

## TENDENCJE I PROBLEMY METROLOGII PRZEMYSŁOWEJ - NA PRZYKŁADZIE FOTONIKI (POMIARÓW LASEROWYCH)

*Koherentna wiązka fotonów staje się coraz to bardziej popularna w pomiarach przemysłowych różnych wielkości fizycznych. Pomiary laserowe (jako część fotoniki) rozwijają się w szybkim tempie, ale fotonika jako przemysł napotyka na coraz większe trudności ze względu na niski poziom automatyzacji i standaryzacji. Kształtowanie i zastosowanie trzech różnych wiązek fotonów jest omawiane w oddzielnych punktach referatu: mikrowiązka laserowa w pomiarach opartych na zjawisku Dopplera, wiązka zogniskowana stosowana w pułapkowaniu laserowym, oraz wiązka pojedynczych fotonów i jej możliwości.*

## TENDENCES AND PROBLEMS OF INDUSTRIAL METROLOGY – BASED ON THE PHOTONICS (LASER METROLOGY)

*The beam of coherent photons gradually attracts more attention of scientific world in its application in „industrial metrology” of various physical quantities. Laser metrology (as a part of photonics) is doing very well, but photonics as an industry is facing a lot of problems concerning the lack of advanced automation and standarization. The formation and application of three different photon beams are discussed in separate sections: narrow laser microbeam in Doppler-effect based measurements, focussed beam used in laser trapping, single photon beam and its prospects.*

### 1. WPROWADZENIE

Zależnie od szkoły, wieku, środowiska przyzwyczajani byliśmy do różnych „metrologii”. Nawet w ramach jednej uczelni dzielono „tort metrologiczny” na: metrologię przemysłową, energetyczną, warsztatową, techniczną, optyczną, długości i kąta, geometryczną, a zastępując słowo metrologia miernictwem uzyskiwano dodatkowe kawałki, takie jak, miernictwo elektryczne, miernictwo elektryczne wielkości nieelektrycznych, radiometryczne, wilgotności, wysokonapięciowe, ...i mnóstwo innych. Podziały te są zwyczajowe, a więc sztuczne. Jedynie co rzeczywiście można wyróżnić w metrologii to wykorzystywane zjawiska fizyczne, metody pomiarowe i ewentualnie wielkości fizyczne. Nie dzielimy metrologii, trzeba raczej dążyć do jej pełnej integracji. Znakomitym przyczynkiem było oparcie jednostki długości na prędkości światła, a pomiaru długości na interferometrze laserowym. Decyzja ta praktycznie scałiła pomiary długości, kąta, czasu, częstotliwości. Teraz należy tylko czekać aż zapadnie decyzja rezygnacji z obecnie obowiązującej definicji jednostki masy, zastępując ją np. pewną liczbą atomów danego pierwiastka, lub zjawisku fizycznym.

Jedynie słusznym kierunkiem jest sięganie granic rozdzielczości w oparciu o cząstki elementarne i zjawiska fizyczne. Tą drogą idzie nanometrologia, z jej poddziedziną – pomiarami laserowymi. Na cząstkach (niekoniecznie elementarnych) opiera się już wiele pomiarów: wszelkie pomiary elektryczne, defektoskopia, pomiary optyczne (w tym długości, kąta, pomiary termodynamiczne, zanieczyszczeń, ...).

Tendencje rozwojowe w metrologii wygodnie jest prześledzić na przykładzie fotoniki i jej najnowszych zastosowań w pomiarach „przemysłowych” takich jak pomiary długości, kąta, przepływu, ciśnienia, struktury powierzchni, zliczania cząstek, czy wad materiałowych. Zostaną one poprzedzone rozważaniami dotyczącymi perspektyw fotoniki - jako gałęzi przemysłu w aspekcie automatyzacji i standaryzacji.

Techniki laserowe charakteryzują się tym, że sygnał użyteczny ma postać łatwą do przetworzenia na sygnał cyfrowy (częstotliwość lub liczba impulsów). Ułatwia to znacznie zaimplementowanie technologii inteligentnych przetworników pomiarowych i umożliwia wyeliminowanie błędów przetworzenia analogowo-cyfrowego. Techniki te mają charakter interdyscyplinarny, integrują wiele najnowocześniejszych technologii i technik pomiarowych, a przedstawione zastosowania mają charakter przykładowy. Np. opisana w p.6 technika zliczania pojedynczych fotonów może być stosowana także do pomiarów mikrogeometrii powierzchni czy mikrowad powierzchniowych, a metoda pułapkowania laserowego (p.5) może znaleźć zastosowanie w biomedycynie do zliczania i segregacji cząstek w płynach organicznych lub krwi, natomiast stosowane w p.7 mikrointerferometry są uniwersalnym narzędziem pomiarowym w większości wielkości fizycznych.

## 2. PERSPEKTYWY FOTONIKI [1,2,3]

Wiek XXI przyniósł ogromne zainteresowanie fotoniką - dziedziną rozwijającą się lawinowo ale bezładnie - bez strategii i zasad, z ogromnym marnotrawstwem środków i zbytym zaangażowaniem siły roboczej.

Fotonika, a szczególnie jej dziedzina laserowa, stanowi ogromny potencjalny obszar zastosowań dla automatyzacji i pomiarów. I o ile w pomiarach już istnieją pewne osiągnięcia, o tyle automatyzacja jest dopiero w fazie przedwstępnej. Sytuacja taka istnieje także na najbardziej rozwiniętym rynku fotonicznym - USA.

Ostatnie analizy wykazują, że tylko 15-25% tych wyrobów fonicznych jest montowanych i pakowanych automatycznie (US Bancorp Piper Jaffray), a National Institute of Standards and Technology szacuje, że 60-80% kosztu tych urządzeń jest udziałem kosztów montażu i pakowania.

Aby obronić swoje pozycje, firmy foniczne muszą się szybko integrować i automatyzować. Przykładem wymuszonej integracji były już lata 80-te, kiedy to okazało się, że udział japońskich wyrobów na rynku obwodów scalonych, stał się daleko większy niż zakładano. Powołano konsorcjum Sematech (zrzeszające 14 największych firm amerykańskich), które wraz z Departamentem Obrony US przedstawiło plan „konstruktywnej kooperacji”, m.in. opracowano procedury sprawdzania i wzorce dla poszczególnych etapów procesów produkcyjnych i pakowania dla dostawców urządzeń automatyki. Dostawcy ci twierdzą obecnie, że fotonika potrzebuje natychmiast analogicznych posunięć, ale dla wielu drobniejszych firm (takich jak wytwórców CCD, czy innych sensorów obrazu) rynek nie jest tak duży, by usprawiedliwiać ogromny wydatek (rzędu kilkuset milionów dolarów) na opracowanie od podstaw specjalnych urządzeń automatyki. Trzeba także wziąć pod uwagę koszty szczególnych zabezpieczeń z uwagi na toksyczność niektórych procesów technologicznych oraz bardzo wysokie wymagania dokładności (np. przy łączeniu włókien

optycznych, których średnice rdzenia wynoszą kilka mikrometrów, tylko  $0,5\mu\text{m}$  niewspółosiowość zmniejsza moc o ponad 30%; procesowi temu towarzyszą specjalne procedury zdejmowania powłoki, przełamywania, czyszczenia i polerowania).

