

DIAGNOSTIKA INTERFEROGRAMŮ V PROSTŘEDÍ MATLAB

Olejníček, J.^{1,3}, Píchal J.², Jelínek P.³, Blažek J.³, Špatenka P.^{3,4}

¹ Fyzikální ústav AV ČR, Na Slovance 2, 182 21 Praha 8

² ČVUT, Fakulta elektrotechnická, Technická 2, 166 27 Praha 6

³ Jihočeská univerzita, katedra fyziky PF, Jeronýmova 10, 371 15 Č. Budějovice

⁴ Technická univerzita, Fakulta strojní, Katedra materiálů, Háčkova 6, 461 17 Liberec

ABSTRAKT:

Článek popisuje algoritmus, který autoři použili k diagnostice interferogramů s komplikovanou strukturou interferenčních čar. Popsaný algoritmus je aplikován na interferogram zapáleného pinč výboje hořícího za sníženého tlaku v deuteriu mezi dvěma kruhovými elektrodami za účelem určení koncentrace volných elektronů. Studovaný interferogram obsahuje typické problémové oblasti, které značně komplikují diagnostiku běžných interferogramů: rozdvojené či spojené interferenční čáry, kruhově uzavřené čáry apod. Podrobně jsou diskutovány jednotlivé kroky užitých metod: digitální úprava obrazu, algoritmus aproximace interferenčních čar, 2D interpolace výsledných dat s využitím triangulačních metod, výpočet prostorové frekvence a fázového posunu, inverzní Abelova transformace a výpočet distribuce indexu lomu a s ním spojené elektronové koncentrace. Veškeré výpočty s výjimkou některých kroků digitalizace a úpravy obrazu byly provedeny v programovém prostředí MATLAB.

ÚVOD:

Pro potřeby fyziky plazmatu ale i jiných vědních oborů je optická interferometrie ideální bezkontaktní diagnostická metoda, umožňující studovat parametry plazmatických procesů bez interakce se studovaným objektem. Využívá faktu, že světelný paprsek je při průchodu snímanou oblastí deformován, což se projeví při jeho interferenci s neporušeným světelným svazkem. Studovanými parametry tak mohou být veličiny ovlivňující index lomu plazmatu a to minimálně v takové míře, která je s ohledem na rozměry snímané oblasti zachytitelná na interferogramu. V praxi to většinou bývají teplota a tlak neutrálního plynu, koncentrace příměsí s odlišným indexem lomu, či v případě silně ionizovaného plazmatu koncentrace volných elektronů. Z deformace interferenčních čar lze poté usuzovat na míru vlivu té či oné konkrétní veličiny.

Zatímco pořízení interferogramu je relativně náročný, přesto však již technicky poměrně dobře zvládnutý proces, diagnostika a interpretace výsledných interferenčních struktur je stále velmi pomalá a značně komplikovaná (viz např. [1]). Přitom u mnohých experimentů požadujeme, abychom spočtené výsledky obdrželi pokud možno v reálném čase a mohli na základě jejich znalostí měnit parametry prováděného pokusu. Naší snahou proto bylo vyvinout metodu, která bude umožňovat v poměrně krátkém čase obdržet co nejpřesnější numerické hodnoty fázového posunu a s ním související studované veličiny. Přitom je zřejmé, že čím rychlejší algoritmus vyhodnocení zvolíme, tím větší vliv bude mít rychlost na přesnost a přesnost spočítané informace. Je proto třeba zvolit vhodný kompromis mezi rychlostí a přesností s jakou se hodláme spokojit. V našem případě jsme proto šli cestou aproximace tmavých a světlých interferenčních čar spojenou s interpolací vnitřních bodů interferogramu pomocí triangulačních metod. Jako pracovní prostředí jsme zvolili MATLAB, který je sice známý svou „pomalostí“, ale zato relativně snadno a rychle zvládá operace jako násobení matic, filtrace obrazu, 2D triangulace apod. Výsledný algoritmus popsany v další části článku je proto univerzálně použitelný pro všechny typy interferogramů.

