamem tohoto stavu na hologram, čímž se uchovává do budoucna, aniž by musel dál reálně existovat. Hologram zde tedy vystupuje jako jakési „paměťové medium“ referenčního stavu. Pak je možné studovat dva již neexistující stavy téhož objektu nebo dřívější a současný stav stejného předmětu nebo dřívější stav objektu se současným stavem podobného objektu. Jedná se tedy o interferenci dvou světelných vln, které procházely stejným prostředím v rozdílných časových okamžicích, první v době expozice hologramu a druhý v současném čase zkoumání daného objektu.

3.2 Metoda jednoho interferometru

Základní metodou pro použití holografických interferometrů je metoda jednoho interferometru. Tato metoda záleží na interferenci vlny rekonstruované hologramem s vlnou procházející od předmětu [7]. Realizuje se tak, že předmět se nejprve zholografuje a vyvolaný hologram se umístí přesně do původního místa. S nezměněným holografickým uspořádáním osvětlíme jednak předmět a jednak referenční vlnou hologram. Referenční vlna má funkci rekonstrukční a rekonstruuje obraz předmětu v jeho původní poloze a velikosti. Kromě toho osvětlený předmět odráží vlnu do směru hologramu. Vlna hologramem prochází nezměněna a interferuje s rekonstruovanou vlnou. Jestliže nyní nepatrně změníme polohu nebo tvar předmětu, objeví se interferenční proužky[2]. Tato metoda může velmi přesně porovnávat tvar tělesa oproti původnímu i za delší časový úsek.

Tato metoda je vhodná nejen pro odrazné trojrozměrné předměty, ale může se jí použít i pro propustné fázové předměty [8], u nichž se mění index lomu v závislosti na

prostorových souřadnicích a čase. Výhodou této metody proti klasické interferometrii je především možnost srovnávat daný stav se stavem jiným, přičemž výchozí porovnávací stav nemusí být stavem základním bez fázových změn, jak je to nutné v klasické interferometrii. Tím se opět potvrzuje oprávněnost názvu diferenční interferometrie.

3.3 Metoda dvou interferometrů

Při metodě jednoho interferometru se interferometricky porovnávala procházející od reálného předmětu s vlnoplochou rekonstruovanou z hologramu. Nic nepřekáží tomu, aby se interferometricky studovaly dvě rekonstruované vlny, z nichž každá od jednoho hologramu. Tato metoda se nejjednodušeji realizuje postupným zholografováním dvou stavů jednoho a téhož předmětu na jeho záznamové prostředí. Dostane se tak dvojnásobný hologram. Když se tento hologram prosvítí rekonstrukční vlnou, rekonstruují se současně oba obrazy navzájem koherentními vlnami. Jestliže se oba obrazy vzájemně mnoho neliší jak co do tvaru, tak co do polohy, objeví se na obraze interferenční makroskopický obrazec, který udává velikost změn.

Popsaná nejjednodušší realizace této metody se obvykle nazývá metoda dvojího osvitu (metoda dvou hologramů), aby se vyjádřilo použití jedné a téže fotografické desky pro hologramy obou stavů předmětu.

Tato metoda však není omezena pouze na studium dvou stavů téhož předmětu. Je možno stejně jako u předchozí metody kontrolovat tvar duplikátu proti originálu. Předpokladem je velmi přesné umístění obou předmětů v jedné poloze.

Sejmutím obou hologramů na různé fotografické desky předpokládá, aby při rekonstrukci byly hologramy na sebe těsně přiloženy a oba obrazy se do minimální míry ztotožnily. Obvykle se to nedokáže pouhým přiložením desek, ale je nutno použít vzájemného zobrazení 1 : 1 [2].

Hologramy s dvojím osvitem se nejlépe uplatní při studiu dynamických jevů. Při použití laserů s dvěma rychlými impulsy umožňují například zaznamenat diferenční interferenční obrazec mezi stavy v čase t a velmi blízkém čase $t + \Delta t$ [2]. Klasickou interferometrií je tento úkol neřešitelný.

4. Měření teploty vysokofrekvenčních výbojů

Použitý holografický interferometr byl aplikován ke studiu vlastností vysokofrekvenčního pochodňového a vysokofrekvenčního bariérového – pochodňového výboje tak, že byla měřena teplota neutrálního plynu stabilizujícího oba tyto typy výbojů podél výbojového kanálu. V této kapitole budou uvedeny výsledky měření teploty a jejich rozbor.

Kvůli prevenci před vytvořením obloukového výboje, byla na uzemněnou elektrodu položena skleněná destička jako dielektrická bariéra. Pro snazší pozorování byly některé podmínky a parametry obou typů výbojů nastavovány stejně tak, aby co nejméně ovlivňovaly rozdíl teplot neutrálního plynu stabilizujícího výboje. Přehled těchto podmínek uvádí tab. 4.1. Rozdílné byly pouze typy trysek.

Tab. 4.1 Podmínky a parametry nastavované stejně u obou typů vysokofrekvenčních výbojů

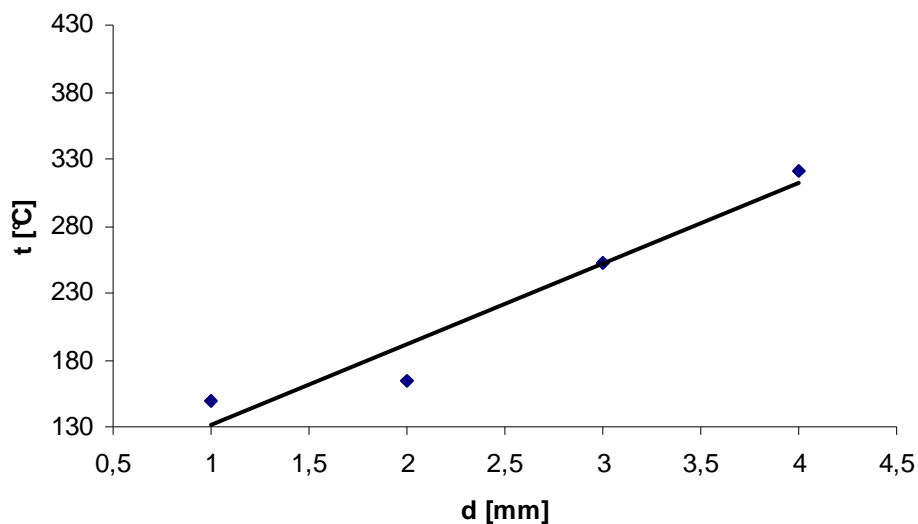
podmínky a parametry	nastavené hodnoty
vnitřní průměr trysek	2,0 mm
vnější průměr trysek	4,8 mm
tlak v plazmachemickém reaktoru	atmosférický
pracovní plyn	technický argon
přetlak v tryskách oproti reaktoru	250 Pa
vzdálenost mezi elektrodami	6,3 mm
tloušťka dielektrické bariéry	1,7 mm
absorbovaný vysokofrekvenční výkon ve výboji	80 W
velikost snímané oblasti	9,15 x 8,00 mm
rozišení CCD kamery	480 x 420 pixelů
uzávěrka kamery	1,6 ms
snímací rychlost kamery	125 snímků za sekundu

Výboje se během hoření stochasticky mění, což lze pozorovat i vizuálně. Z tohoto důvodu bylo měření několikrát opakováno. U obou trysek bylo měření provedeno 52 x. Ze získaných interferogramů bylo vypočteno rozdělení teploty v osovému řezu výbojového kanálu a určena teplota přímo na ose symetrie v konkrétních vzdálenostech od ústí trysky. Konečné výsledky byly získány jako aritmetický průměr jednotlivých měření.

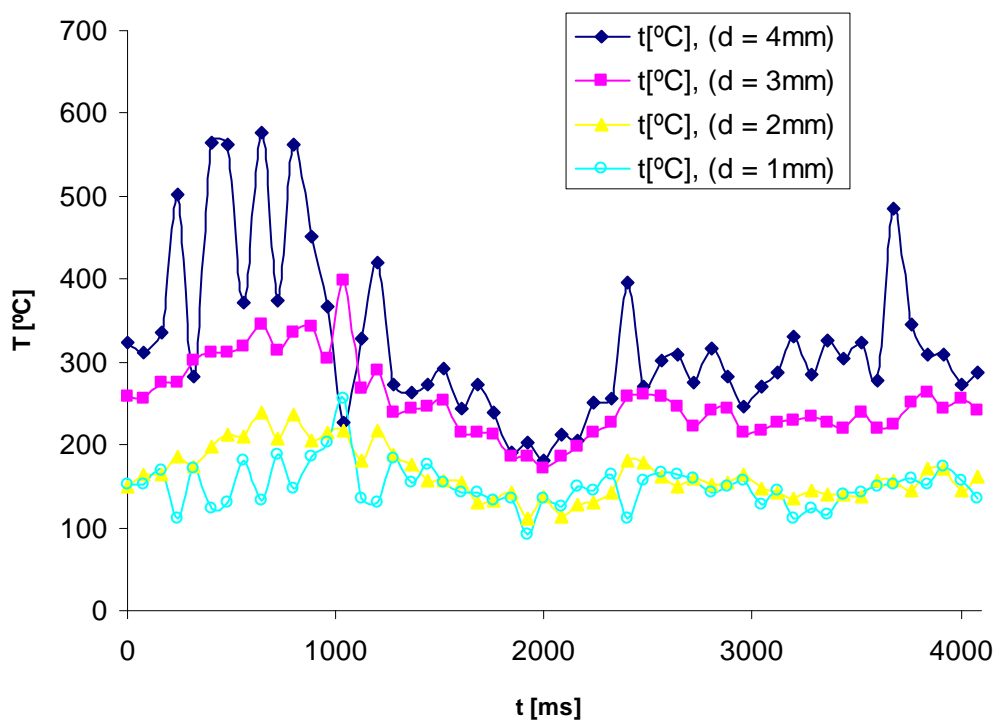
Tabulky 4.2 až 4.6 uvádějí získané hodnoty teploty pro různé vzdálenosti od ústí trysky pro pochodňový výboj včetně odchylek aritmetického průměru. Stejně jsou uvedeny tyto parametry pro bariérový – pochodňový výboj uvedeny v tabulkách 4.7 až 4.11. Tabulky ukazují parametry při průtoku plynu od 600 sccm do 1000 sccm. Dále pak obrázky (4.1, 4.3, 4.5, 4.7, 4.10, 4.12, 4.14, 4.16, 4.18) ukazují grafy závislosti teploty na vzdálenosti od ústí trysky pro oba typy výboje a všechny průtoky plynu. Obrázky (4.2, 4.4, 4.6, 4.8, 4.11, 4.13, 4.15, 4.17, 4.19) názorně ukazují grafy závislosti teploty na časovém průběhu výboje ve všech zvolených vzdálenostech od ústí trysky. Obrázky 4.9 a 4.20 ukazují závislost teploty na vzdálenosti od ústí trysky pro zvolené průtoky technického argonu.