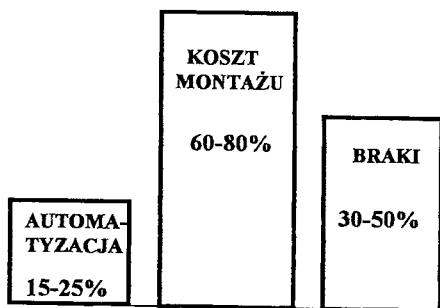
Zwykle nieskomplikowane operacje pakowania, w fotonice często oznaczają konieczność uszczelniania i izolowania wyrobów. Nie zachowanie tych procedur może znacznie zmniejszyć czas ich życia.

Istnieje jeszcze, nie mniej ważny aspekt społeczny, który spowalnia proces automatyzacji. Znakomicie charakteryzują tę sytuację wypowiedź Jozefa Strausa (z JDS Uniphase Corp): „...ma się do czynienia z ludźmi „półprzewodnikowymi” posiadającymi lata praktyki i z akademikami z którymi wspinali się dyskutuje.

Produkty fotoniki są zwykle bardzo „świeże”, jedo-, może dwuletnie. Najczęściej opracowane zostały przez fizyków i metrologów w laboratoriach. Firmy produkcyjne starają się przejąć te opracowania jak najszybciej, najczęściej po prostu powielając je. Ale fizycy i metrologowie posługiwali się sprzętem laboratoryjnym, mikroskopami i pozycjonerami (często z ręcznym napędem), a wszystkie etapy były następnie cierpliwie sprawdzane laserowo.

Montażysty w firmach nie są fizykami i nie pracują w laboratoriach. Ich umiejętności są inne, podobnie jak narzędzia, którymi się posługują. W rezultacie poziom braków sięga 30-50% wyrobów (o cenach jednostkowych 1000-3000\$). Widać wyraźnie, że przechodząc do tańszej robocizny można oszczędzić pieniądze na pensjach ale nie na brakach.

Wynagrodzenie ma mniejsze znaczenie niż ludzki potencjał, ale można osiągnąć taki stan, gdy nie da się już zwiększyć produkcji czy jakości za pomocą typowych zabiegów, niezależnie od tego jak pracownicy są wysoko wyszkoleni i poświęceni pracy. Poziom braków rzędu 0.0001% jest niemożliwy do osiągnięcia. Na szczęście klienci (np. szybkiej komunikacji) jeszcze nie domagają się  $10^{-6}$  poziomu istotności jakości wyrobów, ale to tylko dlatego, że istnieje na nie ciągle ogromny popyt. Jednak jak tylko rynek stanie się rynkiem nabywców, co pewnie nastąpi wkrótce, żądania jakości pójdą w górę, a ceny gwałtownie spadną.



Rys. 1. Przemysł fotoniczny – stan obecny

Krag problemów się zamyka, przemysł fotoniczny chwieje się pod własnym ciężarem. Ludzie zatrudnieni przy produkcji komponentów i modułów desperacko poszukują rozwiązań sprzętowych, ale sami wytworzyli takie bariery technologiczne i strukturalne, że są one nie do przejścia dla projektantów i dostawców automatyki. Istnieje wyraźny brak właściwej infrastruktury wyposażeniowej. Automatyzacja zwiększa koszty do 90% ale powiększa produkcję 10-20 razy. Zastąpienie każdego pracownika urządzeniem - to oszczędność.

Tylko na wyposażeniu jednego stanowiska pracy oszczędza się 30000-100000\$ (są to koszty źródeł światła, detektorów, mierników mocy, itd.) i nawet jeśli firma przenosi się w miejsce o bardzo taniej robociznie, jest to opłacalne.

Przemysł fotoniczny ma teraz te same problemy co kiedyś przemysł półprzewodnikowy: brak integracji, automatyzacji i normalizacji.

Wygląda więc na to, że jedynym wyjściem jest zdecydowana automatyzacja ale poprzedzona standaryzacją. Jak na razie, części optyczne są niestandaryzowane. Główne dlatego, że zmieniają się one bardzo dynamicznie z technologicznego punktu widzenia. Procedury

sprawdzania i montażu opracowane dla jednego typu lasera mogą być nieodpowiednie dla innego.

Powoli rodzą się wzorce optyczne ale budzą one klasyczny sprzeciw ludzi z sektora produkcyjnego. Przykładem jest ISO Standard 10110 - „Optyka i przyrządy optyczne, przygotowanie dokumentacji (rysunków) dla elementów i systemów optycznych” i dotyczy kształtu i struktury powierzchni optycznych. Zakłada on zastosowanie interferometrii (najlepiej cyfrowej) do tolerowania kształtu powierzchni i profilometrię opartą na AFM do analizy chropowatości powierzchni. Powierzchnie zwierciadlane należy określać za pomocą średniej kwadratowej chropowatości, kwantyfikacji mikrodefektów lub funkcją mocy gęstości spektralnej.

Ale przecież AFM nadają się tylko do pomiaru powierzchni supergładkich, pokrywają obszar zaledwie kilku mikrometrów i trzeba powtarzać pomiary w wielu miejscach. Nic dziwnego, że tego rodzaju wymagania budzą sprzeciw szeregowych pracowników kontroli technicznej. Protestują przeciw tendencji definiowania zbyt złożonych wzorców i uważają, że teorię należy zawrzeć w załączniku, natomiast program komputerowy powinien wykonać wszelkie obliczenia matematyczne i wyrazić tolerancje za pomocą wielkości funkcjonalnych. Żądają przybliżenia i wyjaśnienia obowiązujących zaleceń i bezradnie pytają co robić z tymi niezidentyfikowanymi parametrami, których się nie czuje i nie rozumie. Uważają, że np. wady powierzchniowe: rysy, zagłębienia i kilkadziesiąt innych parametrów, są mierzone dla ich fizycznych właściwości, a nie dla uzyskania rezultatu jaki daje światło rozproszone. Ponadto, dyskusja dotycząca tych parametrów trwa już dekady i ciągle jest bezowocna.

Ogromne środki finansowe są marnowane ze względu na wady powierzchni optycznych, które nie są istotne na poziomie systemowym, a więc nie wpływają na działanie. Wyroby są projektowane i produkowane dla zadowolenia użytkownika. Tylko realistyczne specyfikacje pozwolą na wytwarzanie najbardziej ekonomiczne.

