



بررسی جریان همرفتی ایجاد شده توسط نور لیزر در مایعات به وسیله ی تداخل سنجی

محمد جعفری، روح الله کریمزاده و مسعود قورچی بیگی

دانشکده فیزیک، دانشگاه شهید بهشتی، تهران

چکیده - در این مقاله تحول زمانی پدیده حرارتی همرفت که در اثر عبور باریکه لیزر از محیط مایع ایجاد می شود را مورد مطالعه قرار می دهیم. برای این منظور، نمونه شامل محلول ماده رنگی دای در اتانول را در سیستم تداخل سنجی قرار داده و سپس با استفاده از لیزر پمپ در نمونه جریان همرفتی ایجاد می کنیم. به وسیله ی عکسبرداری از زمان های مختلف تحول سیال، رفتار سیال را بعد از پمپ شدن مورد بررسی قرار داده و با استفاده از آنالیز فوریه و تحلیل هیدرودینامیکی جریان همرفتی، مدلی مناسب برای اندازه گیری پروفایل موضعی سرعت جریان همرفت به دست می آوریم.

کلید واژه- تداخل سنجی، آنالیز فوریه، جریان همرفتی، پاسخ ترمو- اپتیکی

Study of convection heat flow induced by pump laser beam using interferometry

M. Jafari and R. Karimzadeh, M. G. Beygi

Department of physics, Shahid Beheshti University, Tehran

Abstract-In this work we have studied the time evolution of convective field induced by propagation of laser beam through the liquid samples. For this purpose the cell containing the red solution of dye in ethanol is placed in the interferometer setup. Then, the convection heat flow is induced in the sample by 532nm Gaussian laser beam. The profile of the flow velocity is investigated based on the Fourier analysis of the interferogram and hydrodynamic model for the convection current.

Keywords: Interferometry, Fourier analysis, Convective field, Thermo-optical response

۱-مقدمه

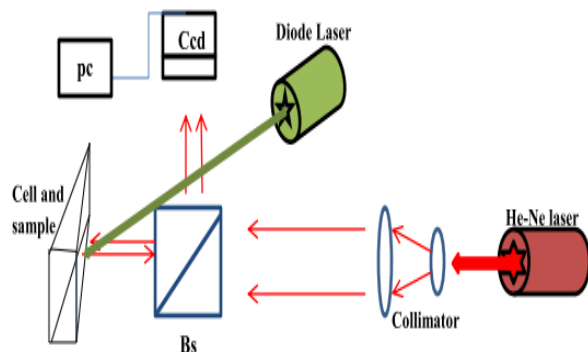
تا کنون از روش‌های متعددی برای مطالعه و بررسی ویژگی‌های اپتیکی و حرارتی مایعات و سیالات استفاده شده است [1,2]. تداخل سنجی روشی سریع و دقیق برای اندازه‌گیری خواص ترمو-اپتیکی ماده و مشاهده‌ی تحول زمانی آن می‌باشد. در تداخل سنجی معمولاً نمونه در یکی از بازوهای تداخل سنج قرار گرفته و سپس با استفاده از لیزر در پاسخ نوری ماده تغییراتی ایجاد می‌شود. این تغییرات اختلاف فازی را در باریکه‌ی کاوش ایجاد می‌کند که با آنالیز آن خواص نوری ماده به دست می‌آید [3,4]. همچنین بررسی جریان همرفتی سیال بعد از پمپ شدن از اهمیت و توجه خاصی برخوردار است. با تحلیل مناسب فریزهای تداخلی می‌توان نمایه‌ی تغییر فاز و در نتیجه تغییر ضریب شکست ناشی از پمپ را با دقت بالا به دست آورد [5,6].

در این کار با استفاده از روش تداخل سنجی جریان همرفتی ایجاد شده در مایع در اثر عبور نور لیزر پمپ، مورد بررسی قرار گرفته است. برای تولید فریزهای تداخلی از چیدمان تداخل سنجی ساده‌ای شامل ظرف کوچک گوه‌ای شکل استفاده شده است. این چیدمان بر خلاف تداخل سنجهای دیگر که از دو بازو تشکیل شده‌اند، به نوسانات و ارتعاشات حساس نمی‌باشد و فضای کمی را اشغال می‌کند. بررسی روی محلول رقیقی از کبالت نیترات ۶ آبه $(\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O})$ در اتانول انجام شده و با تحلیل فریزهای تداخلی و آنالیز هیدرودینامیکی، مدل مناسبی برای اندازه‌گیری پروفایل موضعی سرعت ارائه شده است.