Tab. 4.2 Měření teploty vysokofrekvenčního pochodňového výboje hořícího z mosazné trysky při průtoku 600 sccm

mosazná tryska průtok 600 sccm	vzdálenost od ústí trysky [mm]			
	1	2	3	4
aritmetický průměr [°C]	150	165	253	321
odchylka průměru [°C]	2	3	4	9
relativní odchylka	1%	2%	2%	3%



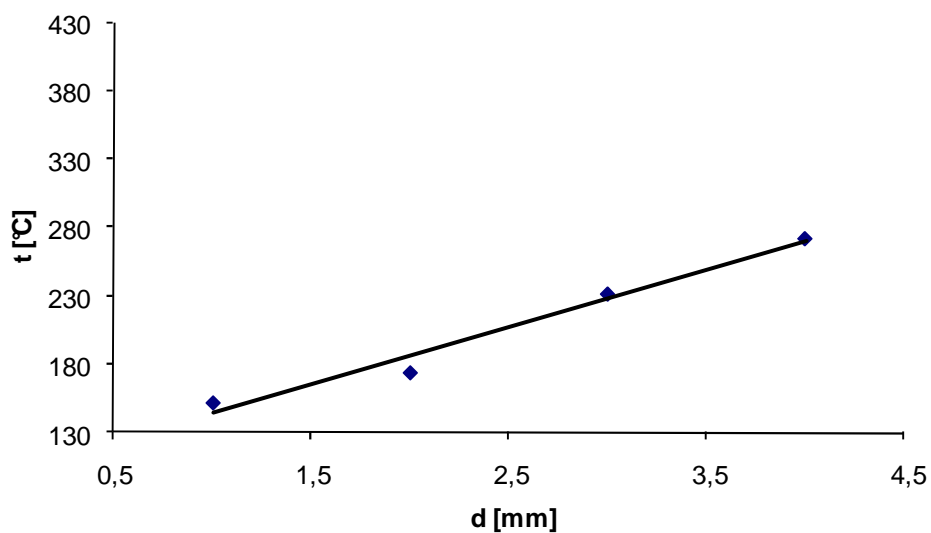
Obr. 4.1 Závislost teploty neutrálního plynu na vzdálenosti od ústí mosazné trysky pro vysokofrekvenční pochodňový výboj při průtoku technického argonu 600 sccm



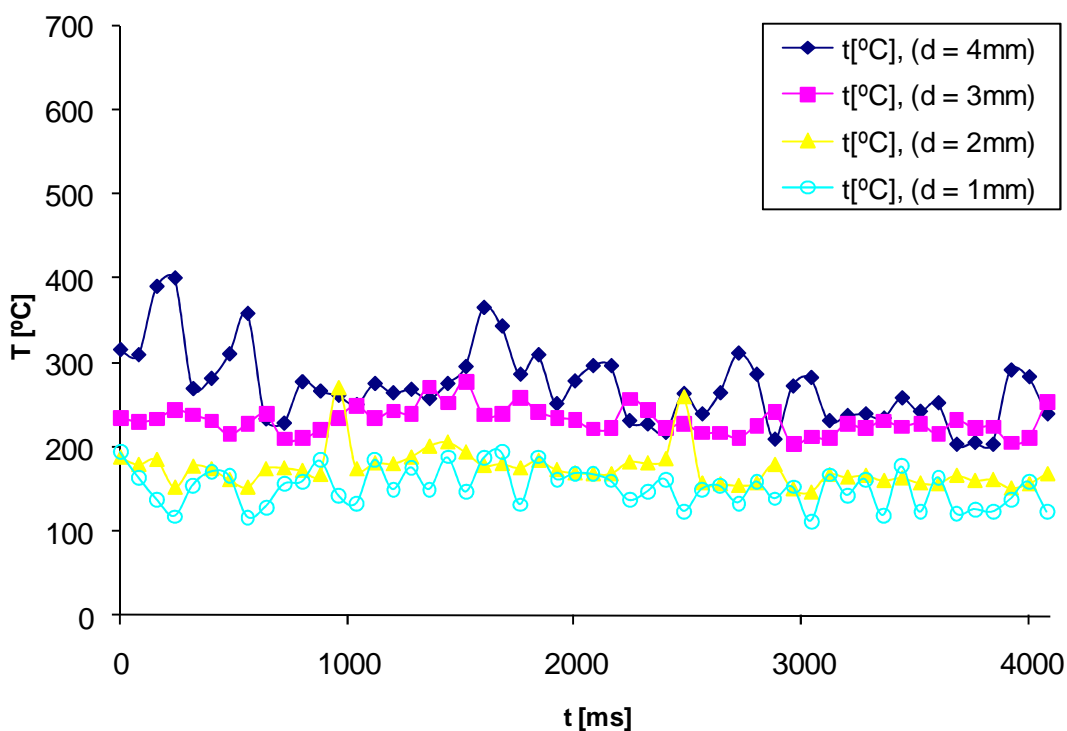
Obr. 4.2 Porovnání závislosti teploty neutrálního plynu na časovém průběhu pro průtok technického argonu 600 sccm ve zvolených vzdálenostech od ústí trysky

Tab. 4.4 Měření teploty vysokofrekvenčního pochodňového výboje hořícího z mosazné trysky při průtoku 800 sccm

mosazná tryska průtok 800 sccm	vzdálenost od ústí trysky [mm]			
	1	2	3	4
aritmetický průměr [°C]	152	174	232	273
odchylka průměru [°C]	2	2	1	4
relativní odchylka	1%	1%	0,4%	1%



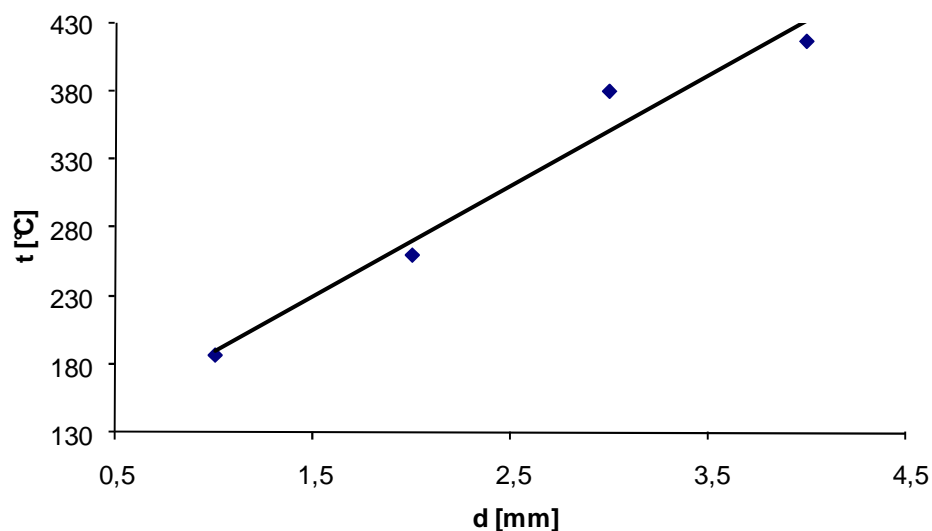
Obr. 4.3 Závislost teploty proudu neutrálního plynu na vzdálenosti od ústí mosazné trysky pro vysokofrekvenční pochodňový výboj při průtoku 800 sccm



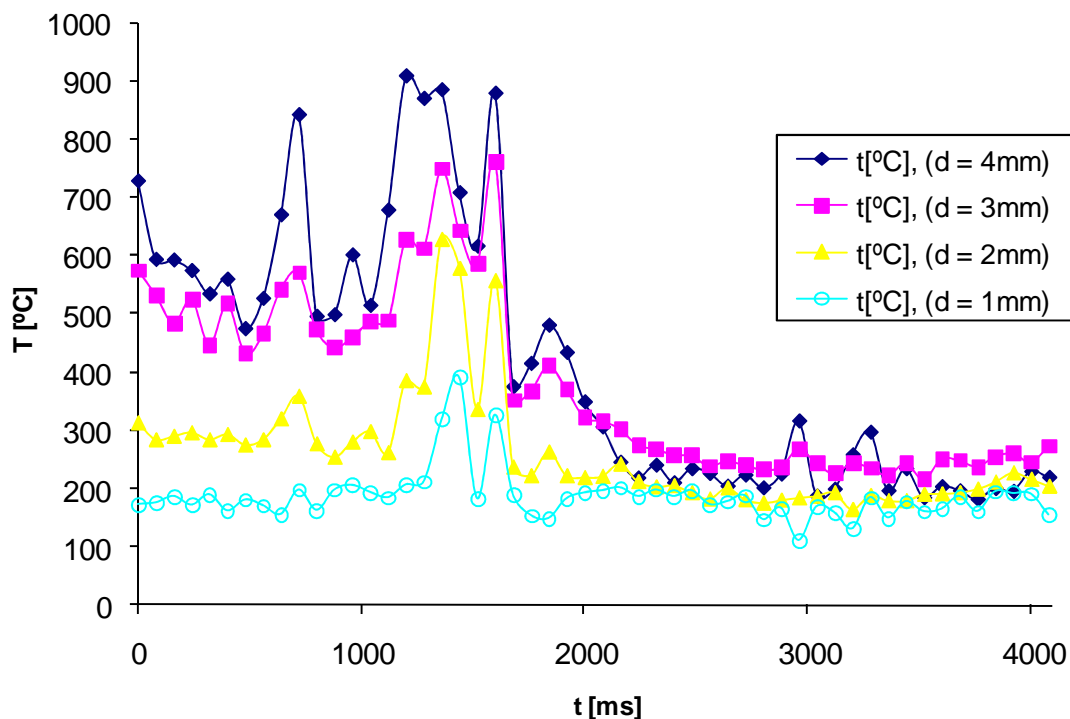
Obr. 4.4 Porovnání závislosti teploty neutrálního plynu na časovém průběhu pro průtok plynu 800 sccm ve zvolených vzdálenostech od ústí trysky

Tab. 4.5 Měření teploty vysokofrekvenčního pochodňového výboje hořícího z mosazné trysky při průtoku 900 sccm

mosazná tryska průtok 900 sccm	vzdálenost od ústí trysky [mm]			
	1	2	3	4
aritmetický průměr [°C]	187	261	381	417
odchylka průměru [°C]	4	9	14	21
relativní odchylka	2%	3%	4%	5%



