

PROPAGACJA WIĄZKI ŚWIATŁA LASERA W POWIETRZU O NIEUSTALONYM POLU TEMPERATURY

Katarzyna KLEMM^{*}, Krzysztof PIESZYŃSKI^{**},
Kazimierz ROŻNIAKOWSKI^{***}

^{*} Politechnika Łódzka, Instytut Architektury i Urbanistyki
Al. Politechniki 6, 90-924 Łódź, e-mail: katarzyna.klemm@p.lodz.pl

^{**} Politechnika Łódzka, Instytut Fizyki
ul. Wólczańska 219, 90-924 Łódź, e-mail: kristoff@p.lodz.pl

^{***} Politechnika Łódzka, Instytut Fizyki
ul. Wólczańska 219, 90-924 Łódź, e-mail: roznikaz@lodd.p.lodz.pl

Streszczenie: W pracy przedstawiono teoretyczną analizę oraz wyniki eksperymentalnych badań zagadnienia propagacji laserowej wiązki światła w powietrzu o zmiennym w czasie i przestrzeni polu temperatury.

Słowa kluczowe: Nieustalone pole temperatury, wiązka światła lasera.

1. WSTĘP

Zagadnienie transmisji (oddziaływania) laserowej wiązki światła z materią o zmiennym w czasie i przestrzeni współczynnika załamania jest bardzo ważne w wielu dziedzinach zarówno poznawczych jak i technicznych (materiały kompozytowe [6], tkanka żywa [7], przepływające gazy [8]).

Badania termodynamicznych przepływów są często realizowane metodami optycznymi, ponieważ nie wprowadzają błędów związanych z bezwładnością oraz mają naturę nieinwazyjną. W tych metodach wymienia się zwykle: metody Schlierena [2], interferometryczne [4], interferometrii holograficznej [9] deflektometri Moire [5] oraz fotografii speckli [3].

Obecnie wraz z rozwojem laserów (i zmniejszeniem ich cen) oraz dużych możliwości cyfrowych zapisów sygnałów analogowych, pojawiają się nowe techniczne możliwości optycznych metod badań materii, różnych od tradycyjnych.

W tej pracy proponujemy badania fluktuacji temperatury (współczynnika załamania) suchego powietrza poprzez pomiar fluktuacji natężenia wiązki światła laserowego.

2. PODSTAWY TEORETYCZNE

Teoretyczną zależność współczynnika załamania światła n od gęstości suchego gazu ρ opisuje wzór Lorenza-Lorentza [1], który po prostych przekształceniach (przyjmując dla suchego powietrza $n \approx 1$) można zapisać w postaci:

$$n - 1 \approx \frac{3}{2} c \cdot \text{const}(f) \quad (1)$$

gdzie: c jest gęstością gazu a $\text{const}(f)$ jest współczynnikiem zależnym od częstości światła (długość fali). Korzystając z prawa Cauchy'ego łatwo zauważyć, że gęstość gazu jest funkcją jego ciśnienia i temperatury: apisać w postaci:

$$\rho = \frac{\mu \cdot p}{R \cdot T} \quad (2)$$

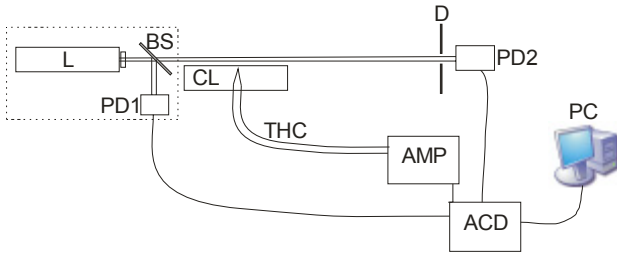
Nietrudno zatem zauważyć, wykorzystując relacje (1) i (2), że względną zmianę współczynnika załamania można zapisać w postaci:

$$\frac{dn}{n-1} = \frac{d\rho}{\rho} = \left| \frac{dp}{p} \right| + \left| \frac{dT}{T} \right| \quad (3)$$

Z równania (3) wynika, że zmiany temperatury w warunkach zbliżonych do normalnych mają znacznie większy wpływ na zmianę współczynnika załamania niż zmiany ciśnienia tego gazu spowodowane przepływami o niewielkich prędkościach (rzędu kilku metrów na sekundę).