Jest to w skrócie obraz obecnego stanu przemysłu fotonicznego w szeroko pojętym aspekcie metrologii i automatyzacji. Widać wyraźnie, że pomimo szybkiego rozwoju, jego przyszłość maluje się niepewnie. Najbardziej prawdopodobny scenariusz to przejście wielu czołowych firm fotonicznych przez silnego „partnera”, takiego jak np. INTEL. Obecny INTEL nie zna się na fotonach, gdyż koncentruje się na „elektronice” ale jeśli tylko rynek wymusi na INTELu (i innych, podobnych firmach półprzewodnikowych) zwrot w stronę fotoniki, ich doświadczenie w zakresie pomiarów, automatyki i ich infrastruktura zgniecie nawet największe obecnie firmy fotoniczne.

### 3. CZĄSTKI - PARAMETRY, WYTWARZANIE, DOZOWANIE

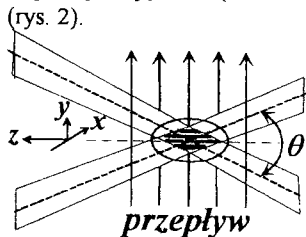
Wykorzystanie wyłącznie wiązki fotonów jako narzędzia pomiarowego, bądź jako nośnika informacji należy nawet w fotonice do rzadkości. Zwykle wykorzystuje się też i inne cząstki (drobiny), jako pomocnicze, do wzmocnienia sygnału pomiarowego.

Problem wpływu ilości i rozmiarów tych drobin nie był w dotychczasowych publikacjach analizowany. W anemometrii laserowej zdarza się, że ich zawartość w medium wystarcza do wytworzenia silnego sygnału dopplerowskiego, jednak z uwagi na ogromną różnorodność cząstek i często ich destruktywny wpływ na sygnał zwykle medium jest poddawane filtracji, a następnie dozowaniu drobin o znanych parametrach. Podobnie jest w pomiarach opartych na wykorzystaniu metody zliczania fotonów, gdzie pomiar liczby fotonów rozproszonych na poruszających się cząstkach tworzy sygnał pomiarowy. Natomiast w metodzie pułapkowania odpowiednio dobrana cząstka, uchwycona przez wiązkę laserową

doznaje odchyżeń od położenia osiowego zależnie od gradientu temperatury, lepkości czy przepływu.

### 3.1. Rozpraszanie światła. Efekt Dopplera

Uproszczona interpretacja interferometryczna techniki dopplerowskiej zakłada, że dwie przecinające się w swoich przewężeniach, koherentne, płaskie wiązki światła tworzą w wspólnej objętości (obszar pomiarowy) układ równoległych prążków interferencyjnych (rys. 2).



Rys. 2. Zasada pomiaru.  
Obszar pomiarowy

W obszarze tym powstaje strefa prążków interferencyjnych o stałej zależności od długości fali lasera  $\lambda$  oraz kąta przecinania się wiązek  $\theta$ .

Składowa dopplerowska częstotliwości  $f_D$  pojawia się w wyniku towarzyszącego przepływowi przemieszczania się cząstek zawartych w medium przez strefę prążkową. Jest ona wprost proporcjonalna do prędkości cząstek  $v_y$ :

$$f_D = \frac{2v_y}{\lambda} \sin \theta / 2 \quad (1)$$

Rejestracja tego zjawiska na cząsteczkach np. powietrza jest jednak bardzo złożona, a rozproszone na nich światło jest z trudem rejestrowane przez najczulsze nawet fotodetektory, a stosunek sygnału do szumów jest wysoce niekorzystny. Pomiar taki nie jest niemożliwy. Nieliczne publikacje z ostatnich lat np. [4] wskazują na wzrastające zainteresowania tą metodą. Jednakże aparatura pomiarowa do rejestracji rozproszenia Rayleigh'a wymaga zestawu bardzo drogich urządzeń, a uzyskane do tej pory wyniki mają charakter jakościowy.

Efekt Dopplera jest dopiero dobrze widoczny na domieszkowanych cząstkach o wymiarach porównywalnych z długością fali lub większych. Domieszkowanie powinno spełniać następujące warunki metrologiczne:

- wymiar drobin i ich ilość w jednostce objętości powinna być dopasowana do pola prążkowego,
- masa drobin powinna być jak najmniejsza,
- drobin nie powinny wprowadzać zakłóceń przepływu, zmieniać składu chemicznego mierzonego ośrodka, powinny być obojętne i spełniać wymagane warunki czystości, a ich zastosowanie powinno być uzasadnione ekonomicznie.

Cząsteczki powinny w wydajny sposób rozpraszać światło. Stąd ważne jest aby charakteryzowały się odpowiednim współczynnikiem rozpraszania światła  $C_{scat}$ , definiowanym jako stosunek mocy rozproszonej do natężenia światła padającego na jednostkę powierzchni (2):

$$C_{scat} = \frac{P_s}{I_0} \quad (2)$$

Rząd wielkości  $C_{scat}$  dla cząstek o rozmiarach rzędu pojedynczych mikronów jest równy  $10^{-12} [m^2]$ . Wynika stąd, że zbyt wysoka koncentracja cząstek może powodować spadek jakości modulowanego sygnału.

Cząstki mniejsze i słabiej rozpraszające mogą być rozmieszczone gęściej bez znaczącego wpływu na jakość sygnału (może nastąpić wzrost składnika DC sygnału). Jednakże koncentracja dużych cząstek powinna być sprowadzona do minimum nawet jeżeli nie zaburzają mocy sygnału dopplerowskiego.

### 3.2. Charakterystyka cząstek

Najbardziej typowym, a jednocześnie bardzo trudnym medium pomiarowym jest powietrze. Powietrze atmosferyczne zawiera różnorodną materię w postaci cząstek w zależności od regionu. Ich skład ulega znacznym zmianom na wskutek działalności człowieka. Źródłem zmian są operacje przemysłowe, transport lądowy, morski i powietrzny; dystrybucja i przewóz bogactw naturalnych i produktów przetworzonych, a także wszystkie działania zmierzające do tworzenia i zachowania środowiska. Naturalnymi źródłami zanieczyszczenia są zachodzące w środowisku ziemskim procesy fizyczne i biologiczne; unoszenie z gleby pyłów i minerałów, popiołów z erupcji wulkanicznych, kryształów soli z powierzchni olbrzymich zbiorników wodnych i pyłków zarodników roślin (niektóre z nich są bardzo długo-trwałe, np. pyły z wulkanu Krakatau, erupcja w 1883 r., ciągle jeszcze opadają na ziemię [5]).

Poziom zanieczyszczenia środowiska jest zróżnicowany w zależności od obszaru geograficznego i sprawności stref ochronnych. Algorytmy do wyznaczania tego poziomu są bardzo złożone; wiele równań znaleźć można w [6,7]. Na podstawie tych zależności przeprowadzono szereg przykładowych obliczeń dla prędkości opadania i odchylenia prędkości kropelek wody o różnych średnicach.