ALGORITMUS VYHODNOCENÍ INTERFEROGRAMU:

Většina pořízených interferogramů obsahuje kromě vlastní informace o fázovém posunu také nežádoucí šum, který vnáší do obrazu vysokou prostorovou frekvenci a nepříjemně tak komplikuje proces aproximace interferenčních čar. Před vlastním výpočtem fázového posunu je proto třeba tento šum odstínit alespoň do té míry aby při aplikaci aproximačního algoritmu neohrožilo nebezpečí „protunelování“ do sousední interferenční čáry. Toho je dosaženo přenásobením každého pixelu interferogramu Gaussovou konvoluční maticí definovanou na příklad pro filtr velikosti 3x3 vztahem:

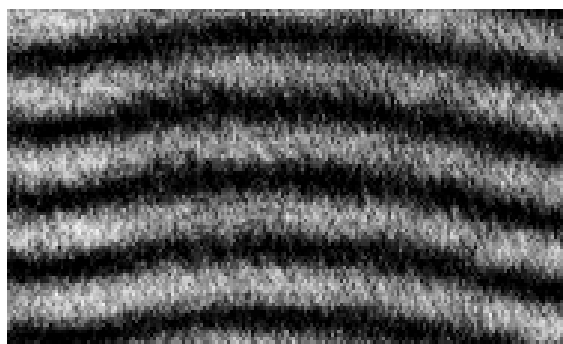
$$h = \frac{1}{16} \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 2 & 4 & 2 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Nová intenzita $I_{m,n}$ každého vnitřního pixelu původního obrazu je poté určena rovnicí:

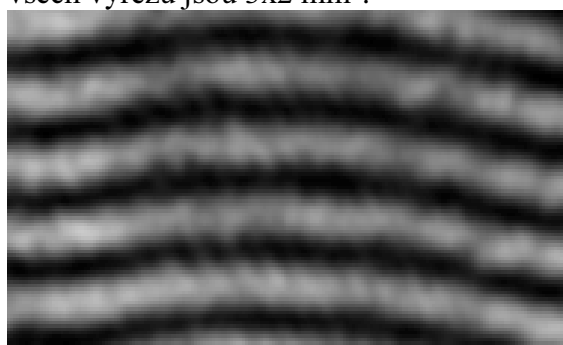
$$I_{m,n} = \sum_{i,j=-1}^1 I'_{m+i,n+j} \cdot h_{i+2,j+2}, \quad (2)$$

kde $I'_{m,n}$ je intenzita pixelu původního obrazu na souřadnicích m,n a $h_{i,j}$ je odpovídající prvek konvoluční matice. Sčítání ve vzorci (2) probíhá přes všechna i a j přes hodnoty $-1, 0, 1$.

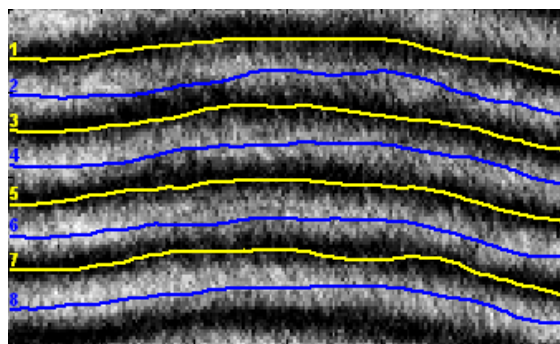
Velikost použitého konvolučního filtru se řídí velikostí filtrovaného obrazu, intenzitou šumu a šířkou snímaných interferenčních čar. V případě rozměrného interferogramu s masivními interferenčními čarami je vhodnější použít větší filtr než v případě interferogramu se slabým rozlišením a tenkými čarami. Celková intenzita obrazu se po provedené trans-



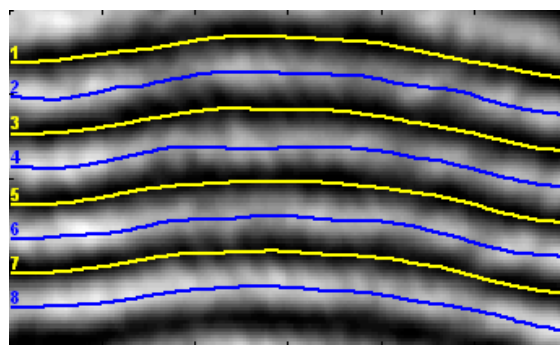
Obr. 1: Detail interferogramu zachycující bariérový výboj hořící v heliu. Rozměry všech výřezů jsou 3x2 mm².



Obr. 3: Detail interferogramu z obr. 1 po úpravě Gaussovým filtrem velikosti 7x7.