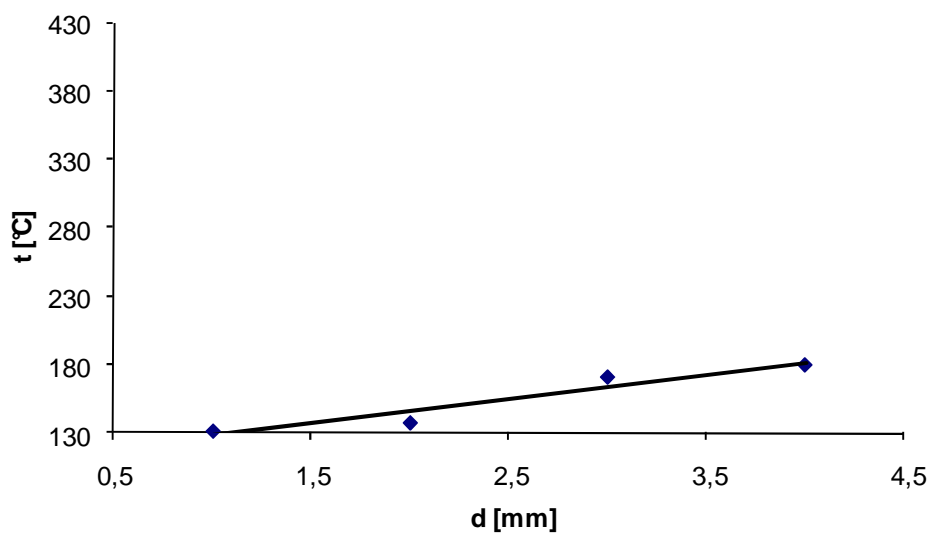
Obr. 4.5 Závislost teploty proudu neutrálního plynu na vzdálenosti od ústí mosazné trysky pro vysokofrekvenční pochodňový výboj při průtoku 900 scm



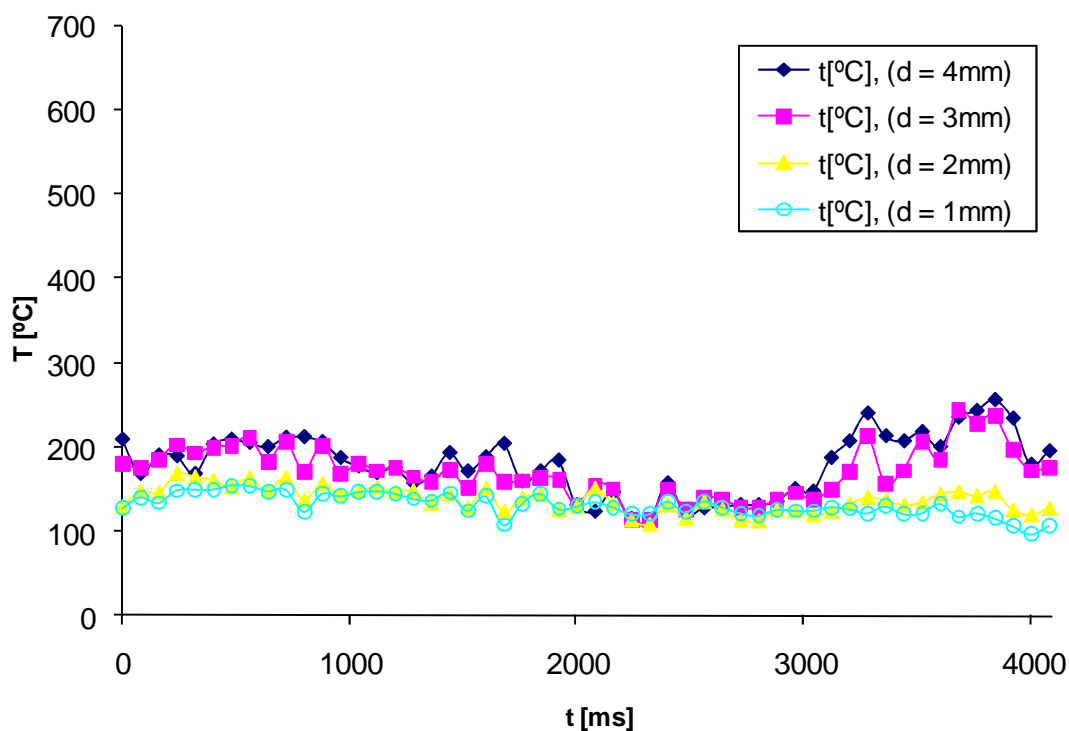
Obr. 4.6 Porovnání závislosti teploty neutrálního plynu na časovém průběhu pro průtok plynu 900 scm ve zvolených vzdálenostech od ústí trysky

Tab. 4.6 Měření teploty vysokofrekvenčního pochodňového výboje hořícího z mosazné trysky při průtoku 1000 sccm

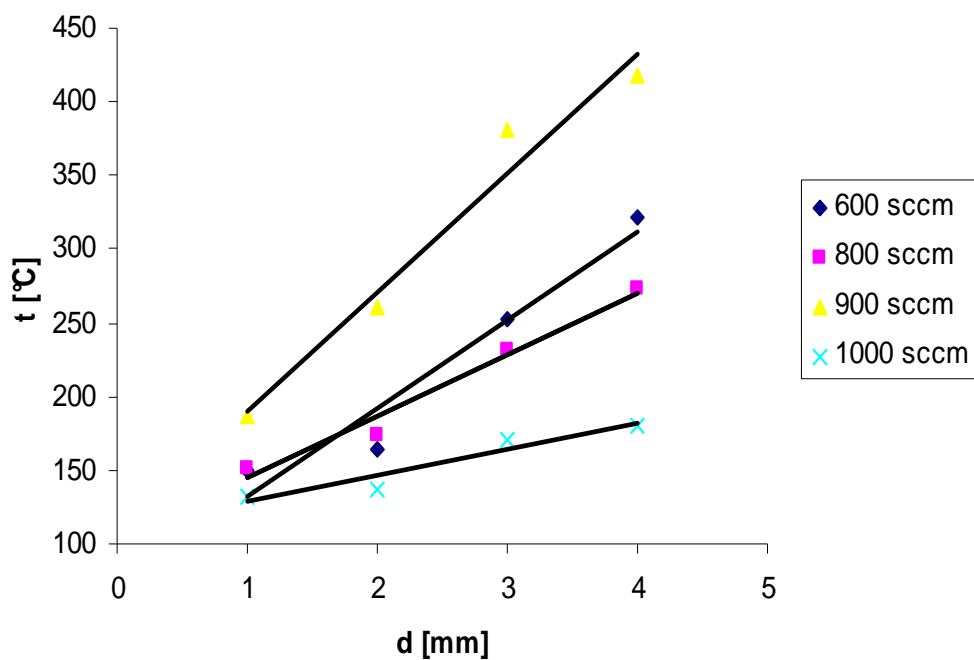
mosazná tryska průtok 1000 sccm	vzdálenost od ústí trysky [mm]			
	1	2	3	4
aritmetický průměr [°C]	132	137	171	180
odchylka průměru [°C]	1	1	3	3
relativní odchylka	1%	1%	2%	2%



Obr. 4.7 Závislost teploty proudu neutrálního plynu na vzdálenosti od ústí mosazné trysky pro vysokofrekvenční pochodňový výboj při průtoku 1000 sccm



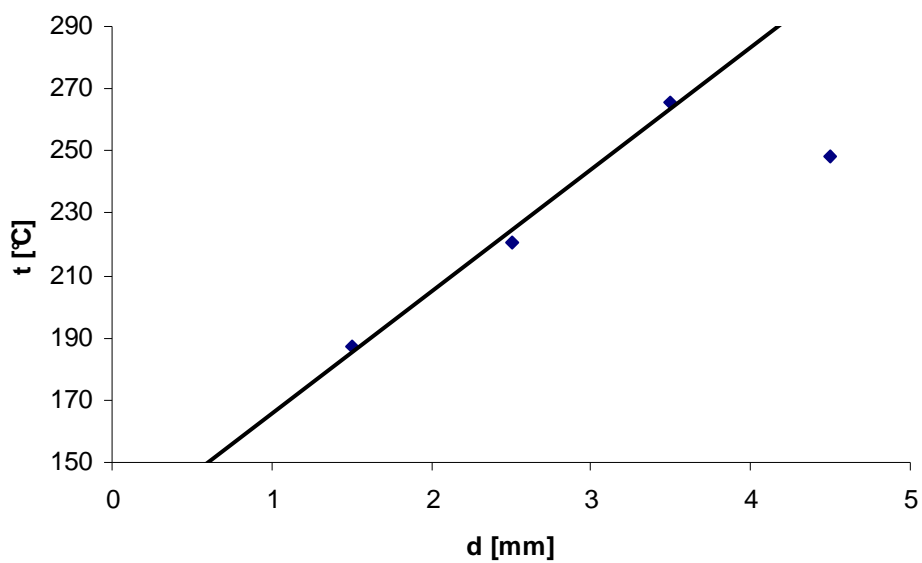
Obr. 4.8 Porovnání závislosti teploty neutrálního plynu na časovém průběhu pro průtok plynu 1000 sccm ve zvolených vzdálenostech od ústí trysky



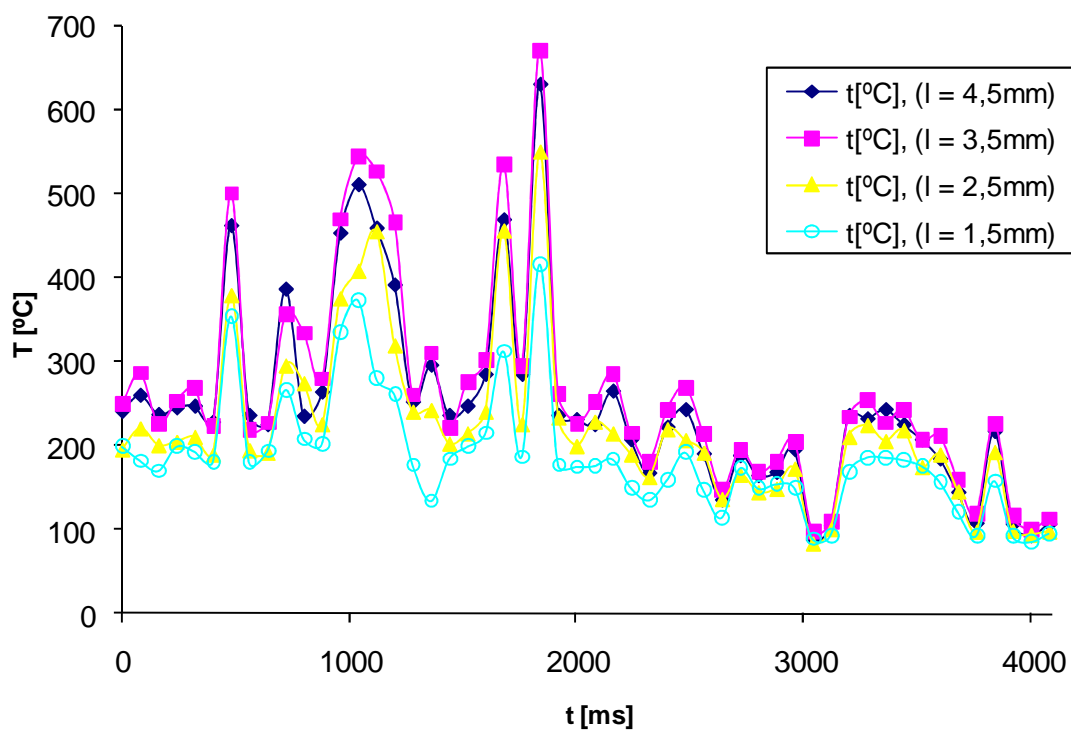
Obr. 4.9 Graf závislosti teploty na vzdálenosti od ústí mosazné trysky pro vybrané průtoky technického argonu