Prędkość opadania maleje w przybliżeniu z kwadratem średnicy cząstki a proporcjonalnie rośnie z jej gęstością. Cząstki - krople wody o średnicy 40  $\mu\text{m}$  opadają 50 mm/s zaś 10  $\mu\text{m}$  opadają 3 mm/s, 1  $\mu\text{m}$  - 35  $\mu\text{m/s}$ , a 0.1  $\mu\text{m}$  - 0.87  $\mu\text{m/s}$  - praktycznie nie opadają. Ruchem cząstek submikronowych rządzą rosnące odwrotnie proporcjonalnie do średnicy cząstek siły elektrostatyczne (oraz dyfuzja).

### 3.3. Klasyfikacja czystości powietrza ISO 14644 -1 i FED STD 209E (kontrolowanego)

Na potrzeby czystych pomieszczeń (cleanrooms) wprowadzono ograniczenia ilości cząstek w jednostce objętości powietrza. Najbardziej znaną normą jest federalna norma amerykańska 209, w której numer klasy odpowiada zawartości cząstek o rozmiarach  $>0.5 \mu\text{m}$  w jednej stopie sześcienną powietrza. Na przykład klasa 100 to powietrze o zawartości cząstek o wymiarach  $>0.5 \mu\text{m}$  w ilości nie większej niż 100 cząstek w 1 stopie sześcienną.

Klasy czystości powietrza, poza ilością cząstek o rozmiarach  $>0.5 \mu\text{m}$ , narzucają ograniczenia ilości cząstek o innych rozmiarach (od 0.1  $\mu\text{m}$  w klasach 1 do 6 oraz  $>5 \mu\text{m}$  powyżej 5-tej). Powietrze zawierające więcej niż 35.2 mln cząstek  $>0.5 \mu\text{m}$  czy 293 tys.  $>5 \mu\text{m}$  w jednym metrze sześciennym uważane jest za poza klasowe co nie oznacza, że nie są to przypadki spotykane w praktyce. Przeciwnie, wszędzie tam, gdzie powietrze nie jest oczyszczane można spodziewać się czystości pozaklasowej. Przechodząc na skalę mikro, klasie ISO 5 odpowiada objętościowa zawartość cząstek nie większa niż ok. 1 tysięczna część na milion tzn. 0.001 ppm, a wagowa rzędu 1 ppm, a więc 1  $\mu\text{g}$  w 1  $\text{m}^3$  powietrza! Takie ilości są oczywiście nie zauważalne gołym okiem. Natomiast w wiązce laserowej o średnicy 1 mm można spodziewać się na odcinku 1 m kilku (ok. 7) cząstek  $>1 \mu\text{m}$  - w klasie ISO9.

Pomiary czystości powietrza dokonuje się najczęściej optycznie automatycznymi licznikami cząstek APC (Optical Particle Counter) skalibrowanymi cząstkami wzorcowymi.

### 3.4. Nebulizatory, próbki wzorcowe

Wiodącymi ośrodkami w badaniach nebulizatorów różnych typów są: NASA, John F. Kennedy Space Center (KSC) and the University of Arkansas at Little Rock (UALR). Uzyskane w tych ośrodkach wyniki [8] dowodzą, że najbardziej ekonomicznymi generatorami

Tab. 1. Szczegółowe wymogi ujęte normą ISO 14644-1 odnośnie dopuszczalnej liczby cząstek o wymiarach większych niż wskazany w  $\mu\text{m}$  w  $\text{lm}^3$  powietrza w klasach 1 do 9.

klasa	liczba cząstek w metrze sześciennym wg wymiarów w $\mu\text{m}$					
	0.1 $\mu\text{m}$	0.2 $\mu\text{m}$	0.3 $\mu\text{m}$	0.5 $\mu\text{m}$	1 $\mu\text{m}$	5 $\mu\text{m}$
ISO 1	10	2				
ISO 2	100	24	10	4		
ISO 3	1,000	237	102	35	8	
ISO 4	10,000	2,370	1,020	352	83	
ISO 5	100,000	23,700	10,200	3,520	832	29
ISO 6	1,000,000	237,000	102,000	35,200	8,320	293
ISO 7				352,000	83,200	2,930
ISO 8				3,520,000	832,000	29,300
ISO 9				35,200,000	8,320,000	293,000

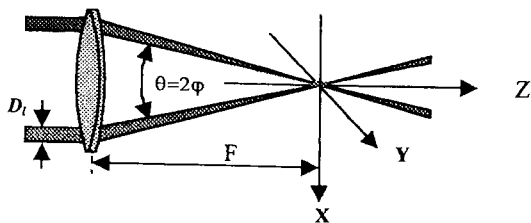
cząstek wzorcowych o wymiarach 0.1 do 7  $\mu\text{m}$  są nebulizatory napełniane wodnymi mieszaninami kulistych lateksów. Cechą lateksów jest ciężar właściwy zbliżony do ciężaru właściwego wody przez co trudno się osadzają tworząc w niej trwałą zawiesinę. W podobny sposób mogą być tworzone aerozole polidispersyjne z innych zawiesin nie tylko cząstek kulistych lub wręcz sam aerzol wodny. Stabilność koncentracji po zoptymalizowaniu warunków pracy nebulizatora jest wysoka (zmiany mniejsze od 5%) nawet w ciągu kilku godzin pracy. Rozmiar cząstek określony jest przez średnicę cząstek (zawiesin). W przypadku cząstek o różnych rozmiarach trzeba liczyć się z segregacją wymiarową wprowadzaną przez nebulizator zależnie od jego konstrukcji i ciśnienia zasilania. Regulując ciśnienie zasilania zmienia się rozkład wymiarowy i koncentracja cząstek. Ponadto cząstki większe o rozmiarach  $>10\mu\text{m}$  mają tendencję do osiadania. Cząstki o wymiarach znacznie mniejszych od 0.1  $\mu\text{m}$  łatwo przylegają do ścianek. Nebulizatory pneumatyczne są stosunkowo niedrogie i łatwe w użyciu w odróżnieniu od generatorów kondensacyjnych czy innych.

Do badań opisanych w dalszej części referatu przygotowano próbki wzorcowe cząstek do zbadania wpływu ich koncentracji i rozmiarów na sygnał. Próbki te wykonywano z dostępnych materiałów: lateksów monodispersyjnych 0.742  $\mu\text{m}$ , 6  $\mu\text{m}$ , 14  $\mu\text{m}$ , 20  $\mu\text{m}$  47  $\mu\text{m}$ , pyłów wzorcowych (pyły *PTCD* i *ACCTD*) i szklanych kulek – polidispersyjnych (kulki szklane i mikrosfery szklane).