Obr. 2: Původní neupravený interferogram s aproximovanými interferenčními čarami.



Obr. 4: Upravený interferogram s aproximovanými interferenčními čarami.

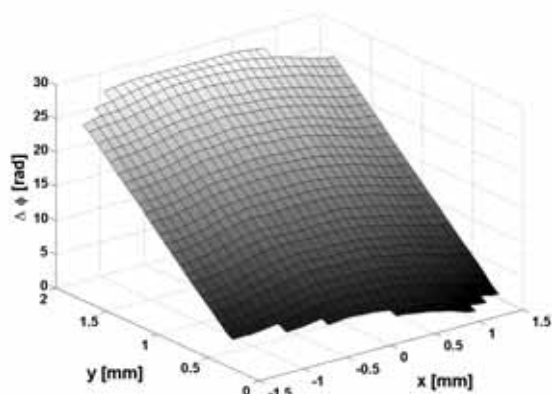
formaci nezmění, neboť součet všech prvků konvoluční matice je roven jedné. Rozdíl mezi původním a upraveným interferogramem je možné vidět na obrázcích 1 a 3.

Algoritmus aproximující jednotlivé interferenční čáry je v případě mírně deformovaného interferogramu velice jednoduchý. Matlab vytvoří matici, která je rozměrově shodná s velikostí interferogramu v pixelech a poté postupně zleva doprava vyhledává nejintenzivnější pixely podél jednotlivých interferenčních čar. Do nalezených pozic ukládá hodnoty fázového posunu jako násobky čísla π . V případě světlých interferenčních proužků se vždy jedná o sudé násobky, v případě tmavých proužků o násobky liché. Algoritmus je ukončen v okamžiku, kdy je proužek aproximován celý a pokračuje vyhledáváním dalších bodů na následující interferenční čáře. Po dokončení aproximace všech požadovaných proužků je vypočítán klouzavý průměr aproximačních čar s předem stanoveným poloměrem a jednotlivé čáry jsou vyhlazeny. Výsledky aproximačního procesu lze najít na obrázcích 2 a 4. Porovnáním obou obrázků lze snadno vidět rozdíl při aproximování původního interferogramu a interferogramu vyhlazeného Gaussovým filtrem. U obou příkladů byl při vyhledávání pixelů s extrémní hodnotou intenzity povolen maximální krok stranou o velikosti jednoho pixelu. V případě většího kroku by nerovnosti aproximovaných čar na obrázku 2 výrazně vzrostly.

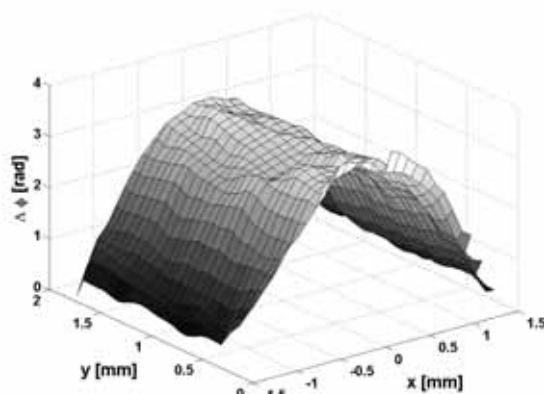
Výsledkem popsaného procesu je řídká matice obsahující hodnoty fázového posunu avšak pouze v místech středů respektive maxim a minim jednotlivých interferenčních čar. Abychom obdrželi informaci o fázovém posunu i mimo tyto čáry jsou data interpolována pomocí matlabovské funkce GRIDDATA s parametrem `method=cubic`. Tato funkce provádí interpolaci založenou na Delaunayově triangulaci [2] a jejím výsledkem je hladká funkce se spojitými prvními derivacemi. Protože však Matlab vrací pro některé body ležící blízko konvexního obalu hodnoty NaN (Not-a-Number), jsou tyto hodnoty nahrazeny aritmetickým průměrem hodnot z okolních pixelů. Na konci celého procesu jsou všechny body ležící uvnitř triangulované oblasti vyplněny hodnotou odpovídajícího fázového posunu. Body ležící mimo takto interpolovanou oblast zůstávají prázdné. Spočtený 2D profil fázového posunu lze najít na obrázku 5.