Tab. 4.7 Měření teploty vysokofrekvenčního bariérového – pochodňového výboje hořícího ze skleněné trysky při průtoku 600 sccm

skleněná tryska průtok 600 sccm	vzdálenost od ústí trysky [mm]			
	1,5	2,5	3,5	4,5
aritmetický průměr [°C]	187	221	265	248
odchylka průměru [°C]	7	9	11	10
relativní odchylka	4%	4%	4%	4%



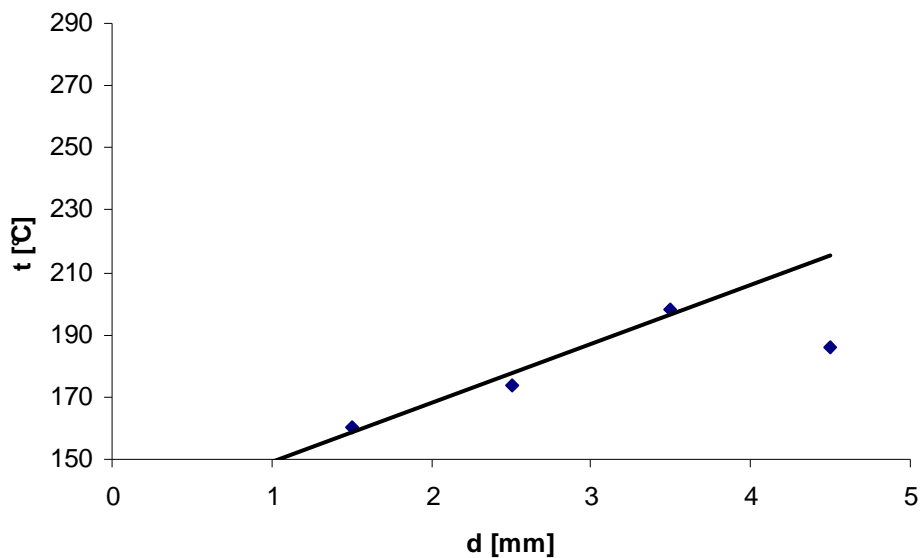
Obr. 4.10 Závislost teploty proudu neutrálního plynu na vzdálenosti od ústí skleněné trysky pro vysokofrekvenční bariérový – pochodňový výboj při průtoku plynu 600 sccm



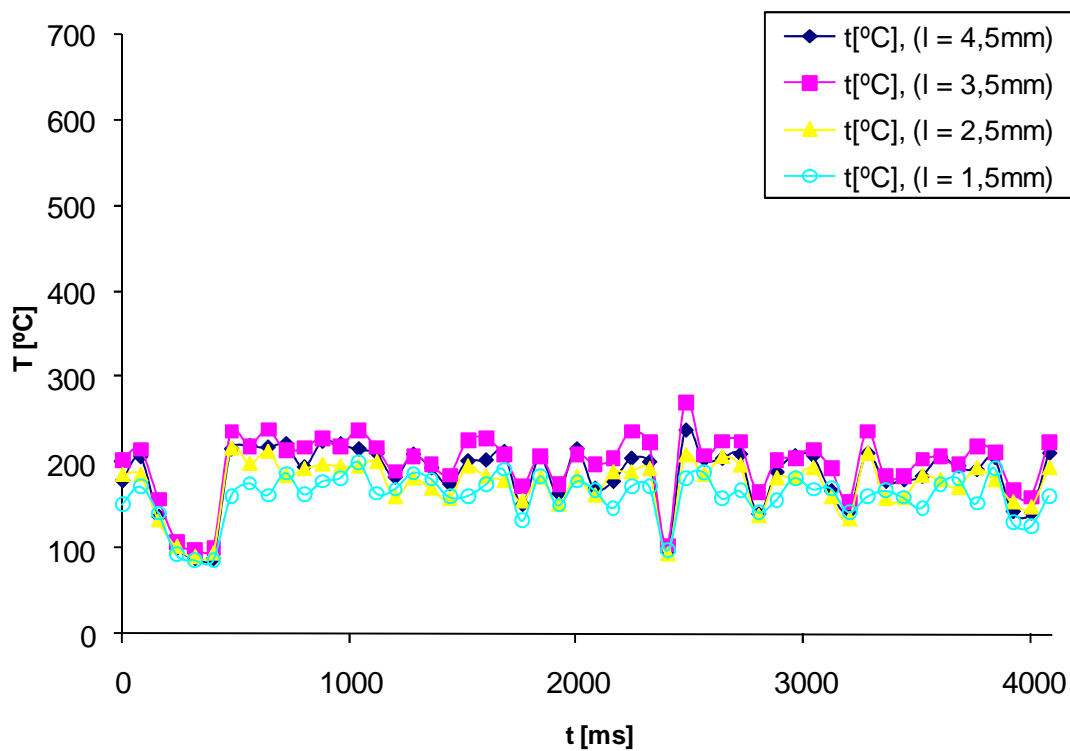
Obr. 4.11 Porovnání závislosti teploty neutrálního plynu na časovém průběhu pro průtok plynu 600 sccm ve zvolených vzdálenostech od ústí skleněné trysky

Tab. 4.8 Měření teploty vysokofrekvenčního bariérového – pochodňového výboje hořícího ze skleněné trysky při průtoku 700 sccm

skleněná tryska průtok 700 sccm	vzdálenost od ústí trysky [mm]			
	1,5	2,5	3,5	4,5
aritmetický průměr [°C]	160	174	198	186
odchylka průměru [°C]	2	3	3	3
relativní odchylka	1%	2%	2%	2%



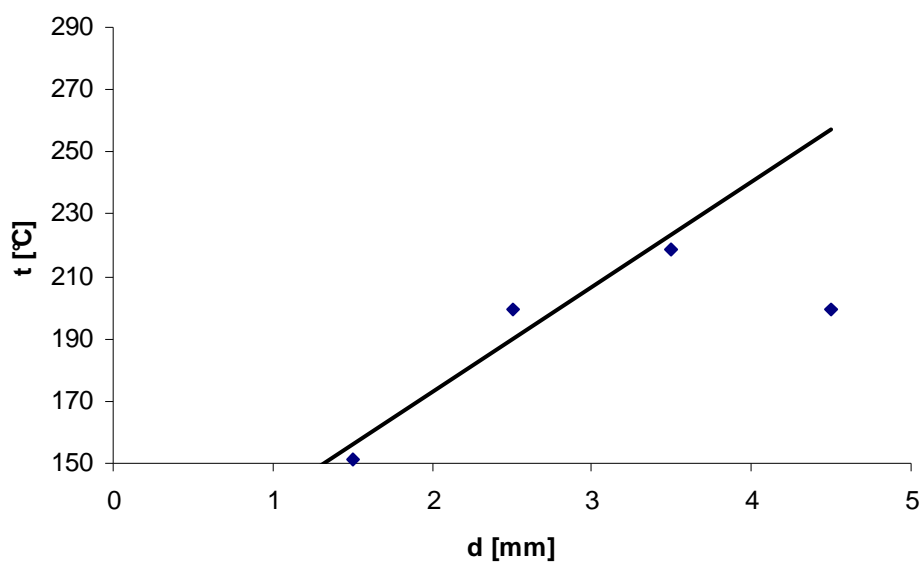
Obr. 4.12 Závislost teploty proudu neutrálního plynu na vzdálenosti od ústí skleněné trysky pro vysokofrekvenční bariérový – pochodňový výboj při průtoku plynu 700 scm



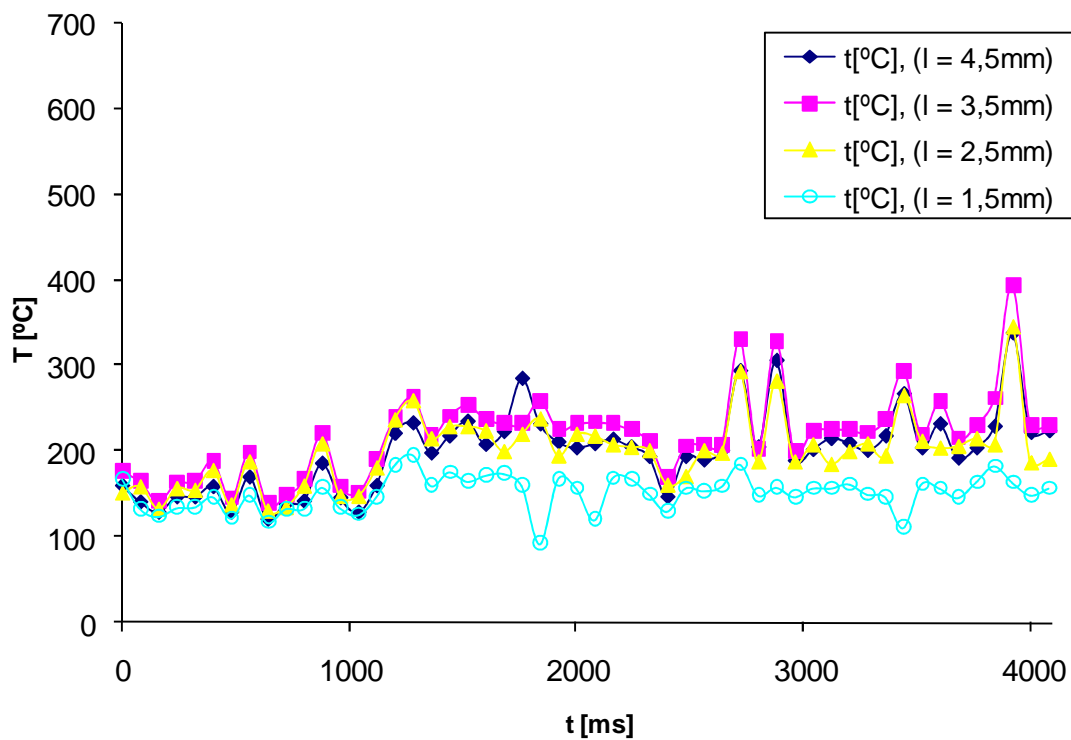
Obr. 4.13 Porovnání závislosti teploty neutrálního plynu na časovém průběhu pro průtok plynu 700 scm ve zvolených vzdálenostech od ústí skleněné trysky

Tab. 4.5 Měření teploty vysokofrekvenčního bariérového – pochodňového výboje hořícího ze skleněné trysky při průtoku 800 sccm

skleněná tryska průtok 800 sccm	vzdálenost od ústí trysky [mm]			
	1,5	2,5	3,5	4,5
aritmetický průměr [°C]	151	200	219	200
odchylka průměru [°C]	2	4	5	4
relativní odchylka	1%	2%	2%	2%