#### 4. DOPPLEROWSKI ANEMOMETR LASEROWY

##### 4.1. Układ optyczny, przetworzenie sygnału

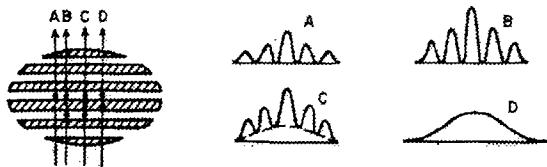
W anemometrze laserowym, do wytworzenia pola prążkowego w obszarze pomiarowym, światło zostaje podzielone na dwie wiązki o jednakowej intensywności i skupione w określonym punkcie przepływu (rys. 3).



Rys. 3. Tworzenie obszaru pomiarowego

Pole prążkowe (rys. 2), powstające w wyniku nałożenia się wiązek (rys. 3) ma decydujący wpływ na parametry sygnału pomiarowego. W rzeczywistości ma ono kształt elipsoidy (tab. 2) z przestrzennym rozkładem natężenia światła ograniczonym punktami, w których rozkład natężenia światła jest większy od 1/e swojej maksymalnej wartości. Ze względu na występującą znaczną ilość czynników wpływowych, wyznaczenie wymiarów elipsoidy odbywa się zwykle eksperymentalnie; otrzymuje się wtedy lepsze ich przybliżenie.

Składowa dopplerowska częstotliwości pojawia się w wyniku towarzyszącego przepływowi przemieszczania się cząstek zawartych w medium przez strefę prążkową. Pojedynczej cząstce o optymalnej wielkości i kształcie, przechodzącej przez obszar pomiarowy odpowiada sygnał jak na rys. 4a.



Rys. 4. Kształt sygnału dla różnych przebiegów cząstek przez pole prążkowe

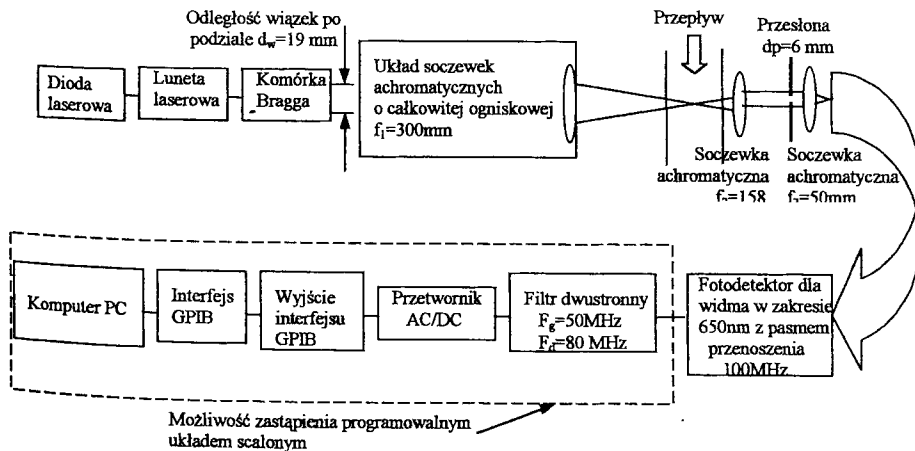
Sygnały pochodzące z dwóch takich samych cząstek interferują konstruktywnie jeżeli odległe są od siebie o odległość międzyprążkową (rys. 4b). Gdy jednak sygnały są w przeciwfazie to może dojść do sytuacji kiedy modulacja sygnału będzie zerowa i w związku z tym niemożliwe będzie określenie poszukiwanej prędkości (rys. 4d). Rys. 4c przedstawia sytuację kiedy dwie spośród 3 cząstek znajdują się w przeciwfazie. Wynika stąd, że zbyt wysoka koncentracja cząstek może powodować spadek jakości modulowanego sygnału.

Cząstki mniejsze i słabiej rozpraszające mogą być rozmieszczone gęściej bez znaczącego wpływu na jakość sygnału. Jednakże koncentracja dużych cząstek powinna być sprowadzona do minimum nawet jeżeli nie zaburzają mocy sygnału dopplerowskiego.

Praktycznie za pomocą anemometru dopplerowskiego można dokonywać pomiarów gęstości cząstek w płynach mierząc liczbę zaburzeń pola wywołaną przebiegającymi cząstkami w określonym czasie rejestracji przebiegu.

## 4.2. Układ pomiarowy

Zbudowany układ pomiarowy jest pokazany na rys. 5. Doświadczenia wykazały, że układ



Rys. 5. Układ pomiarowy LDA

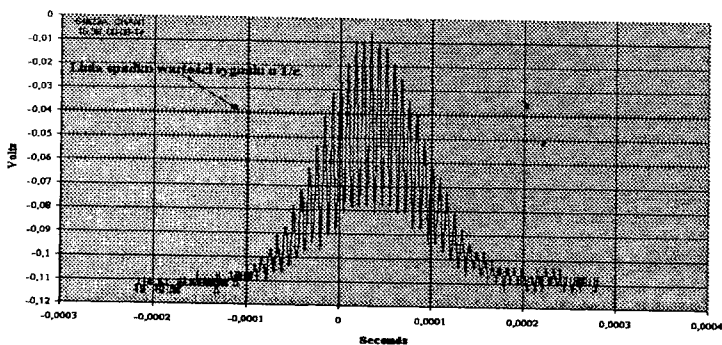


umożliwia poprawną detekcję i analizę wyników. Jak wykazuje zamieszczony na Rys.6, przykładowo, wynik z cząstkami 3,2 $\mu\text{m}$ , sygnał czasowy jest prawie identyczny z teoretycznymi przewidywaniami (tab. 2).

Tabela 2. Optymalizacja parametrów układu

Parametry:	
Ogniskowa soczewki $f_1$ [m]	3,64E-01
Średnica wiązki lasera $d_1$ [m]	2,00E-03
Powiększenie lunety laserowej E	1,00E+00
Długość fali $\lambda$ [m]	6,33E-07