3. APARATURA BADAWCZO-POMIAROWA

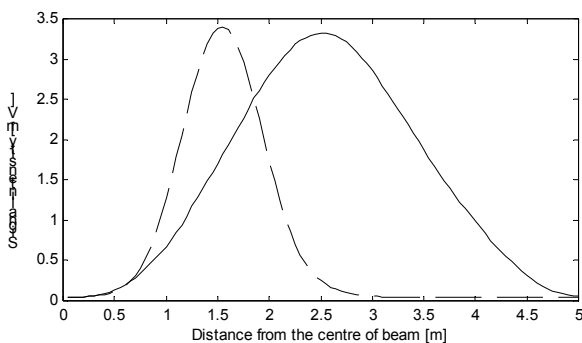
Schemat aparatury badawczo-pomiarowej, stosowanej w tej pracy przedstawiono na rys.1.



Rys.1. Schemat układu badawczo-pomiarowego; L – laser półprzewodnikowy z wbudowanym układem optycznym, PD1 – fotodioda, BS – rozdzielacz wiązki, PD2 – fotodioda wraz z diafragmą D, ACD – przetwornik analogowo cyfrowy z pamięcią, CL – grzałka, THC – termoelektryczny termometr, AMP – amperomierz, PC – komputer.

Fig.1. The diagram of the experimental system: L – diode laser with additional optical system, PD1 – photodiode, BS – beam splitter, PD2 – photodiode with diaphragm, ADC – analog to digital converter with memory, CL – heater, THC – thermocouple, AMP – ammeter, PC – computer.

W tych badaniach jako źródła światła użyto lasera półprzewodnikowego o mocy 14mW, emitującego falę świetlną o długości $\lambda=640\text{nm}$. Ten laser był wyposażony w specjalny układ optyczny, wytwarzający prawie gaussowskie rozkłady natężenia światła w przekroju poprzecznym wiązki (w kierunkach wzajemnie prostopadłych). Na rys. 2 przedstawiono takie rozkłady, zmierzone za pomocą fotodiody PD2, umieszczonej w odległości 50cm od rozdzielacza wiązki BS.



Rys.2. Rozkład natężenia światła w kierunkach wzajemnie prostopadłych emitowanego przez laser L, zarejestrowanego przez fotodiode PD2.

Fig.2. The cross section of light intensity emitting by the laser L in two mutually perpendicular directions (solid and dashed lines respectively), measured by photodiode PD2.

Do detekcji natężenia światła wykorzystano fotodiody typu BPYP17. Jedną z nich PD1 służyła do monitorowa-

nia natężenia światła emitowanego przez laser. Umieszczono ją wraz z laserem L i płytką światłodzielącą BS w jednej, wspólnej obudowie. Natomiast druga, PD2 przed którą bezpośrednio umieszczono przysłonę D o średnicy około 0,1mm, pełniła rolę detektora natężenia światła przechodzącego przez obszar przepływającego powietrza, spowodowanego jego podgrzewaniem za pomocą grzałki CL. Grzałka ta miała kształt walca o długości 20cm i średnicy 3cm. W tych badaniach umieszczono ją pod wiązką światła. Odległość powierzchni bocznej grzałki od środka wiązki laserowej była równa 5mm. Wiązka światła poruszała się w przestrzeni tak, że jej większy wymiar był ustawiony w kierunku pionowym (krzywa ciągła na rys. 2).

Laser L i fotodioda PD2, rejestrująca fluktuacje natężenia światła, w celu ograniczenia drgań mechanicznych, zostały zestawione na wspólnej, masywnej płycie optycznej. Pomiędzy laserem L i fotodiode PD2 przepływał strumień powietrza podgrzewanego grzałką CL. Grzałka, laser i fotodioda nie miały ze sobą bezpośredniego kontaktu mechanicznego, aby wyeliminować ewentualny wpływ drgań na rejestrowane natężenie światła. Odległość między grzałką CL i diafragmą D wynosiła 30cm. W pomieszczeniu w którym ustawiono aparaturę badawczo-pomiarową nie było innych źródeł ciepła, które mogłyby zakłócać przepływ powietrza w obszarze laserowej wiązki.