۲-چیدمان تجربی

باریکه‌ی لیزر هلیوم نئون ($\lambda = 632.8\text{nm}$) بعد از موازی شدن از باریکه شکن عبور کرده و به ظرف گوه شکل شیشه‌ای برخورد می‌کند. قسمتی از باریکه از سطح اول ظرف که شیبدار است بازتاب و قسمتی دیگر بعد از عبور از نمونه از سطح دوم بازتاب می‌شود و بعد از بازگشت از محلول با باریکه‌ی اول تداخل می‌کند و طرح تداخلی تشکیل می‌دهد. این طرحهای تداخلی که شامل فریزهای خطی است به دلیل زاویه‌ی ظرف و پیمودن اختلاف راه‌های متفاوت از آن به وجود می‌آیند. تصاویر مربوط به

طرحهای تداخلی ایجاد شده را با دوربین ccd (۲۹ فریم برثانیه) ثبت می‌کنیم (شکل ۱). در این کار، از محلول ماده‌ی رنگی کبالت نیترات ۶ آبه $(\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O})$ در اتانول به عنوان نمونه، استفاده می‌شود. برای ایجاد جریان همرفتی نیز از لیزر دیودی Nd:YVO_4 با طول موج 532nm استفاده می‌شود. ضریب جذب خطی نمونه در طول موج لیزر پمپ (532nm) 0.25m^{-1} اندازه‌گیری شده است. وقتی نمونه در معرض باریکه‌ی لیزر پمپ قرار می‌گیرد، اختلاف فاز موضعی در نمونه ایجاد شده که باعث انحراف فریزهای تداخلی می‌شود.



شکل ۱-چیدمان تجربی آزمایش

۳- نتایج و بحث

تصاویر مربوط به تحول زمانی فریزهای تداخلی بعد از پمپ شدن در شکل ۲ نشان داده شده است. فاصله‌ی هر دو فریم متوالی ۲۵٪ ثانیه است و مشاهده می‌شود که بعد از ۳ ثانیه به یک حالت پایدار می‌رسیم. در زمان $t=0$ پمپ روشن می‌شود. با توجه به تصاویر ثبت شده بعد از شروع پمپ یک توزیع شعاعی و نامتقارن حول منطقه‌ی داغ مرکز پمپ رشد می‌کند که باعث جریان همرفتی در سیال می‌شود، این جریان از داغترین ناحیه به سمت نواحی سرد رو به بالا حرکت می‌کند. با افزایش غلظت ماده‌ی رنگی در محلول و یا با افزایش شدت لیزر پمپ میزان اختلاف فاز ایجاد شده بیشتر می‌شود به طوری که شکل فریزها بیشتر تغییر می‌کند. هنگامی که نور لیزر وارد محیط جاذب می‌شود، گرادیان دمایی متناسب با پروفایل گاوسی شدت لیزر در نمونه به وجود می‌آید، و متناسب با

با تغییر ضریب شکست ایجاد شده تغییر فاز و در نتیجه تغییر شدت طرح تداخلی به صورت زیر بیان می شود:

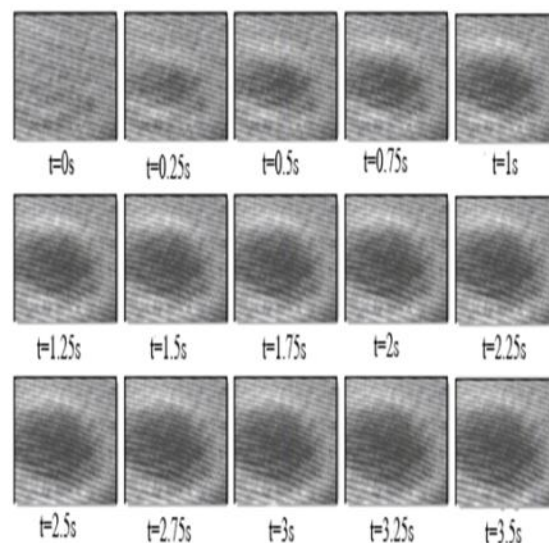
$$I(x,y,z)=I_0 [1+\gamma \cos \Delta\varphi(x,y,z)] \quad (4)$$

