

Visualizace tepelných gradientů pomocí šlírové fotografie

Obsah

1	Úvod	2
2	Výpočet teploty na základě změny indexu lomu	2
3	Experimentální uspořádání a měření	3

1 Úvod

Malé změny indexu lomu, které vyvolávají změny gradientu v nehomogenním médiu se nazývají šlíry. Tyhle nehomogenity v transparentním prostředí nejsou běžně pozorovatelné pouhým okem. Existuje několik metod, pomocí kterých je možno tyhle změny pozorovat. Jsou založeny na změně indexu lomu na základě změny hustoty, koncentrace nebo teploty. Šlíry byly po první krát pozorovány Robertem Hookem a Christianem Huygensem v 17. století. August Toepler je pozoroval kvůli chromatickým aberacím v čočkám. V roce 1863 navrhl šlírovou fotografii v podobě v jaké ji známe dnes. Díky svému neinvazivnímu charakteru poskytuje informace o změnách indexu lomu bez narušení zkoumáneho objektu [1].

2 Výpočet teploty na základě změny indexu lomu

Šlírová fotografie umožňuje určení indexu lomu a rozložení tepelního pole [2]:

$$n - 1 = (n - 1)_n + (n - 1)_+ + (n - 1)_e \quad (1)$$

$$(n - 1)_e = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2\lambda^2}{2\pi m_e c_0^2} n_e \quad (2)$$

pro elektrony a

$$(n - 1)_{+,n} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} 2\alpha_{+,n}(\lambda)n_{+,n} \quad (3)$$

pro ionty a neutrály, kde e je náboj elektronu, m_e elektronová hmotnost, c_0 je rychlost světla ve vakuu, λ je vlnová délka použitého světelného zdroje, $\alpha_{+,n}(\lambda)n_{+,n}$ polarizovatelnost iontů a neutrálů, $n_{e/+}/n$ jsou hustoty elektronů, iontů a neutrálů a ϵ_0 je permitivita vakua. Zkombinováním předchozích rovnic dostáváme:

$$n = 1 - \frac{1}{2} \left(\frac{\omega_p}{\omega} \right)^2 + \frac{1}{4\pi\epsilon_0} 2\alpha_n n_n \quad (4)$$

Když světlo projde nehomogenním mediem, světelné louče se kvůli změně indexu lomu odchýlí o malý uhel ϵ , která závisí kromě n na tloušťce media:

$$\epsilon_\xi = \int \frac{1}{n} \frac{dn}{d\xi} dy \quad (5)$$

kde y je směr optické osy a ξ může být x nebo z podle natočení ostří nože. Jestli je ostří paralelně s osou z , měří se změny v směru x – deviace $\delta_x = f_2 \tan \epsilon$. Aproximace malých uhlů ϵ vede k $\delta_x = f_2 \epsilon$ a pak:

$$\delta_x(x) = f_2 \int \frac{1}{n} \frac{\partial n}{\partial x} dy \quad (6)$$

V případě válcové smetrie ($n = n(r, z)$)

$$\delta_x(x) = 2f_2 \int_0^{\text{inf}} \frac{1}{n} \frac{\partial n}{\partial r} \frac{x}{r} dy \quad (7)$$

kde r je proměnná v radiálním směru měřená od osy plazmového sloupce. Diskretizace vede k maticovému zápisu:

$$C = \frac{2f_2}{\alpha n_{\text{inf}} L \frac{\partial n}{\partial r}(8)}$$

kde L je geometrický koeficient, ktého řešení vede k $\partial n/$. Použitím rovnice 4 pro index lomu může být určen radiální profil teploty T .

3 Experimentální uspořádání a měření

Experimentální uspořádání je znázorněno na obr.1. Používá dvou zrcadlové uspořádání typu Z. Optický systém je složen z dvou sférických zrcadel s hliníkovým povrchem $f/10$ (15 cm poloměr) s přesností $\lambda/8$ a ohniskovou vzdáleností 1.51 m. Jako bodový zdroj světla bylo použité optické vlákno propojeno s bílou LED, umístěno v ohniskové vzdálenosti prvního zrcadla. Mezi zrcadly jsou paralelní louče protínající sekci, v které je umístěn objekt, který bude zkoumán. Do ohniska druhého zrcadla je umístěno ostří nože (např. žiletka), které nastaveno tak, že zasahuje polovinu ohniska (které má v praxi konečnou velikost). V případě, že světelný svazek neprocházel prostředím s proměnným indexem lomu, projeví se (správné) nastavení ostří pouze celkovým snížením intenzity světelné skvrny na stínítku. Fotografie jsou zaznamenány pomocí digitální kamery.