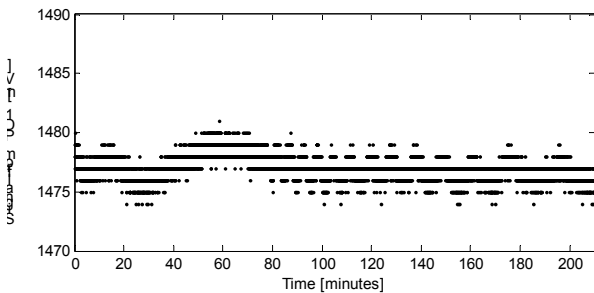
Sygnal elektryczny, wychodzący z fotodiody, spowodowany oświetleniem laserową wiązką, kierowano do 16 bitowego przetwornika analog-cyfra ACD z pamięcią, sterowanego przez komputer PC. Ten układ umożliwiał rejestrację natężenia światła w funkcji czasu (próbkiwanie), w różnych odstępach czasu. W tych badaniach ten czas wynosił 50ms, natomiast czas pomiaru był równy 5 mikrosekund. Możliwe było zarejestrowanie i zapamiętanie, po zastosowaniu specjalnego programu około 32 tysięcy punktów pomiarowych. Po wykonaniu pomiarów zebrane wyniki były przesyłane złączem szeregowym RS232 do komputera PC.

Koncepcja detekcji lokalnych fluktuacji koncentracji powietrza w okolicach przedmiotów zaburzających jego przepływ z wykorzystaniem wiązki światła lasera oparta jest na założeniu, że w takiej sytuacji generowane w powietrzu fluktuacje gęstości są na tyle duże, że znacząco zmieniają przebieg wiązki światła laserowego w stosunku do jej przebiegu, gdy powietrze jest w spoczynku, w równowadze termodynamicznej z otoczeniem.

Ponieważ w rzeczywistości fluktuacje gęstości powietrza nawet w przypadkach przepływów turbulentnych i niewielkich gradientów temperatury są bardzo małe, stąd niezmiernie ważną jest stabilna w czasie i charakteryzująca się niskim poziomem szumów praca całego zestawu pomiarowego. W szczególności lasera i układu detekcji sygnału.

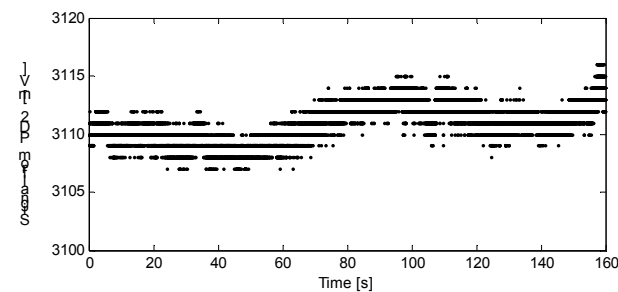
4. WYNIKI BADAŃ

Na rys. 3 i 4 przedstawiono wykresy zarejestrowanych sygnałów z fotodiody PD1 (monitorowanie natężenia światła emitowanego przez laser L, rys.3) i PD2 (rejestracja natężenia światła po przejściu przez warstwę powietrza, rys.4) w zależności od czasu, w przypadku, gdy grzałka CL jest wyłączona, to znaczy powietrze pod laserową wiązką nie jest poddawane wymuszonemu przepływowi oraz nie występują w jej otoczeniu inne źródła ciepła.



Rys.3. Zależność sygnału zarejestrowanego przez fotodiody PD1 w funkcji czasu; średnia wartość sygnału jest równa 1,476mV, natomiast jego średnie kwadratowe odchylenia wynosi 0,667 (dla czasu z przedziału 90÷200min.).

Fig.3. Time dependence of the PD1 photodiode's signal. Mean value of the signal is 1,476mV and its standard deviation equals 0,667mV (at time period 90÷200min.).