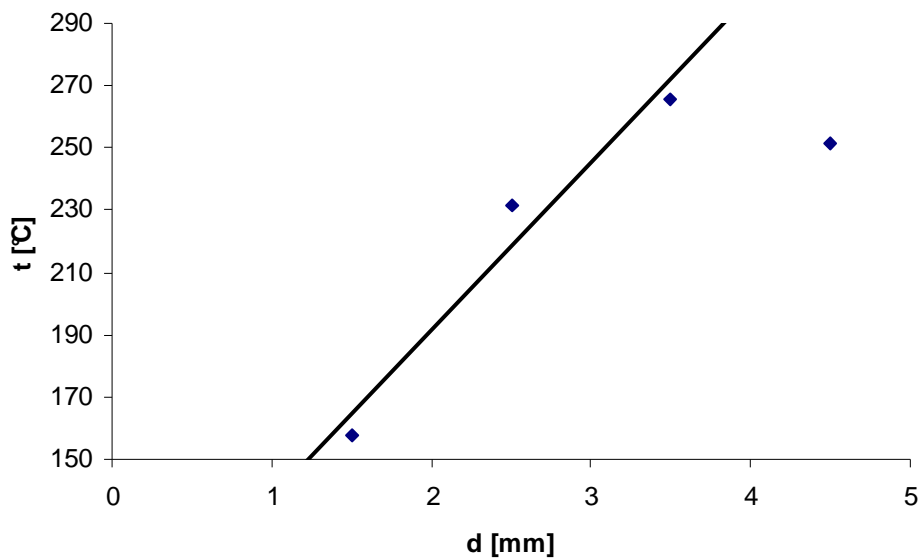
Obr. 4.14 Závislost teploty proudu neutrálního plynu na vzdálenosti od ústí skleněné trysky pro vysokofrekvenční bariérový – pochodňový výboj při průtoku plynu 800 sccm



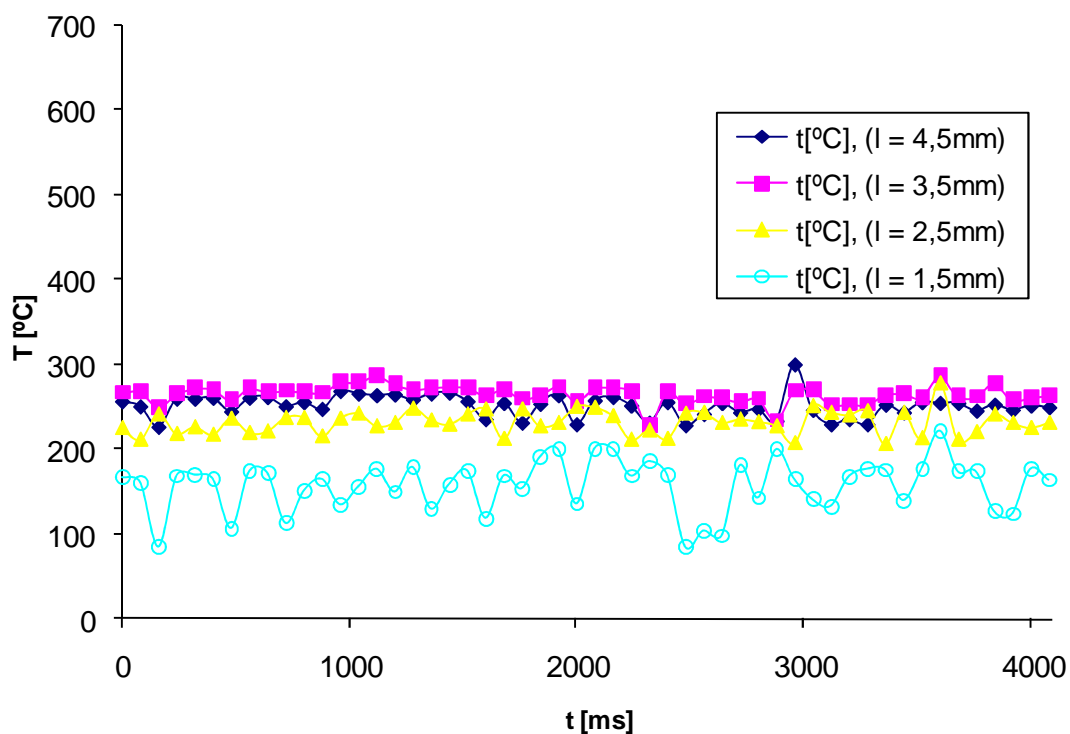
Obr. 4.15 Porovnání závislosti teploty neutrálního plynu na časovém průběhu pro průtok plynu 800 sccm ve zvolených vzdálenostech od ústí skleněné trysky

Tab. 4.10 Měření teploty vysokofrekvenčního bariérového – pochodňového výboje hořícího ze skleněné trysky při průtoku 900 sccm

skleněná tryska průtok 900 sccm	vzdálenost od ústí trysky [mm]			
	1,5	2,5	3,5	4,5
aritmetický průměr [°C]	158	231	265	252
odchylka průměru [°C]	3	1	1	1
relativní odchylka	2%	0,5%	0,5%	0,5%



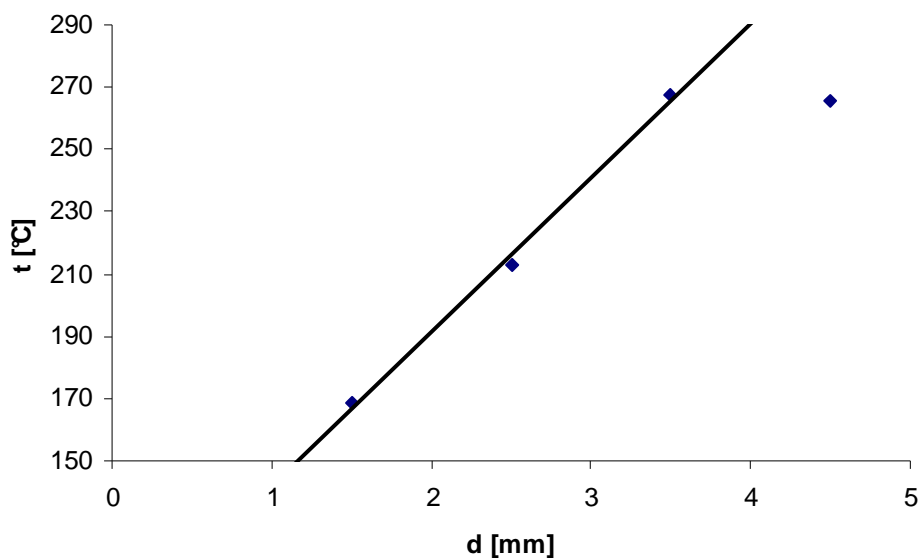
Obr. 4.16 Závislost teploty proudu neutrálního plynu na vzdálenosti od ústí skleněné trysky pro vysokofrekvenční bariérový – pochodňový výboj při průtoku plynu 900 sccm



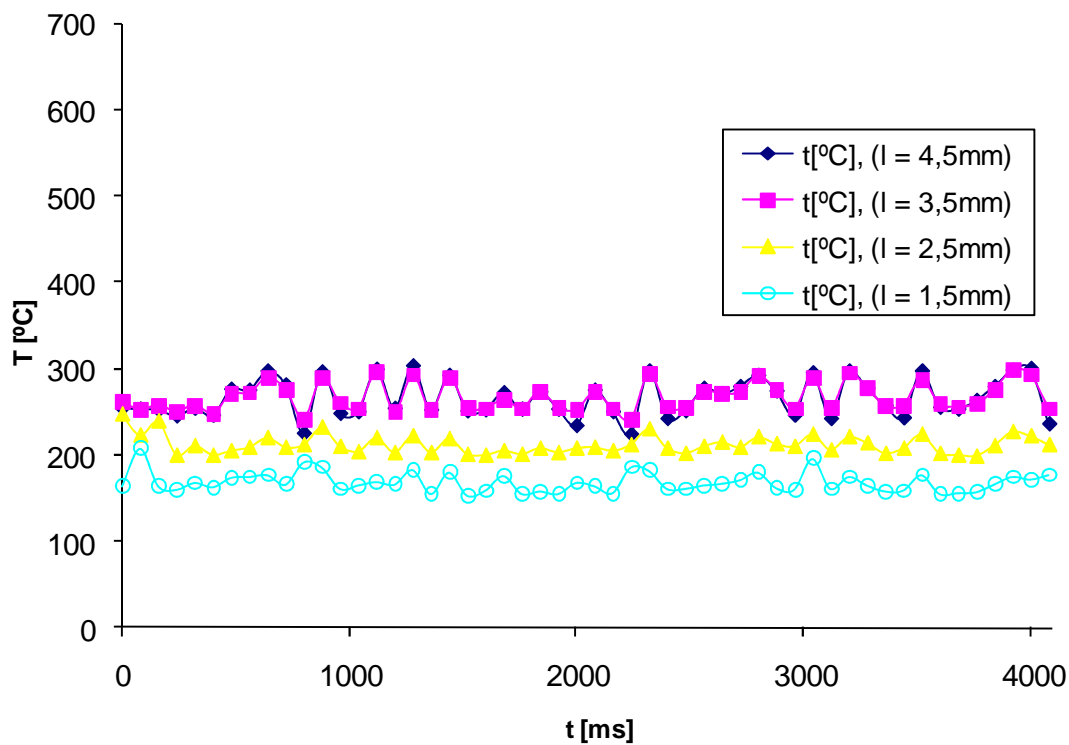
Obr. 4.17 Porovnání závislosti teploty neutrálního plynu na časovém průběhu pro průtok plynu 900 sccm ve zvolených vzdálenostech od ústí skleněné trysky

Tab. 4.11 Měření teploty vysokofrekvenčního bariérového – pochodňového výboje hořícího ze skleněné trysky při průtoku 1000 sccm

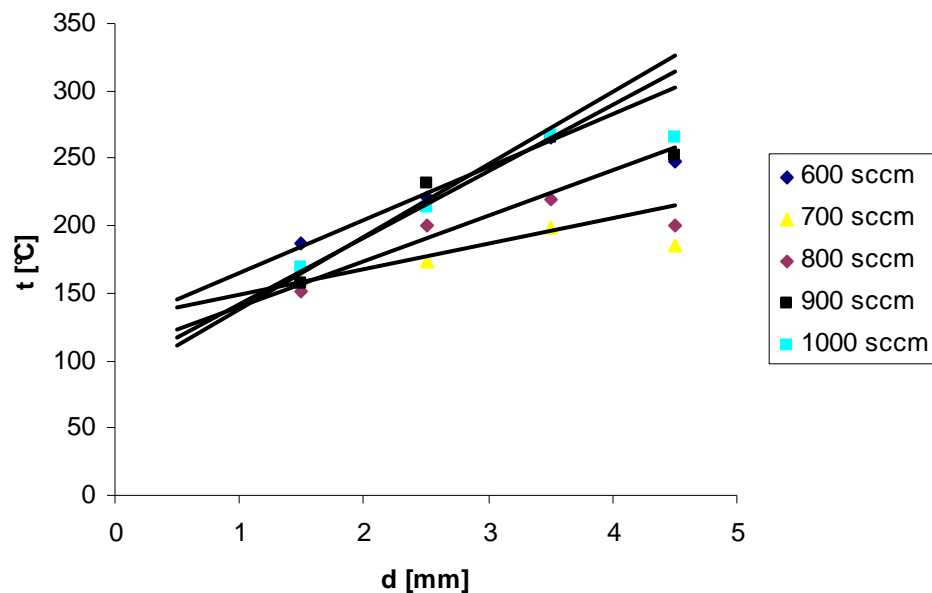
skleněná tryska průtok 1000 sccm	vzdálenost od ústí trysky [mm]			
	1,5	2,5	3,5	4,5
aritmetický průměr [°C]	169	213	267	266
odchylka průměru [°C]	1	1	2	2
relativní odchylka	0,5%	0,5%	1%	1%