Z grafu je zřejmé mírné prohnutí podél souřadnice $x = 0$, které odpovídá prohnutí interferenčních proužků na obrázcích 1 a 3. Toto prohnutí představuje skutečnou hodnotu fázového posunu, která se plně projeví teprve po odečtení prostorové frekvence. Toho je dosaženo následujícím způsobem.

V obrázku je zvolena jedna nebo dvě oblasti (většinou při levém a pravém okraji interferogramu), které obsahují neporušenou strukturu interferenčních proužků. Z těchto dvou oblastí je vyňat sloupcový vektor dat fázových posunů, který je lineárně aproximován metodou nejmenších čtverců. S využitím obou vektorů je posléze rekonstruován původní neporušený interferogram a v případě, že obě vybrané oblasti nejsou vůči sobě fázově posunuty, obsahuje



Obr. 5: Výsledný fázový posun obdrženy po triangulaci dat z obrázku 4.



Obr. 6: Fázový posun z obrázku 6 po odečtení prostorové frekvence.

rekonstruovaný interferogram pouze sadu rovnoběžných interferenčních čar. V opačném případě mohou být interferenční proužky různoběžné a ve všech místech ne stejně široké. Každopádně však vždy musí být rovné a nedeformované. Takto vytvořený fázový profil reprezentující prostorovou frekvenci je poté odečten od dříve spočteného fázového posunu (obr.5), díky čemuž obdržíme hledaný fázový posun (obr. 6).

Výsledky předchozího výpočtu mohou být posléze použity k výpočtu hledaných parametrů plazmatu – v tomto případě koncentrace helia a teploty neutrálního plynu. Obojí lze nalézt v práci [3]. Popsaný algoritmus je velmi rychlý. Strojový čas potřebný k vyhodnocení (výpočtu fázového posunu) jednoho interferogramu o rozměrech 640x480 pixelů se na rychlých počítačích pohybuje hluboko pod hranicí jedné sekundy. Rozšíříme-li algoritmus o výpočet Abelovy transformace, indexu lomu a hledané veličiny, prodlouží se doba výpočtu přibližně na dvojnásobek, což ale stále dostatečně krátký interval na real-timeové sledování parametrů experimentu a jejich případnou regulaci. Zmíněná rychlost výpočtu však platí pouze pro „málo“ deformované interferenční obrazce jako tomu bylo v případě proudícího helia. U komplikovaných interferenčních struktur, kde proces vyhodnocení nelze plně zautomatizovat, je doba výpočtu pochopitelně mnohem delší. Výhodou popsaného algoritmu však je, že jej lze použít na všechny typy interferogramů. V následující části popíšeme jeho aplikaci na komplikovanou strukturu interferenčních čar pinč výboje hořícího za sníženého tlaku v deuteriu.

EXPERIMENT

Snímek interferogramu, který jsme vyhodnocovali, byl pořízen na aparatuře PF 150 Institutu Fyziky Plazmatu ve Varšavě v Polsku [4]. Parametry výboje byly následující. Poloměr vnitřní elektrody - 5 cm, poloměr vnější elektrody - 20 cm, maximální hodnota proudu ve výboji – 0,5 MA přibližně 5μs po zapálení výboje, tlak uvnitř recipientu – 2 torry (266 Pa), náplň komory – deuterium. Pro pořízení interferogramu byl použit Mach-Zenderův interferometr s Nd-YAG laserem pracujícím na vlnové délce 531 nm. Typická doba expozice byla 8 ns. Interferenční obrazec byl registrován na černobílý film.

Studovanou veličinou, která v tomto případě měla dominantní podíl na deformaci interferenčních proužků byla koncentrace volných elektronů. Vztah indexu lomu a elektronové koncentrace je popsán rovnicí

$$n - 1 = - \frac{N_e e^2 \lambda^2}{8\pi^2 \epsilon_0 m_e c^2} = -4,485 \cdot 10^{-16} \cdot \lambda^2 \cdot N_e, \quad (3)$$

kde N_e představuje elektronovou koncentraci, e náboj elektronu, λ vlnovou délku použitého světla, ϵ_0 elektrickou permeabilitu, m_e hmotnost elektronu a c rychlost světla. Vzhledem k faktu, že index lomu deuteria při tlaku 266 Pa je 1,00000035 [5], lze bez větších důsledků na přesnost výpočtu zanedbat teplotní a tlakové změny při výboji. Výsledný index lomu je proto pouze funkcí elektronové koncentrace a je tak plně určen rovnicí (3).