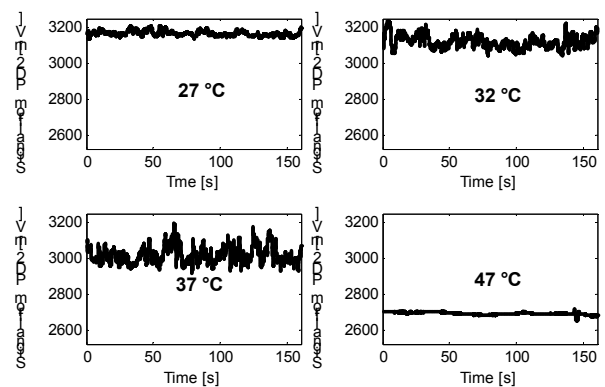
Rys.4. Zależność sygnału zarejestrowanego przez fotodiody PD2 w funkcji czasu, gdy powietrze w otoczeniu laserowej wiązki nie jest podgrzewane; średnia wartość sygnału jest równa 3,11mV, a średnie kwadratowe odchylenie 1,612.

Fig.4. Time dependence of the PD2 photodiode's signal when the air near laser beam was heated. Mean value of the signal is 3,11mV and its standard deviation equals 1,612mV.

Brak wyraźnych różnic w kształcie krzywej górnej i dolnej, na rys.3 i 4 świadczy o tym, że w czasie tego pomiaru fluktuacje gęstości są nieznaczne, lub inaczej mówiąc, w tym układzie eksperymentalnym są nie widoczne.

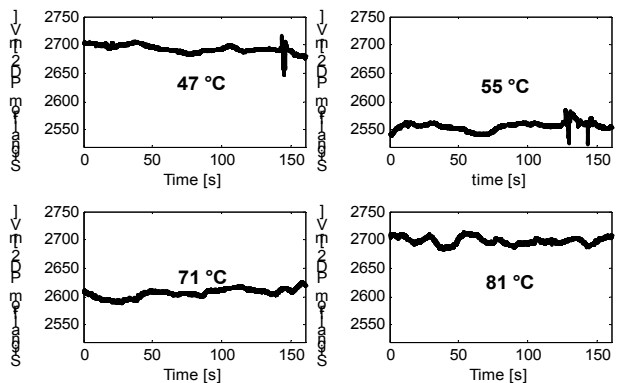
Dyskretny charakter wyników przedstawionych na wykresach związany jest z własnością zastosowanego przetwornika analogowo-cyfrowego. Powyższy fakt oraz to,

że pomiaru dokonywano co 50ms i punkty pomiarowe na wykresie nie są łączone powoduje, że wykresy dają złudzenie niejednoznaczne (linie równoległe). Pionowa odległość pomiędzy tymi liniami opisuje czułość przetwornika analogowo cyfrowego (1mV). Czułość ta jest wystarczająca do przeprowadzenia opisywanych badań. Wartości odchylenia standardowego X_{RMS} wynoszą odpowiednio: 0,993 fotodiody PD1 i 1,612 fotodiody PD2. Pomiary wykonywano po odpowiednio długim czasie od chwili uruchomienia aparatury, koniecznym do jej stabilizacji termicznej.



Rys.5. Zależność sygnałów zarejestrowanych przez fotodiody PD2 w funkcji czasu, dla różnych temperatur grzałki CL.

Fig.5. Time dependence of the PD2 photodiode's signals at different temperatures of the heater CL.



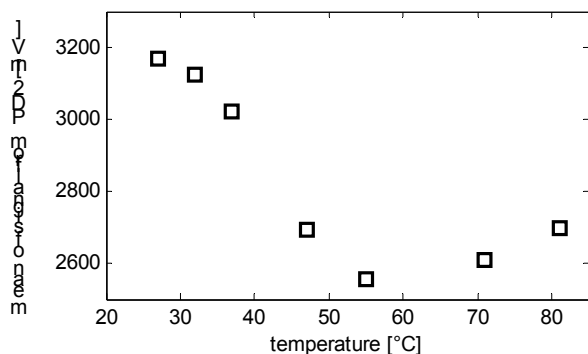
Rys.6. Zależność sygnałów zarejestrowanych przez fotodiody PD2 w funkcji czasu, dla różnych temperatur grzałki CL.