Obr. 4.18 Závislost teploty proudu neutrálního plynu na vzdálenosti od ústí skleněné trysky pro vysokofrekvenční bariérový – pochodňový výboj při průtoku plynu 1000 sccm

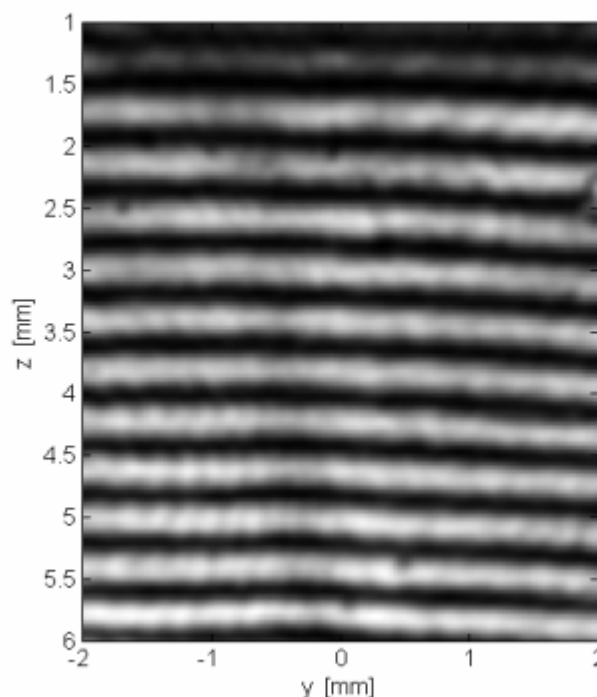


Obr. 4.19 Porovnání závislosti teploty neutrálního plynu na časovém průběhu pro průtok plynu 1000 sccm ve zvolených vzdálenostech od ústí skleněné trysky

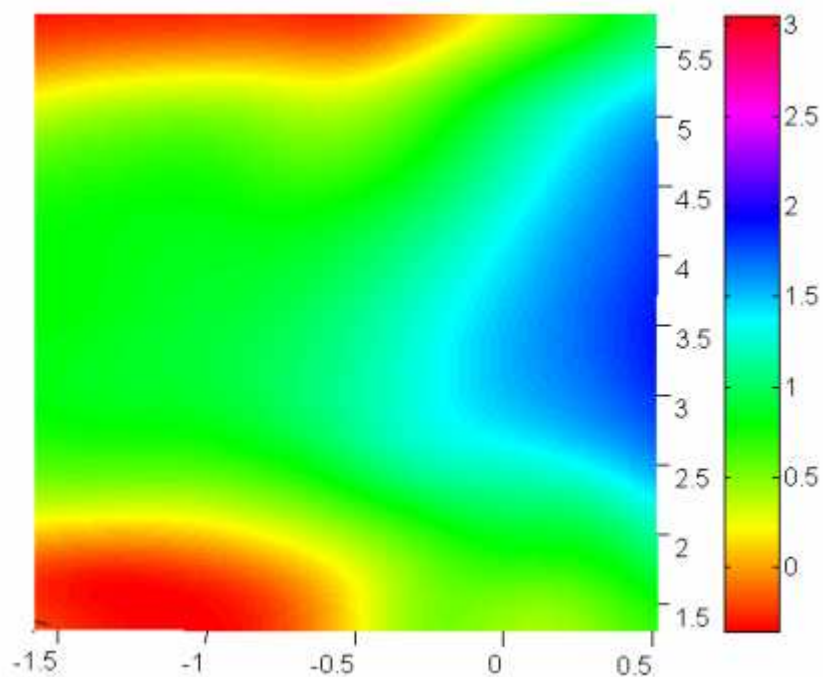


Obr. 4.20 Závislost teploty na vzdálenosti od ústí trysky z křemenného skla pro zvolené průtoky technického argonu

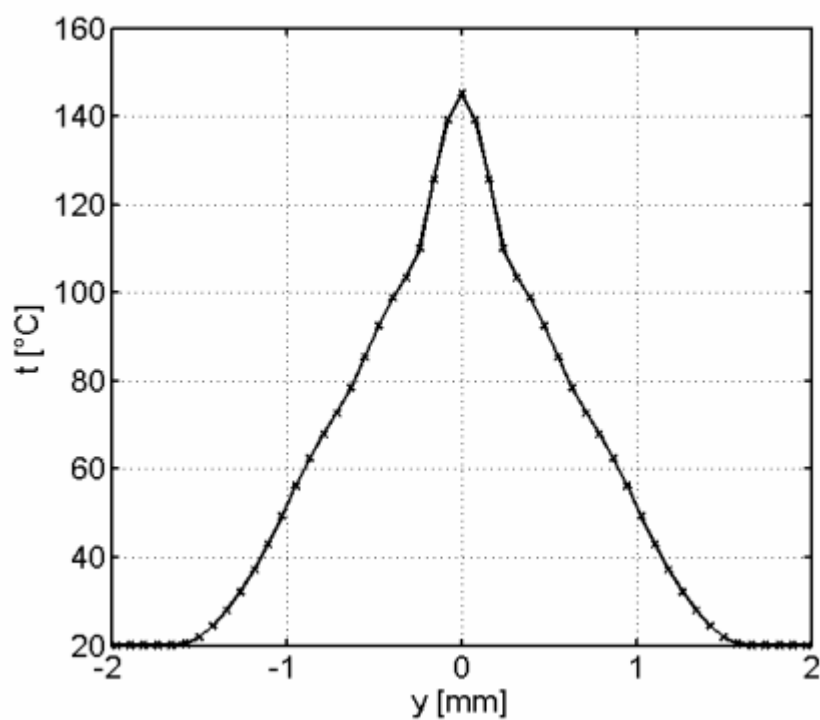
Na obrázku 4.21 je typický interferogram vysokofrekvenčního pochodňového výboje hořícího z mosazné trysky a snímaného CCD kamerou PCI Motion Scope 1000 S s parametry nastavenými podle tab. 4.1. Na obrázku 4.22 je dvourozměrné fázové posunutí získané z tohoto interferogramu. Následující obrázky 4.23 až 4.26 ukazují rozdělení teploty v rovinách kolmých na předpokládanou osu symetrie plazmového kanálu v různých vzdálenostech od ústí mosazné trysky. Stejně tak další obrázky zobrazují to samé pro vysokofrekvenční bariérový – pochodňový výboj hořící z trysky z křemenného skla, tj. typický interferogram (obr. 4.27), dvourozměrné fázové posunutí (obr. 4.28) a teplotní pole v řezech kolmých na plazmový kanál v různých vzdálenostech od ústí trysky z křemenného skla (obr. 4.29 – 4.32). Všechny tyto obrázky zobrazují údaje při průtoku plynu 600 sccm.



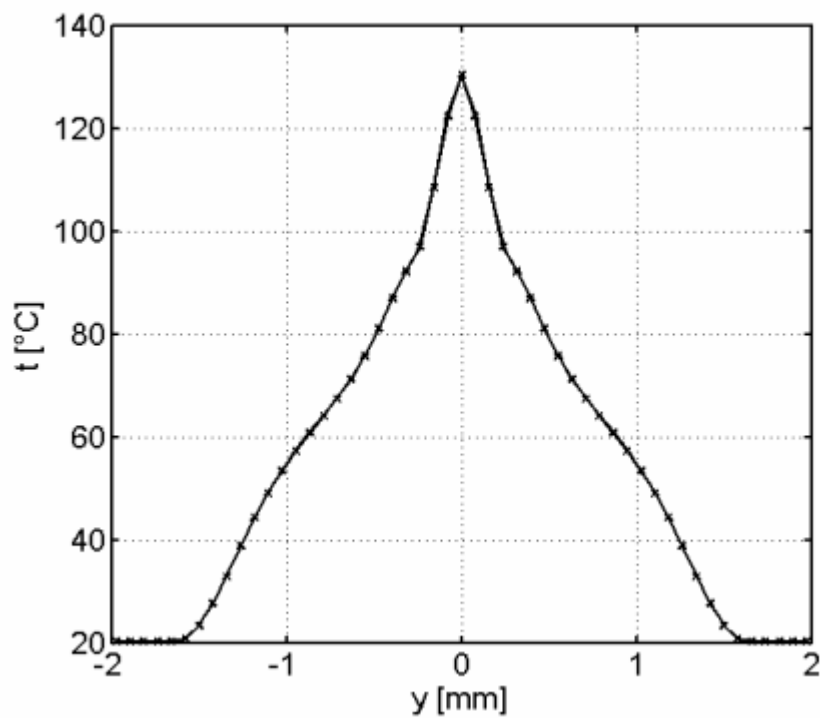
Obr. 4.21 Typický interferogram vysokofrekvenčního pochodňového výboje



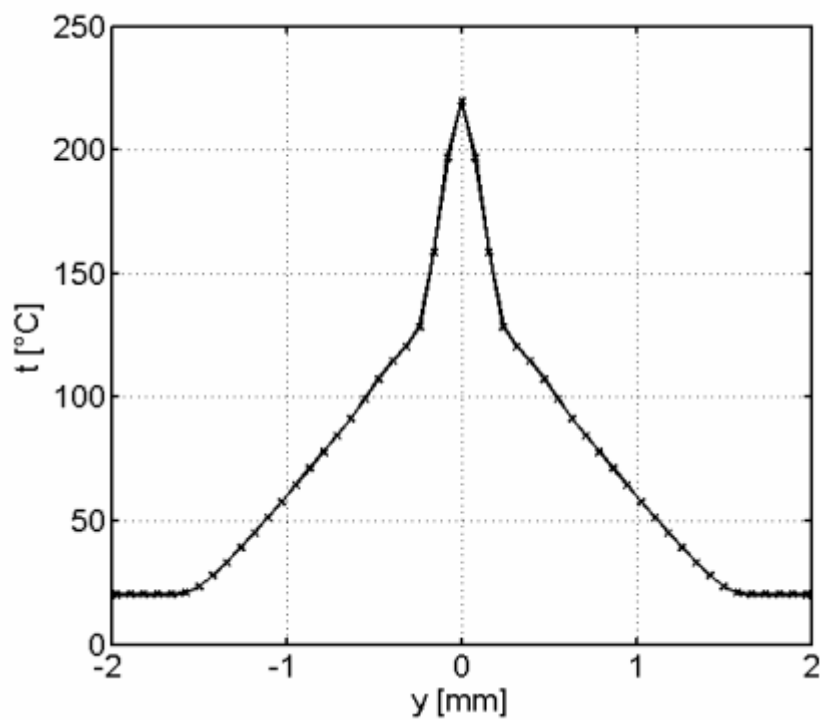
Obr. 4.22 Rozdělení fázového posunutí vypočteného z interferogramu na obr. 4.21