Odległość wiązki po podziale $d_1$ [m]	Kąt przecięcia się wiązki $\alpha$ [rad]	Kąt przecięcia się wiązki $\alpha$ [rad]	Liczba prążków w obszarze pomiarowym $N_{(z=1)}$	Liczba prążków widziana przez detektor $N_{pb}$	Odległość między prążkami $d_2$ [mm]	Zalecana średnica cząstek $d_p$ [mm]	Parametry geometryczne obszaru pomiarowego		
							Długość	Szerokość	Wysokość
1,00E-02	0,015735	0,78690	6,37	5,09	23,036	5,759023	1,07E-02	1,47E-04	1,47E-04
1,10E-02	0,015109	0,86367	7,09	5,66	20,942	5,215579	9,91E-03	1,47E-04	1,47E-04
1,20E-02	0,014482	0,94435	7,64	6,11	19,198	4,759385	8,98E-03	1,47E-04	1,47E-04
1,30E-02	0,013855	1,02303	8,23	6,62	17,721	4,439308	8,21E-03	1,47E-04	1,47E-04
1,40E-02	0,013228	1,10171	8,91	7,13	16,456	4,135961	7,63E-03	1,47E-04	1,47E-04
1,50E-02	0,012601	1,18038	9,25	7,64	15,319	3,839801	7,12E-03	1,47E-04	1,47E-04
1,60E-02	0,011974	1,25905	10,19	8,15	14,400	3,595919	6,69E-03	1,47E-04	1,47E-04
1,70E-02	0,011347	1,33772	10,82	8,66	13,531	3,388263	6,28E-03	1,47E-04	1,47E-04
1,80E-02	0,010722	1,41637	11,46	9,17	12,801	3,200133	5,93E-03	1,47E-04	1,47E-04
1,90E-02	0,010095	1,49502	12,10	9,68	12,127	3,031813	5,67E-03	1,47E-04	1,47E-04
2,00E-02	0,009466	1,57366	12,73	10,19	11,571	2,889356	5,34E-03	1,47E-04	1,47E-04
2,10E-02	0,008834	1,6523	13,37	10,70	10,975	2,741274	5,09E-03	1,47E-04	1,47E-04
2,20E-02	0,008211	1,73094	14,01	11,20	10,478	2,60866	4,83E-03	1,47E-04	1,47E-04



Rys. 6. Otrzymany sygnał dopplera

Liczba prążków wynikająca z obliczeń była identyczna z odczytanymi z przebiegów i wynosiła dla zadanych parametrów 11.

## 5. BADANIA NAD ZASTOSOWANIEM METODY PUŁAPKOWANIA LASEROWEGO DO POMIARU GĘSTOŚCI, GRADIENTU TEMPERATURY LUB PRĘDKOŚCI PRZEPLYWU

### 5.1. Wprowadzenie, podstawy teoretyczne

Światło padające na obiekt może być na jego powierzchni pochłaniane, rozpraszane lub powodować emisję. Zjawiska te zwykle występują jednocześnie, a siły oddziaływania można podzielić na dwie grupy: siły rozproszenia (proporcjonalne do natężenia światła i działające zawsze w kierunku rozchodzenia się światła) oraz siły gradientowe (proporcjonalne do gradientu natężenia światła i działające w kierunku gradientu natężenia światła lub przeciwnie do niego). Kierunek działania sił drugiej grupy zależy od współczynników załamania obiektu  $n_{ob}$  i otaczającego go medium  $n_{me}$ . Jeśli  $n_{ob} > n_{me}$  to oddziaływanie następuje w kierunku gradientu natężenia światła, a jeśli  $n_{ob} < n_{me}$  to przeciwnie. Całkowita siła jest sumą obu tych składników. Obliczenie sił działających na obiekt (cząstkę) przez zogniskowaną wiązkę laserową jest podane w szeregu publikacjach [9,10,11].

Mechanizm oddziaływania sił jest łatwiej wyjaśnić jeśli całkowitą siłę przedstawi się za pomocą składowych: równoległej do osi padającej wiązki (siły poosiowej) oraz prostopadłej do osi wiązki (siły promieniowej). W wiązce gaussowskiej, w której rozkład natężenia posiada maksimum w osi wiązki, dla  $n_{ob} > n_{me}$  siły promieniowe wywołane gradientem natężenia promieniowego wykazują tendencję do popychania obiektu w kierunku osi wiązki. Proces ten postępuje dopóty, dopóki nie zostanie osiągnięte stabilne położenie poosiowe (gradient zerowy).

Jeśli  $n_{ob} < n_{me}$ , obiekt jest wypychany z obszaru wiązki i stabilność nie może być osiągnięta. Silnie przewężona wiązka może osiągnąć bardzo strome gradienty natężenia światła blisko przewężenia; są one skierowane do środka przewężenia (wynika to z opisu matematycznego wiązki gaussowskiej). W zależności od wzajemnego położenia obiektu i środka wiązki, siły rozpraszania i gradientowe albo działają w tym samym kierunku (gdy obiekt znajduje się przed środkiem przewężenia) albo przeciwnie (gdy obiekt znajduje się za środkiem przewężenia). Pełną równowagę (stabilne pułapkowanie) osiąga się przy zrównoważeniu sił elektromagnetycznych i mechanicznych. Trzeba więc wziąć pod uwagę także działające na obiekt siły ciężkości oraz siły wyporu [12]. Oznacza to, że osiągnięcie stabilnego punktu równowagi zależy od konfiguracji układu pomiarowego (np. zależnie od kierunku padania wiązki światła) i od parametrów pułapkowania: współczynników załamania  $n_{ob}$  i  $n_{me}$ , mocy lasera i przewężenia wiązki.

### 5.2. Powiązanie odchylenia kulki od osi wiązki laserowej z prędkością przepływu

Przy znanej zależności odchylenia kulki od siły działającej na kulkę pozostaje jeszcze wyznaczenie zależności między siłą naporu płynu  $F_{nap}$  działającą na kulkę o promieniu  $r$  a prędkością przepływu  $v$  [13]. Zależność ta wynika z równania Stokes'a dla małych wartości liczb Reynoldsa ma postać

$$F_{nap} = 6\pi r v \eta (1 + p_{Re} + p_{b1} + p_{b2}) \quad (3)$$

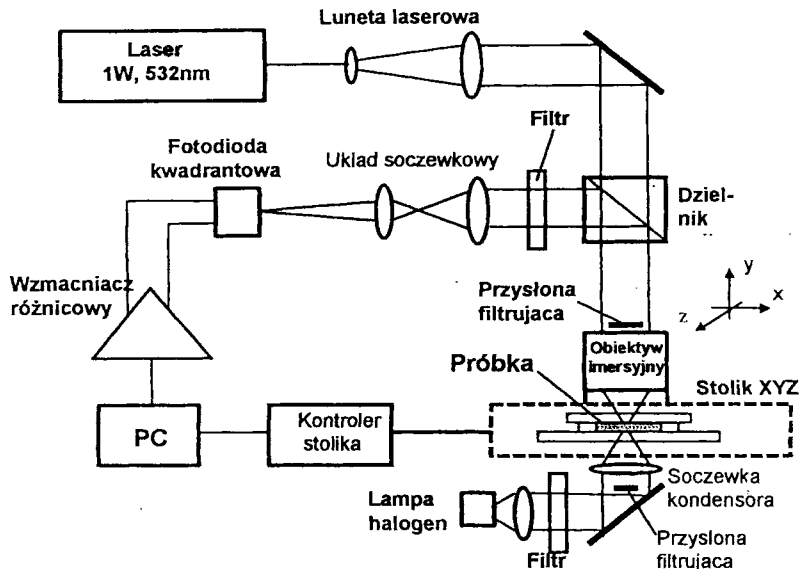
Jak widać siła ta jest wprost proporcjonalna do lepkości, prędkości przepływu i do promienia kulki. Występujące w nawiasie współczynniki poprawkowe uwzględniają wpływ liczby Reynoldsa ( $p_{Re}$ ) oraz korekcie warunków brzegowych, czyli wpływ odległości  $h$  środka kulki od ścianek ograniczających przestrzeń pomiarową ( $p_{b1}$  i  $p_{b2}$ ).