Vztah mezi indexem lomu a fázovým posunem, který je klíčový pro výpočet studovaných veličin, je určen rovnicí ideální interferometrie

$$\delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda_0} \cdot \iint [n(x, y, z) - n_0] dr. \quad (4)$$

Ta předpokládá pouze přímé šíření světla a proto je celková deformace fáze dána integrálem přes dráhové rozdíly. K vyhodnocení interferogramu byl použit algoritmus popsáný v předchozí kapitole. Výsledky výpočtu je možno nalézt na následujících osmi grafech.



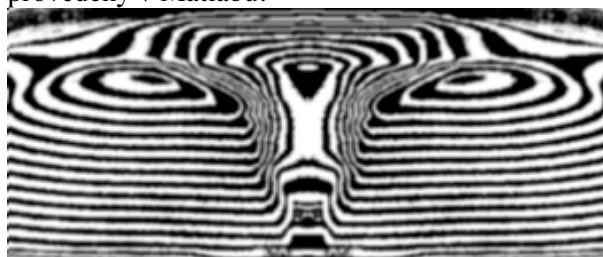
Obr. 7: Výřez interferogramu pinč výboje. Velikost výřezu je 523x220 pixelů což odpovídá rozměrům 158x68 mm².



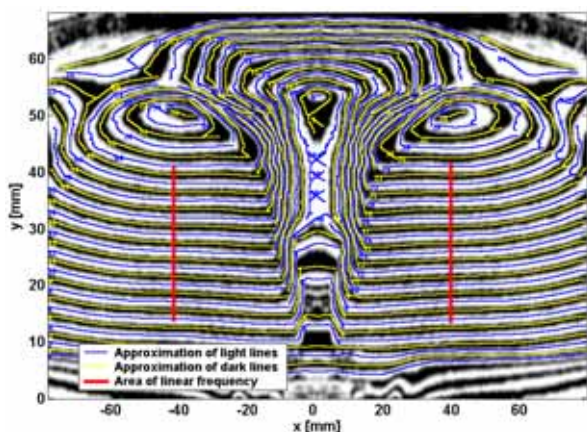
Obr. 8: Výřez interferogramu z obr. 7 po převedení do binárního kódu. Tyto úpravy nebyly provedeny v Matlabu!



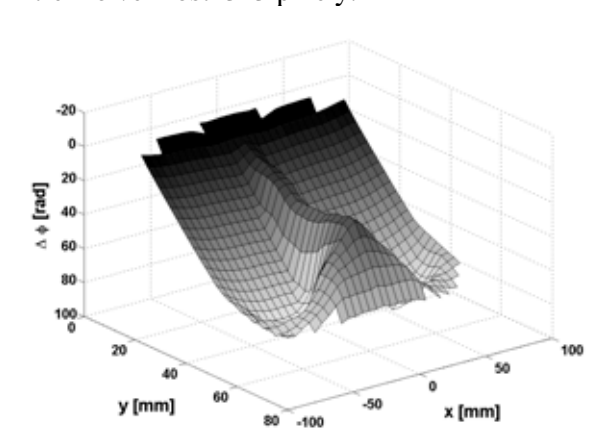
Obr. 9: Upravený výřez po zrekonstruování poškozených a zdvojených interferenčních čar.



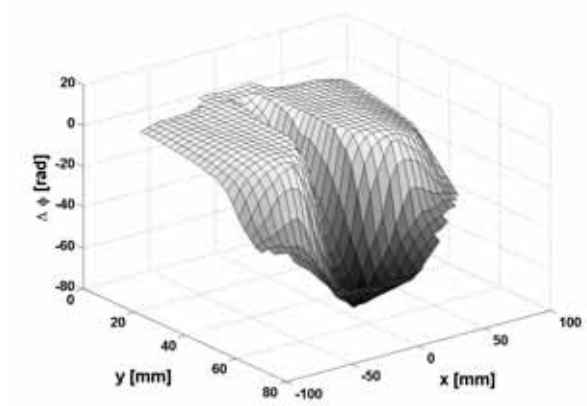
Obr. 10: Výsledný interferogram převedený zpět do odstínů šedi a „zašuměný“ Gaussovým filtrem o velikosti 3x3 pixely.