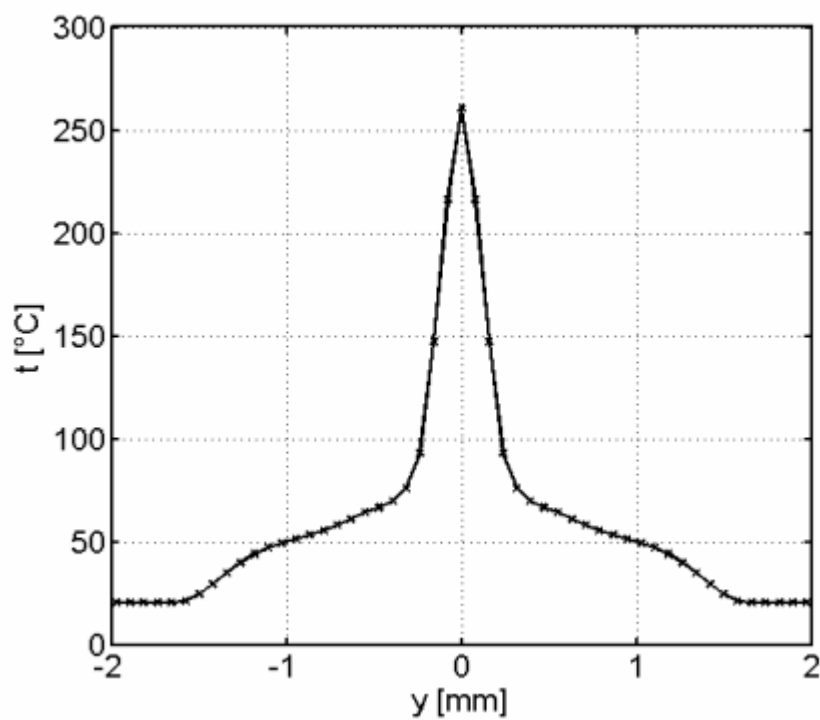
Obr. 4.23 Rozdělení teploty neutrálního plynu ve vzdálenosti 1 mm od ústí mosazné trysky v případě vysokofrekvenčního pochodňového výboje (souřadnice y koresponduje s obr. 4.21)



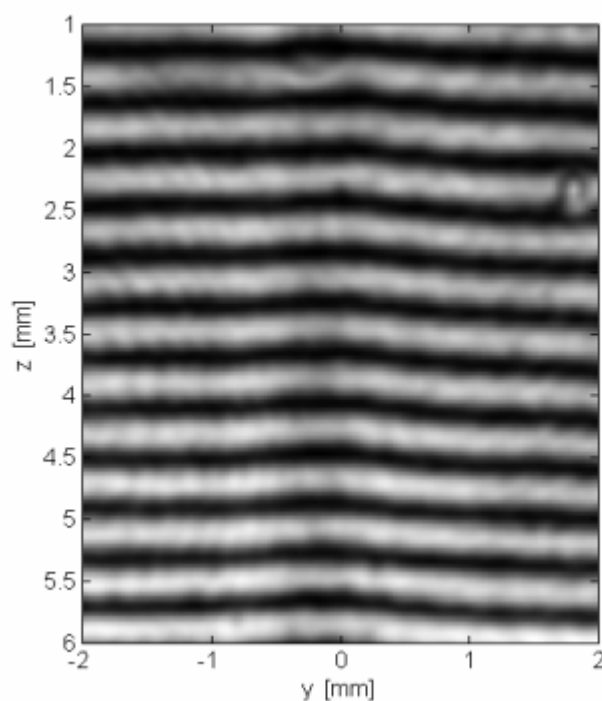
Obr. 4.24 Rozdělení teploty neutrálního plynu ve vzdálenosti 2 mm od ústí mosazné trysky (souřadnice y koresponduje s obr. 4.21)



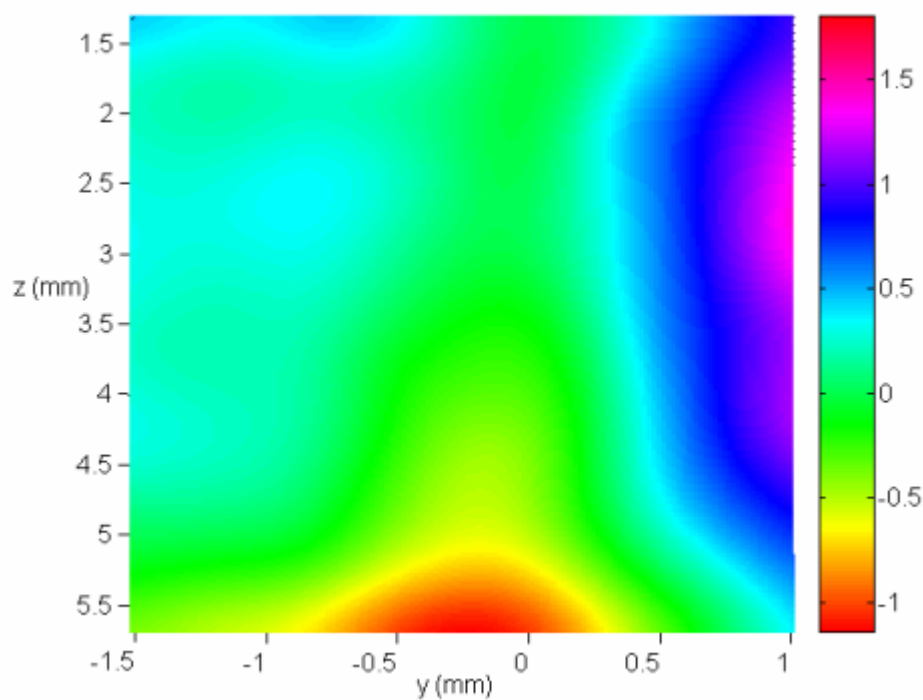
Obr. 4.25 Rozdělení teploty neutrálního plynu ve vzdálenosti 3 mm od ústí mosazné trysky (souřadnice y koresponduje s obr. 4.21)



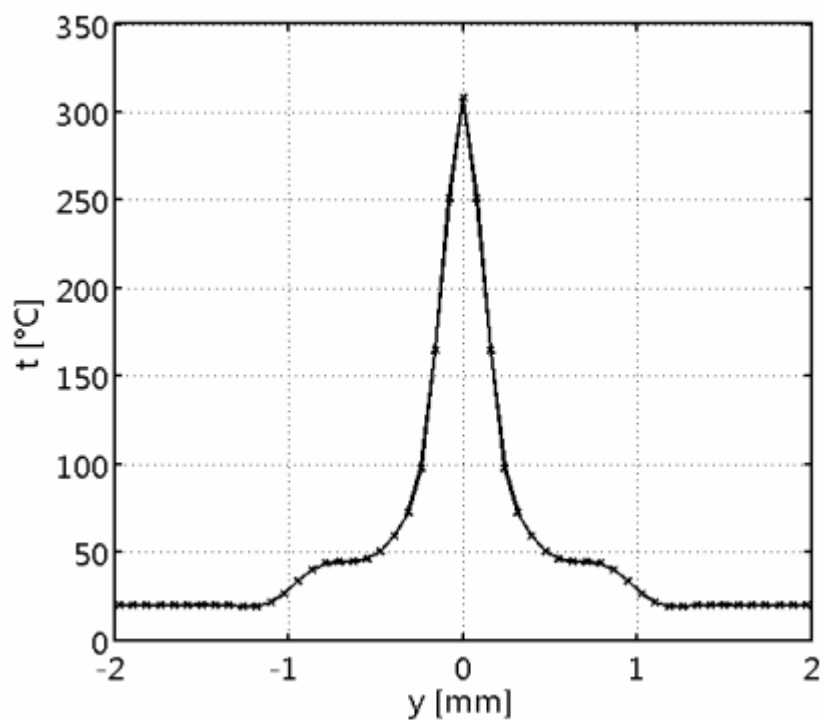
Obr. 4.26 Rozdělení teploty neutrálního plynu ve vzdálenosti 4 mm od ústí mosazné trysky (souřadnice y koresponduje s obr. 4.21)



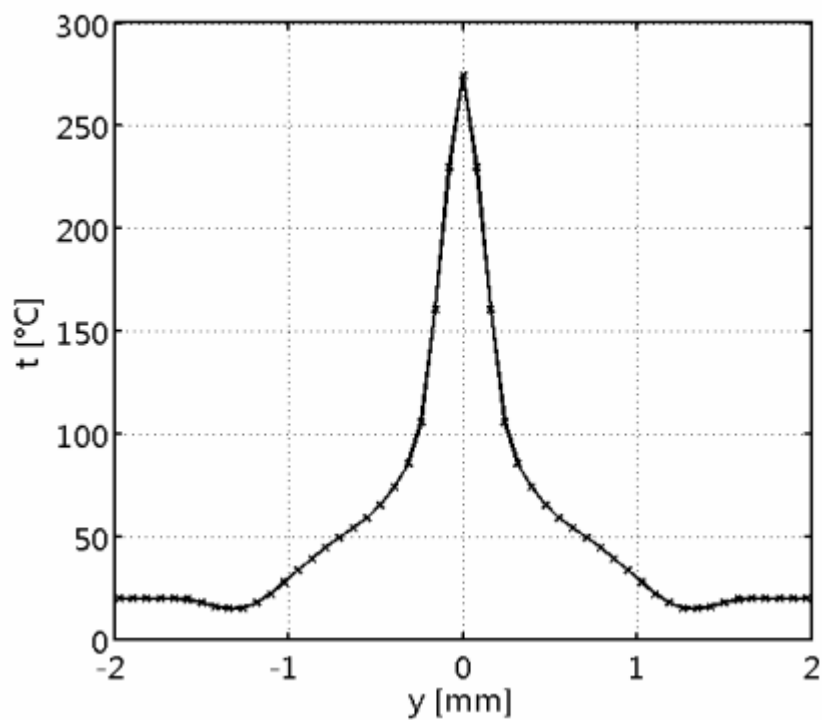
Obr. 4.27 Typický interferogram vysokofrekvenčního bariérového – pochodňového výboje