Fig.6. Time dependence of the PD2 photodiode's signals at different temperatures of the heater CL.

Z rys.3 wynika, że ten czas wynosi co najmniej 80 minut. Za pomocą tego układu badawczo-pomiarowego zbadano zjawisko propagacji wiązki światła lasera w powietrzu o zmiennym w czasie i przestrzeni współczynniku załama-

nia. Pomiar przeprowadzono dla ustalonych, różnych temperatur grzałki CL w zakresie od 22°C do 82°C.

Wyniki otrzymanych pomiarów przedstawiono na rys.5,6 i 7.



Rys.7. Zależność średniego napięcia rejestrowanego przez fotodiodę PD2 w zależności od temperatury grzałki CL.

Fig.7.The mean value of PD2 photodiode's signal versus heater temperature.

5. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Z przeprowadzonych badań wyraźnie widać istotne różnice w charakterze fluktuacji natężenia światła, zarejestrowanego przez fotodiodę PD2 w zależności od temperatury grzałki CL. W temperaturach 32°C i 37°C częstość fluktuacji natężenia światła jest znacznie większa niż w temperaturach 47°C i 81°C. Należy zwrócić uwagę na to że wiązka emitowana przez laser najpierw porusza się w ciepłym powietrzu (nad grzałką), a następnie przebywa odległość około 30 cm, gdzie temperatura powietrza jest w przybliżeniu równa temperaturze otoczenia. Zatem w przestrzeni, w której ten ruch się odbywa, występuje przepływ ciepłego powietrza pionowo do góry, natomiast w obszarze podgrzewanym i na granicy tych obszarów ruch powietrza będzie zależał także od temperatury grzałki. Zależność przedstawiona na rys.7 potwierdza fakt, że wiązka laserowa w tej przestrzeni odchyła się w płaszczyźnie pionowej do góry, w przybliżeniu charakter tej krzywej pokrywa się z charakterem krzywej przedstawionej na rys.2 (linia ciągła). Oznacza to, że zmiana współczynnika załamania powietrza nad grzałką jest na tyle duża, że przeważa nad konkurencyjnym procesem w tym obszarze gdzie grzałka nie występuje. Zatem sterowanie temperaturą grzałki i jej rozmiarami a także odległością laserowej wiązki od powierzchni bocznej grzałki może spowodować sterowanie wiązka w przestrzeni.

LASER BEAM PROPAGATION IN THE AIR WITH TRANSIENT TEMPERATURE FIELD

Summary: The work presents short theoretical analysis and the results of experimental examinations of the problem of laser beam propagation in the air with temporal and spatial changes of the temperature field

Literatura

- [1] Born M., Wolf E., *Principles of Optics*, Cambridge Univ. Pr. (1999).
- [2] Devia F., Milano G., Tanda G., *Exp. Thermal Fluid Sci.*, 8 (1994).
- [3] Fomin N.A., *Speckle Photography for Fluid Mechanics Measurements*, Springer-Verlag, Berlin 1998.
- [4] Hauf W. Grigull U., *Adv. Heat Transfer* 6 (1970) p.133.
- [5] Keren E., Bar-Ziv E., Glatt I., Kafri O., *Appl.Opt.* 20 (1981) p.4263.
- [6] Marcelo J.S. de Lemos, *Turbulence in porous media, Modeling and Applications*, Elsevier, Amsterdam, Boston, Heidelberg, 2006.
- [7] *Optical-Thermal response of laser-Irradiated Tissue*, Plenum Press New York and London 1995.
- [8] Pieszyński K, Roźniakowski K, Klemm K, Klemm P., *Scientific Bulletin, Tech. University Łódź* 2005, No 973 ser. Physics Vol. 25, pp.47-52.
- [9] Vest C.M., *Holographic Interferometry*, Wiley, New York, 1979.