$$\Delta\varphi(x,y,z) = \frac{4\pi[n(x,y,z) - n_0]e}{\lambda} \quad (5)$$

که در آن I_0 شدت لیزر هلیوم-نئون، γ نمایانی فریزها، e ضخامت نمونه و λ طول موج لیزر هلیوم-نئون است که برای تشکیل طرح تداخلی از آن استفاده شده است. n_0 و $n(x,y,z)$ نیز ضریب شکست نمونه قبل و بعد از پمپ شدن می باشد. به وسیله آنالیز فوریه دو بعدی اختلاف فاز، $\Delta\varphi$ ، ناشی از باریکه ی پمپ را به دست می آوریم. بدین منظور با انجام تبدیل فوریه دو بعدی بر روی طرح تداخلی و انتقال به فضای فرکانس دو توزیع متقارن نسبت به مرکز به دست می آید. یکی از این توزیع ها را با فیلتر مناسب جدا می کنیم. این کار را بدون در نظر گرفتن لیزر پمپ ($t=0$) و همچنین برای حالتی که لیزر پمپ از نمونه عبور داده شده است انجام می دهیم و با تقسیم نتایج حاصل از تبدیل فوریه ی معکوس برای توزیع فیلتر شده قبل و بعد از اعمال پمپ، اختلاف فاز گرمایی ناشی از اعمال لیزر پمپ را به دست می آوریم [8]. برای مشاهده ی تحول زمانی تغییر فاز، توزیع مکانی اختلاف فاز را در زمانهای ۰/۷۵ ثانیه و ۳/۵ ثانیه به دست می آوریم. (شکل ۳). با در نظر گرفتن اختلاف فاز به دست آمده و پروفایل شدت لیزر پمپ در محل برهم کنش می توان ضریب ترمو-اپتیکی محلول را به دست آورد که مقدار آن $4.5 \times 10^{-4} (K^{-1})$ می باشد. برای محاسبه ی توزیع فضایی سرعت با فرض اینکه حجم ثابت است (مایع محصور است) می توان از رابطه ترمودینامیکی زیر استفاده کرد:

$$pT^{-1} = const \quad (6)$$

با مشتق گرفتن از این رابطه، تغییرات فشار به تغییرات دما مرتبط می شود. با توجه به اینکه تحلیل جریان های دینامیکی سیال در شرایط غیر پایا بسیار پیچیده است و همچنین نمونه ی ما در زمان $t=3s$ به حالت پایا می رسد، به همین دلیل تغییرات فاز را در زمانهای بعد از $t=3s$ بررسی می کنیم. در چنین شرایطی برای سیال



شکل ۲- تحول زمانی فریزهای تداخلی بعد از پمپ شدن توسط باریکه ی لیزر

آن ضریب شکست نیز توزیع فضایی پیدا می کند. این تغییرات باعث می شود که نمونه همانند عدسی رفتار کرده، و نور عبوری از آن را همگرا یا واگرا کند که به اثر عدسی گرمایی معروف است. با توجه به تغییر ضریب شکست، اختلاف راه نوری به وجود آمده را می توان به صورت زیر نوشت [7]:

$$\Delta PL = \frac{dn}{dT} \int_0^L (T(x,y,z) - T_0) ds \quad (1)$$

برای هر فریز تداخلی، اختلاف راه نوری ΔPL ثابت می ماند و می توان نوشت:

$$\int_0^L (T(x,y,z) - T_0) ds = \frac{\Delta PL}{\frac{dn}{dT}} = const \quad (2)$$

انتهال $\int_0^L (T(x,y,z) - T_0) ds$ را می توان به صورت $\bar{T}L$

نوشت که $\bar{T}$ مقدار متوسط $T(x,y,z)$ در راستای عبور پرتوی کاوش از نمونه می باشد. با فرض اینکه جریان گرمایی دو بعدی است و با در نظر گرفتن جذب خطی می توان گفت که در راستای عبور S ، تغییر ضریب شکست در اثر تغییر دما را می توان به صورت زیر نوشت:

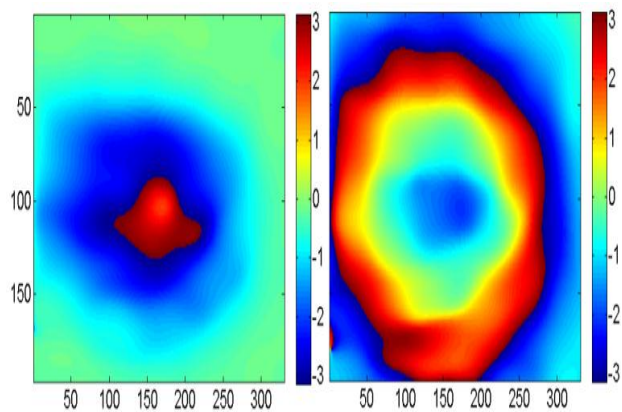
$$\Delta n = \frac{dn}{dT} \Delta T \quad (3)$$

۴- نتیجه گیری

در این مقاله تحول جریان همرفتی سیال بعد از پمپ شدن توسط باریکه‌ی لیزر مورد بررسی قرار گرفت. از آنالیز فوریه دو بعدی برای تحلیل فریزهای تداخلی استفاده شد. نشان داده شد تداخل سنجی می تواند روشی مناسب برای بررسی جریانهای همرفتی سیال باشد.