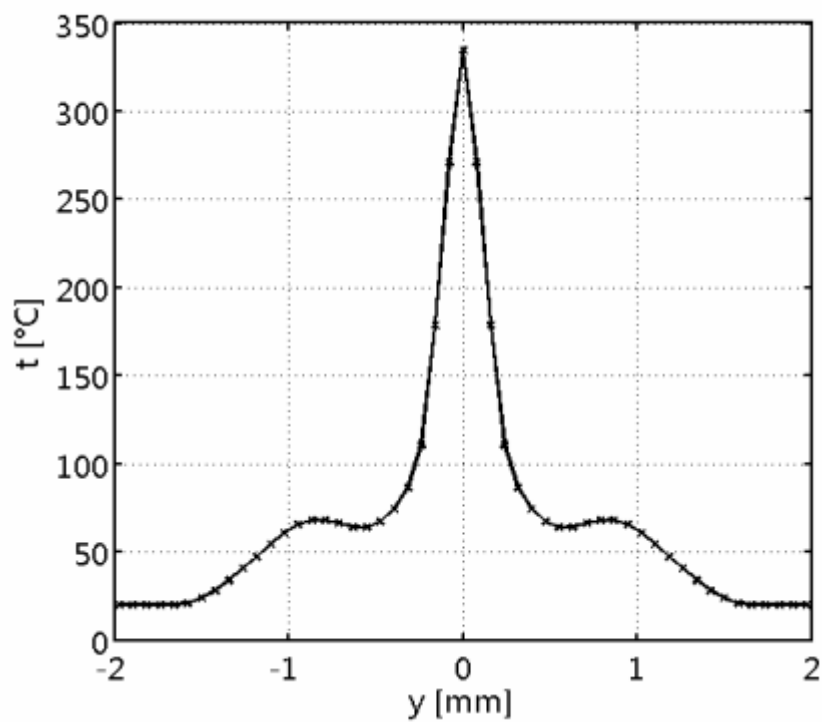
Obr. 4.28 Rozdělení fázového posunutí vypočtené z interferogramu na obr. 4.27



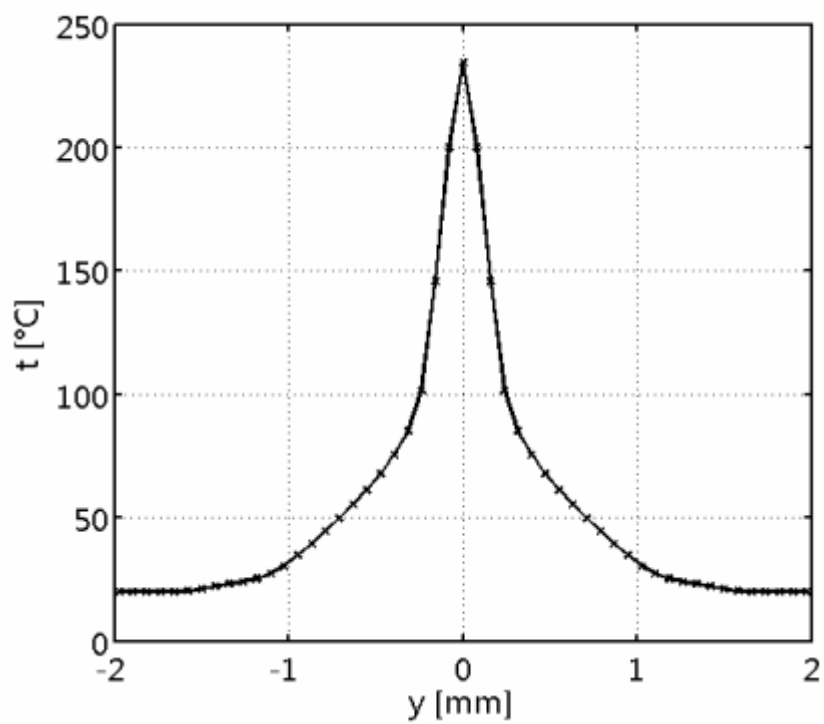
Obr. 4.29 Rozdělení teploty neutrálního plynu ve vzdálenosti 1,5 mm od ústí skleněné trysky v případě vysokofrekvenčního bariérového – pochodňového výboje (souřadnice y koresponduje s obr. 4.27)



Obr. 4.30 Rozdělení teploty neutrálního plynu ve vzdálenosti 2,5 mm od ústí skleněné trysky (souřadnice y koresponduje s obr. 4.27)



Obr. 4.31 Rozdělení teploty neutrálního plynu ve vzdálenosti 3,5 mm od ústí skleněné trysky (souřadnice y korespondují s obr. 4.27)



Obr. 4.32 Rozdělení teploty neutrálního plynu ve vzdálenosti 4,5 mm od ústí skleněné trysky (souřadnice y koresponduje s obr. 4.27)

5. Diskuse výsledků

Hlavním cílem mojí bakalářské práce bylo vyhodnocení experimentů a zpracování získaných dat. Data, která jsem vyhodnocoval, naměřil 11. 12. 2002 vedoucí práce RNDr. Pavel Kříž, Ph.D. Z těchto dat, která byla v podobě videí nasnímaných CCD kamerou PCI Motion Scope 1000S o délce 4 s., jsem pomocí softwaru CCD kamery vybral 52 obrázků, které byly 80 ms od sebe. Těchto 52 interferogramů jsem vybíral pro trysku mosaznou i pro trysku z křemenného skla a u každé trysky vždy pro několik průtoků v rozmezí od 600 sccm do 1000 sccm.

Holografický interferometr, na kterém byly naměřeny potřebné hodnoty, byl aplikován ke studiu plazmového kanálu vysokofrekvenčního pochodňového a vysokofrekvenčního bariérového – pochodňového výboje. K měření byly použity dvě trysky. Pro pochodňový výboj byla použita mosazná tryska a pro bariérový – pochodňový výboj byla použita tryska z křemenného skla s mosazným pouzdem. Kvůli prevenci před přechodem obou typů pochodňových výbojů v obloukový, byla na uzemněnou elektrodu položena skleněná destička jako dielektrická bariéra. Pro důkladné porovnání teplot obou typů výbojů byla většina fyzikálních parametrů nastavována stejně (viz. tab. 4.1). Jediný rozdíl byl pouze v použitých tryskách.

Z každého vybraného interferogramu bylo vypočteno rozdělení teploty neutrálního plynu v osovému řezu plazmového kanálu. Z jednotlivých rozdělení byla určena teplota přímo na předpokládané ose symetrie. Pro vysokofrekvenční pochodňový výboj to bylo ve vzdálenosti 1, 2, 3 a 4 mm od ústí trysky. Pro vysokofrekvenční bariérový – pochodňový výboj to bylo ve vzdálenosti 1.5, 2.5, 3.5 a 4.5 mm od ústí trysky. Výsledné teploty pro každou trysku a průtok plynu tryskou byly určeny jako aritmetický průměr získaných hodnot. V případě vysokofrekvenčního pochodňového výboje hořícího z mosazné trysky docházelo k nárůstu teploty se vzdáleností od ústí trysky. U těchto nárůstů u všech průtoků mosaznou tryskou lze pozorovat, že nárůst teploty je lineární a to v průměru cca. 50 °C. Pro vysokofrekvenční bariérový – pochodňový výboj hořící z trysky z křemenného skla docházelo také k postupnému zvyšování teploty s rostoucí vzdáleností od ústí trysky. Tento nárůst má lineární charakter mezi 1,5 až 3,5 mm od ústí trysky. Ve vzdálenosti 4,5 mm od ústí trysky byla teplota výboje vždy o něco nižší než v ostatních případech. Tento pokles nelze považovat za náhodu, jelikož tento pokles byl pozorován u všech průtoků plynu. Nárůst teploty v závislosti na vzdálenosti se přibližně pohyboval okolo 40 °C. Dále se z vyhodnocených hodnot dalo

vypozorovat, že při větším průtoku technického argonu byla teplota více stabilizovaná než při nižších průtocích tohoto plynu.

Lineární vzestup teploty by se dal potvrdit větším počtem vyhodnocených interferogramů, kterých bylo na jednom naměřeném videu 520. Takto získaných videí bylo k měření použito celkem deset. Celkově se dalo vyhodnotit 5200 interferogramů, ale to z časových důvodů nebylo možné. Zpracování jednoho interferogramu totiž zabralo poměrně dost času. Nejdříve se musel vyfiltrvat v programu DIPS na poměrně zastaralém počítači a následně vyhodnotit pomocí programů napsaných pro program MATLAB. Celý tento proces pro jeden interferogram trval přibližně kolem 30 minut.

6. Závěr

Při psaní této bakalářské práce jsem se seznámil s teoretickou funkcí holografického interferometru Mach – Zehnderova typu a s možností jeho využití v praxi. Nejdůležitější součástí bylo vyhodnocení naměřených údajů. K tomuto jsem se musel seznámit s prací v programech DIPS a MATLAB. Tato práce byla velmi časově náročná, ale zkušenost s tímto typem vyhodnocování stála za to.

V první části mojí práce jsem se zabýval vysvětlením funkčního principu holografického interferometru. Uvedl jsem zde schematické znázornění holografického interferometru. K tomuto schématu jsem uvedl princip funkce tohoto interferometru. Dále jsem se snažil popsat podrobně jednotlivé části holografického interferometru Mach – Zehnderova typu. V popisu jednotlivých částí jsou uvedeny obecné údaje o té dané součásti, ale i zcela konkrétní popisy součástí použitých při měření, které jsem vyhodnocoval, a také jejich parametry. Posléze je uvedeno způsob zachycení na holograf a holografy konkrétně, které byly použity při měření vyhodnocovaném v této práci. V další podkapitole je uveden způsob seřízení interferometru. Je zde uveden způsob nastavení jak na konečnou šířku proužků, tak i na nekonečnou šířku proužků.

Ve druhé části je popsáno a vyhodnoceno měření, které bylo naměřeno již dříve. Je zde uvedeno přesné nastavení CCD kamery, se kterou byly hodnoty naměřeny. Vyhodnocení konkrétních měření jsou uvedeny dále. U každého vyhodnoceného měření je uvedena tabulka se získanými hodnotami teploty a jejich chybami. Dále jsou zde uvedeny grafy závislosti teploty na vzdálenosti od ústí trysky a také závislosti teploty na časovém průběhu výboje. Oba tyto typy grafů jsou potom z jednotlivých měření sloučeny dohromady pro každý typ výboje zvlášť.

Všechny důležité informace o vyhodnocení výsledků a jejich chyb jsou odiskutovány v závěrečné diskusi.

8. Seznam použité literatury

- [1] Liška, M., Petráček, J., Samek, O., Peocházka, I.: *Jemná machanika a optika* 11-12 (1994) p.321
- [2] Miler, M.: *Holografie (teoretické a experimentální základy a její využití)*, SNTL, Praha, 1974
- [3] Liška, M.: *Jemná mechanika a optika* 6 (1990) p.177
- [4] <http://cs.wikipedia.org/wiki/Holografie>
- [5] Vest, Ch. M.: *Holographic interferometry*, John Wiley, New York, 1979
- [6] Liška, M., Kovář, L., Samek, O.: *Jemná mechanika a optika* 1-2 (1994)
- [7] Haines, K. A., Hildebrant, B. P.: *Surface – Deformation Measurement using the Wavefront Reconstruction technique*. Appl. Opt., 1966 s.595
- [8] Brooks, E. B., Heflinger, L. O., Wuerker, R. F., Briones, R. S.: *Holographic Photography of High – Speed Phenomena with Convention and Q – Switched Ruby Lasers*. Appl. Phys. Lett., 7, 1965, s. 92.