Optický systém je naladěno až na ostří nože. Vaším úkolem je umístit ostří do ohniska druhého zrcadla a získat rovnoměrně osvětlen obraz jako je znázorněno na obr.2. V případě, že světelný svazek neprocházel prostředím s proměnným indexem lomu, projeví se (správné) nastavení ostří pouze celkovým snížením intenzity světelné skvrny na stínítku. Podívejme se nyní co se stane s paprskem z nějakého směru, který prochází místy s fluktuacemi indexu lomu. Předpokládejme, že ostří je nastaveno vertikálně (například zprava), což znamená, že budeme vidět derivaci hustoty v pravolevém směru vůči šíření paprsku (jak bude zřejmé dále). Pro jednoduchost předpokládáme, že prostředí opticky houstne kolmo ve směru šíření paprsku. V tomto případě se se směrem paprsku neděje nic, podobně jako se kolmo odpadající paprsky nelámou na rozhraní dvou prostředí. To mimo jiné znamená že tečná složka změny indexu lomu k šíření paprsku je nulová, tedy derivace je nulová a na šlířové fotografii tedy nebude viditelná.

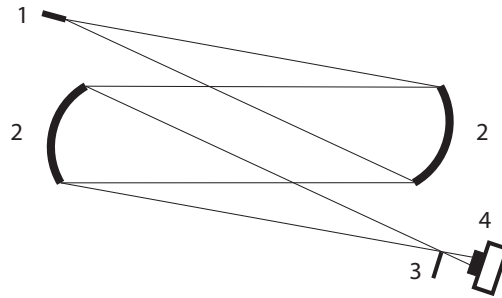
Prostředí opticky houstne směrem doprava/doleva – podobně jako se světlo láme v hustším prostředí ke kolmici, i paprsek se bude ohýbat směrem k hustšímu prostředí. Pokud je fluktuace indexu lomu malá, dojde jen k nepatrnému odchýlení paprsku. V ohnisku to má ovšem za následek odchýlení paprsku od ostří (více světla projde a vznikne světlejší stopa na stínítku) nebo k ostří (více světla zastaví ostří a vznikne tmavší stopa na stínítku). Protože míra odchýlení paprsku odpovídá velikosti změn v indexu lomu, můžeme tvrdit že intenzita světla na stínítku bude v prvním přiblížení velmi dobře úměrný derivaci indexu lomu (v tomto směru).

Prostředí opticky houstne směrem nahoru/dolů – situace je obdobná jako u předchozího bodu, nicméně vertikální orientace ostří znamená, že paprsek vychýlený vertikálně dopadá jen na jinou část ostří, ale stále stejně, tzn nevzniká kontrast. Z výše uvedeného vyplývá, že ostřím lze docílit jen detekce změn indexu lomu v jednom směru. Další možností je použití průhledného barevného filtru nastaveného v ohnisku.

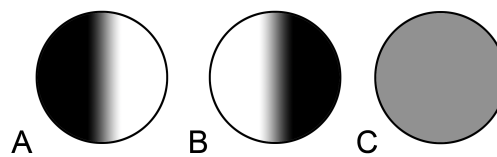
Jestli umístit nůž před obraz, zobrazuje se ořez z levé části. jestli je nůž za obrazem, ořežeme pravú část obrazu. Umístnění v ohnisku způsobí pokles rovnoměrný pokles intenzity světla na obraze – vid. obr.2.

Zdroj plazmatu je umístněno mezi zrcadly. Použijeme atmosferický výboj v argonu, kterého tepelní gradienty pro různé podmínky budeme studovat pomocí šlířové fotografie. Mezi tyto parametry patří hlavně dodávaný výkon a průtok plynu.

- umístíte ostří nože do správné polohy podle obr.2
- naměříte kalibraci polohy pro ostří nože
- udělejte sérii fotografií pro různé podmínky:
 - vstupní výkon: 50W, 100W, 150W, 200W, 250W
 - tok plynu (Ar): 250 sccm, 500 sccm, 750 sccm, 1000 sccm
- vypočítejte odpovídající teplotní gradienty
- udělejte závislosti teplot na dodávaném výkonu a toku plynu



Obrázek 1: Experimentální uspořádání: 1 – zdroj světla, 2 – sférické zrcadla ($f=151$ cm), 3 – ostří nože, 4 – kamera.



Obrázek 2: Závislost zobrazení obrazu na základě polohy ostří nože: A – nůž před obrazem, B – nůž za obrazem, C – nůž v místě obrazu (ohnisko zrcadla).

Reference

- [1] Settles, G. S. *Schlieren and shadowgraph techniques- Visualizing phenomena in transparent media*(Book). Berlin, Germany: Springer-Verlag GmbH, 2001. (2001).
- [2] Prevosto, L., et al. Schlieren technique applied to the arc temperature measurement in a high energy density cutting torch. *Journal of Applied Physics* 107.2 (2010): 023304.