Współczynniki te można wyznaczyć z wzorów uwzględniających gabaryty próbek, liczbę Reynoldsa i stałą Eulera.

Ponieważ wartości  $p_{b1}$  i  $p_{b2}$  są dla określonej geometrii układu stałe, z wartość  $p_{Re}$  zmienia się w zakresie małych liczb Reynoldsa w niewielkim stopniu, a także zależność siły od wychylenia kulki jest dla małych odchyłeń liniowa, można się spodziewać liniowej zależności odchylenia kulki w funkcji prędkości przepływu.

### 5.3. Stanowisko do badań siły odchylającej kulkę w wyniku jej opływu przez ciecz

Badania prowadzono na stanowisku przedstawiony na rys. 7 [14].



Rys. 7. Stanowisko do badania możliwości zastosowania metody pułapkowania laserowego do pomiaru mikroprzepływów

Uzyskano ostry obraz jasnej kulki na ciemnym tle, który przesuwając się wskutek ruchu cieczy wywarza różnicowe sygnały x,y fotodetektora.

Z teorii pułapkowania laserowego wiadomo, że najważniejszą rolę odgrywają promienie padające nieosiowo. Przesłona filtrująca umieszczona na wlocie wiązki laserowej do obiektywu umożliwia wyeliminowanie promieni poosiowych. Pozwala to zmniejszyć ilość energii cieplnej wytworzonej w kulce, a tym samym zmniejszyć błędy pomiaru wywołane lokalną zmianą lepkości.

Podobna przesłona filtrująca, umieszczona od strony oświetlacza halogenowego umożliwia uzyskanie wyraźnego obrazu kulki w fotodiodzie.

### 5.4. Badania wpływu prędkości opływu kulki na jej odchylenie od osi wiązki laserowej

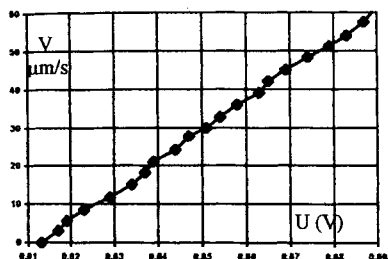
W przestrzeni próbki, utworzonej przez dwie płaskorównoległe płytki szklane, między którymi znajdowała się woda wraz ze szklanymi kulkami, chwytało kulkę, a następnie napędzano stolik wraz z próbką w kierunku poziomym z określonymi prędkościami.

W ten sposób cała próbka cieczy przemieszcza się względem utrzymywanej przez wiązkę laserową kulki, a więc prędkość przesuwu stolika można w dobrym przybliżeniu uznać za prędkość opływu kulki przez wodę.

Im większa prędkość tym większe siły naporu na utrzymywaną w pułapce kulkę. Przy większej prędkości większe jest odchylenie kulki od osi wiązki, a więc większy sygnał w postaci różnicy napięć z fotodiody kwadrantowej.

Prędkość opływu kulki jako funkcję napięcia różnicowego generowanego przez detektor położenia kulki (fotodiodę kwadrantową) przedstawiono na rys. 8.

Odległość między szklanymi płytkami płaskorównoległymi wynosiła 125  $\mu\text{m}$ . Średnica kulek szklanych wynosiła 5  $\mu\text{m}$ . Przed nadaniem próbce ruchu w kierunku poziomym ustawiano ją w pionie w połowie wysokości próbki, tj. 62.5  $\mu\text{m}$  od jej dna. W tym położeniu wpływ ścianek na zachowanie kulki był niewielki. Można przyjąć, że w eksperymencie dość dobrze odwzorowano opływ kulki przez strumień o płaskim rozkładzie prędkości.



Rys. 8. Prędkość opływu kulki jako funkcja napięcia generowanego przez fotodiodę

Zależność, zgodnie z przewidywaniami teoretycznymi jest liniowa. Występują jednak dość duże błędy przypadkowe – rzędu 3 %.

Trzeba nadmienić, że podobne doświadczenia można przeprowadzić przy pomiarze lepkości cieczy lub jej gradientu temperatury.

## 5.5. Ocena możliwości praktycznego zastosowania wyników badań

Opisana metoda może stanowić podstawę do zbudowania mikroprzepływomierza do zastosowań przemysłowych, np. do dozowania w ciągłych procesach niewielkich ilości płynnych domieszek. Może także być wykorzystana w biomedycynie do segregacji cząstek znajdujących się w płynach biologicznych lub krwi. Stanowisko pomiarowe może być łatwo przystosowane także do pomiaru lepkości cieczy lub gradientu temperatury.

## 6. WYKORZYSTANIE METODY ZLICZANIA FOTONÓW DO DETEKЦИИ WIRÓW

### 6.1. Detekcja wirów w przepływomierzach wirowych

Dla detekcji wirów może wykorzystywać pulsacje prędkości towarzyszące odrywaniu się wirów. Jedno z możliwych rozwiązań to przepuszczenie przez ścieżkę wirową wiązki ultradźwięków. Inna metoda polega na wykorzystaniu czujników termooanemometrycznych w postaci termistorów, samopodgrzewających się płynącym przez nie prądem zasilającym. Kolejny system detekcji wirów polega na wykorzystaniu zjawisk elektrostatycznych na powierzchni opływającego elementu. Ponieważ w strefie wiru, wskutek zwiększenia prędkości, znajduje się strefa obniżonego ciśnienia, detekcji wirów można dokonać za pomocą czujników ciśnienia. Trzeba tu nadmienić, że wchodzą w grę sensory o małej stałej czasowej, gdyż częstotliwość generowania wirów zawiera się w granicach od jednego Hz do 2 kHz, w zależności od średnicy nominalnej przepływomierza i parametrów mierzonego płynu.