مراجع

- [1] V. P. KOZICH,* A. MARCANO O.,t F. E. CASTILLO HERNANDEZ, and J. A., *Use of Differential Thermal Lensing to Study Two-Photon Absorption in Solutions*, **APPLIED SPECTROSCOPY** Volume 48, Number 12, 1994
- [2] Young Ho Kim, Seong Jun Park, Sie-Wook Jeon, Seongmin Ju, Chang-Soo Park, Won-Taek Han, and Byeong Ha Lee, Thermo-optic coefficient measurement of liquids based on simultaneous temperature and refractive index sensing capability of a two-mode fiber interferometric probe, **OPTICS EXPRESS** Vol. 20, No. 21 / 23751
- [3] Z. Rafael Escalona, Rosi Carlo pace and time, *characterization of a thermal lens using an interferometric technique*, **Opt. Eng.** 38 (9) (1999) 1591.
- [4] J A P Lima¹, E Marín^{1,3}, O Correa¹, M G da Silva¹, S L Cardoso¹, C Gatts¹, C E Rezende¹, H Vargas¹ and L C M Miranda², *Measurement of the thermal properties of liquids using a thermal wave interferometer*, J A P Lima et al 2000 **Meas. Sci. Technol.** 11 1522
- [5] L. Rodríguez, C. Simos, M. Sylla, A. Marcano, X. Nguyen Phu, *New holographic technique for third-Order optical properties measurement*, **Opt. Commun.** 247 (2005)
- [6] R. Escalona, *Study of a convective field induced by thermal lensing using*, **Optics Communications** 281 (2008) 388–394
- [7] Goldstein. New York: **Hemisphere Publishing Corporation**; 1983(2nd ed. 1999).
- [8] L. Rodríguez, R. Escalona,, **Optics Communications** 277 (2007) 57–62.

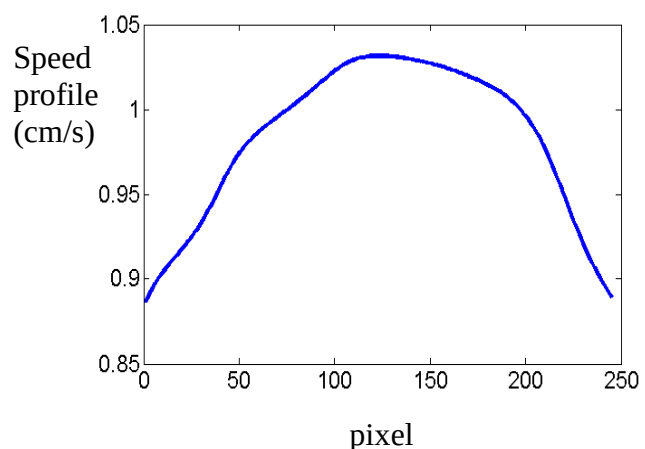


شکل ۳-نمایه ی تغییرات فاز در ثانیه ۰.۷۵ (چپ) و ۳.۵ (راست)

تراکم ناپذیر با جریان آرام میتوان از معادله برنولی استفاده کرد:

$$\frac{1}{2} \rho v^2 + \rho g z + P = \text{const} \quad (7)$$

برای به دست آوردن ثابت معادله ی (۷) می توان از صفر بودن سرعت سیال در ته ظرف استفاده کرد. با توجه به شکل ۳ مقادیر تغییر فاز را در ثانیه ی ۳/۵ برای یک سطر از تصویر که از مرکز پمپ می گذرد به دست آورده و با استفاده از روابط (۳)، (۵)، (۶) تغییرات فشار را به دست می آوریم و به کمک تغییر فشار به دست آمده و استفاده از رابطه ی (۷) می توان تغییرات سرعت را اندازه گیری کرد که در شکل ۴ نشان داده می شود. ملاحظه می شود که بیشترین سرعت جریان همرفتی در مرکز پمپ قرار دارد.



شکل ۴-نمایه ی موضعی سرعت برای یک سطر افقی (پیکسل ۱۰۴) از مرکز پمپ