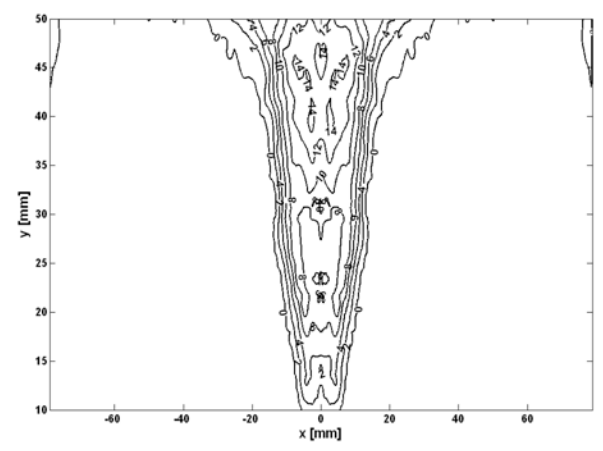
Obr. 11: Interferogram z obr. 10 s aproximovanými interferenčními čarami. Rovné svíslé čáry odpovídají oblastem s lineární fází.



Obr. 12: Fázový posun spočtený z dat na obrázku 11.



Obr. 13: Fázový posun po odečtení prostorové frekvence.



Obr. 14: Výsledná elektronová koncentrace podél výbojového kanálu v jednotkách 10^{17} cm^{-3} . Více informací lze nalézt v práci [6].

ZÁVĚR:

Předkládaná práce popisuje jednoduchý a poměrně rychlý algoritmus diagnostiky interferogramů založený na aproximaci interferenčních čar a Delaunayově triangulaci. Popsaná metoda poskytuje velmi přesné výsledky výpočtu. Podobné výsledky vyhodnocení obdobného experimentu lze najít v práci [7]. Navrhovaný algoritmus je nejenom rychlý, ale lze jej použít na téměř všechny typy interferogramů seřízených na konečnou i nekonečnou šířku proužků. Obdržené hodnoty elektronové koncentrace pohybující se v rozmezí 10^{17} až 10^{18} cm^{-3} jsou přibližně v očekávaném intervalu. Elektronová teplota počítaná autory z rovnováhy magnetického a kinetického tlaku, která se pohybovala kolem hodnoty 100 eV, je přesně v souladu s hodnotami v [7]. Více detailů a přesnější výsledky lze nalézt v práci [6].

Přesnost výpočtů je do jisté míry omezena velikostí snímané oblasti a přítomností rázové vlny těsně mimo oblast výřezu interferogramu. Jak však autoři dokazují v dalších publikacích, je chyba způsobená zanedbáním této rázové vlny menší než 5% což je vzhledem k běžné přesnosti interferometrických měření zanedbatelná hodnota.

PODĚKOVÁNÍ:

Tato práce je podporována z grantu MSM 124100004 a z projektu LN00A015 MŠMT ČR.

LITERATURA:

- [1] TAKEDA, M., INA, H., KOBAYASHI, S.: Fourier-transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and interferometry. *J. Opt. Soc. Am.* 72, 1981, 1, 156-160
- [2] SLOAN, S.W.: A Fast Algorithm For Generating Constrained Delaunay Triangulations *Computers & Structures*, Vol. 47. (1993).
- [3] OLEJNÍČEK, J.: Calculation of temperature field of barrier discharge in helium by means of holographic interferometry, WDS 2003
- [4] publikováno se svolením autorů: M. PADUCH a K. TOMASZEWSKI, IPPLM, Warsaw, Poland
- [5] W. HAUF, U. GRIGULL: *Optical Methods in Heat Transfer. Heat Transfer IV*, London, Academic Press 1970
- [6] OLEJNÍČEK, J., PÍCHAL, J., BLAŽEK, J., ŠPATENKA, P.: An alternative method of interferogram evaluation and processing, *Czechoslovak Journal of Physics*, Vol. 54 (2004) Suppl. C 349-358
- [7] S. L. JACKSON: *Holographic interferometry on the ZaP Flow Z-Pinch*, University of Washington 2003

KONTAKTNÍ ADRESA:

Jiří Olejníček
Fyzikální ústav AVČR
Na Slovance 2
182 21 Praha 8
telefon: +420 266 05 2127, +420 777 349 890
email: olejn@fzu.cz, jirkuv@email.cz