Pojawiające się na przemian po obu stronach generatora wirów obniżone ciśnienie powoduje, że na generator oddziałują naprężenia, pulsujące z częstotliwością odrywania się wirów. Detekcja tych naprężeń jest kolejnym sposobem detekcji wirów. Dokonuje się jej za pomocą

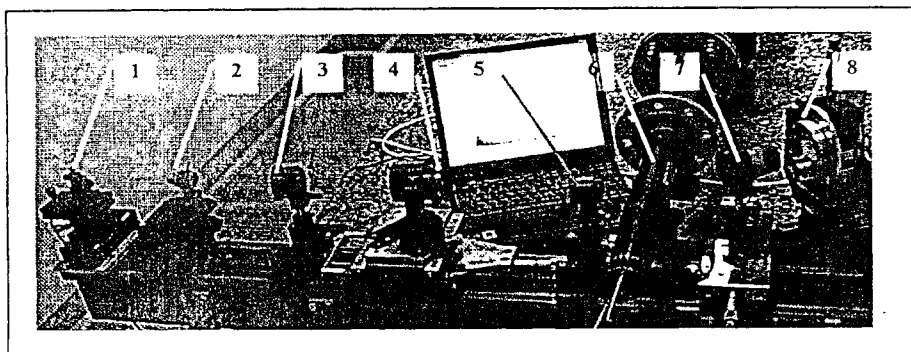
sensorów tensometrycznych, piezoelektrycznych lub światłowodowych, w których drgania generatora wirów przenoszone na światłowód powodują modulację przenoszonego przez niego sygnału w postaci strumienia świetlnego.

Większość opisanych powyżej zasad detekcji wirów jest wrażliwa na drgania i udary rurociągu oraz pulsacje strumienia. Problem ten jest wciąż aktualny i trwają dalej prace badawcze nad jego rozwiązaniem, patrz np. [15].

Optyczna zasada detekcji wirów jest niewrażliwa na tego rodzaju zakłócenia.

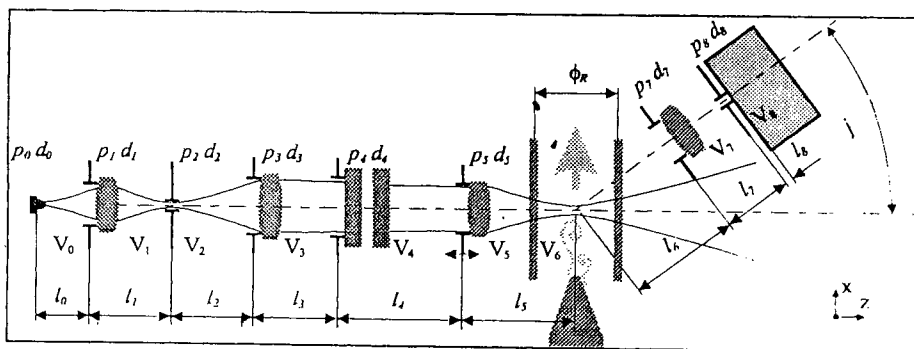
## 6.2. Opis stanowiska

Układ optyczny jest przedstawiony na rys.9 i 10.

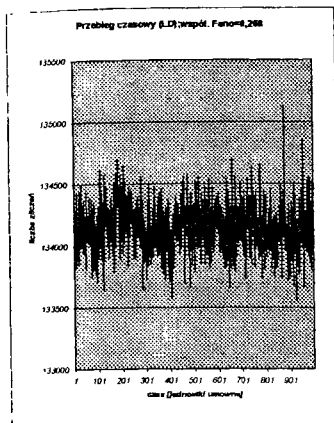


Rys.9. Układ optyczny

Numeracja opisu oznacza kolejno: 1- dioda laserowa, 2- zespół obiektywu mikroskopowego PZO 5/0,12 i przysłona otworkowej, 3- soczewka kolimująca, 4- zestaw dwóch polaryzatorów, 5- obiektyw układu oświetlającego, 6- odcinek pomiarowy instalacji z okienkami wziernikowymi, 7- obiektyw detektora, 8- zespół detektora i żrenicy wejściowej (przysłona otworkowa). Schemat układu optycznego z zaznaczonymi istotnymi wymiarami został przed



Rysunek 10. Schemat układu optycznego



stawiony na rys.10. Na schemacie zaznaczono wiązkę laserowej. W przestrzeni pomiarowej (wewnątrz średnicy  $\phi_R$ ) naszkicowano umowny kształt generatora wirów (figura zbliżona do trapezu) i kilka powstałych wirów. Kierunek przepływu oznaczony szeroką strzałką wewnątrz średnicy  $\phi_R$ .

W układzie zastosowano specjalnie zaprojektowany generator wirów, nebulizator i diodę laserową (635nm, 3mW). Sygnał z diody jest pokazany na rys 11.

Rysunek 11. Sygnał z diody LD na detektorze

### 6.3. Detektor promieniowania

Światło rozproszone z reguły ma natężenie mniejsze o kilka rzędów wielkości od światła padającego.

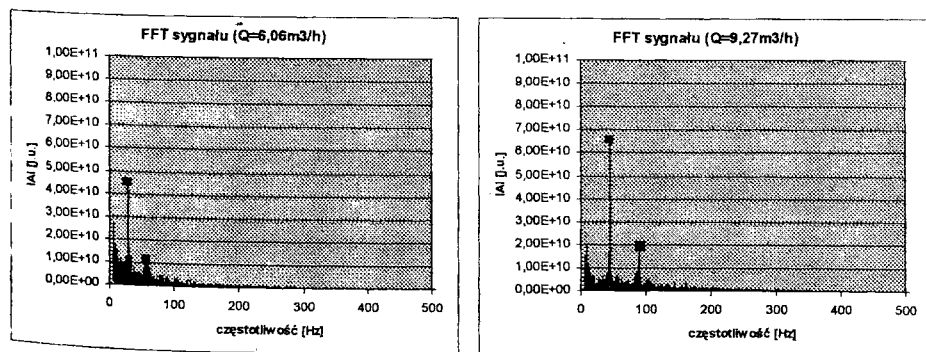
Natężenia to osiąga poziom, na którym uwidacznia się kwantowy charakter promieniowania elektromagnetycznego, ponieważ zastosowano jako źródło światła diodę laserową małej mocy. W metodzie, która pozwala na rejestrację promieniowania na poziomie pojedynczych fotonów (photon counting), stosuje się bardzo czułe, wyselekcjonowane fotopowielacze. Jest to jedyna możliwość obserwacji zjawisk o tak małym poziomie bez dodatkowych technik obróbki sygnału. Dodatkowo w porównaniu do analogowej metody wykorzystującej fotopowielacze zliczanie pojedynczych fotonów charakteryzuje się lepszym stosunkiem sygnału do szumu.

Jako detektor zastosowano fotopowielacz H6240 firmy Hamamatsu Photonics K.K. o następujących parametrach: zakres spektralny 180..680 nm (rys. 5.8), rozdzielczość czasowa 35 ns, zakres liniowej pracy  $2,5 \cdot 10^6$  zliczeń na sekundę z 10% błędem nieliniowości, jednorodności przestrzennej fotokatody w granicach 5% dla światła skupionego w plamkę o średnicy poniżej 0,5mm, zliczenia ciemne typowo 30cps.

Impulsy zlicza wykonany licznik elektroniczny zapewniający 16,7mln nieprzerwanych zliczeń i ich transfer z czasem martwym około 1ns; czas zliczania od 16µs do 1s z krokiem 16µs.

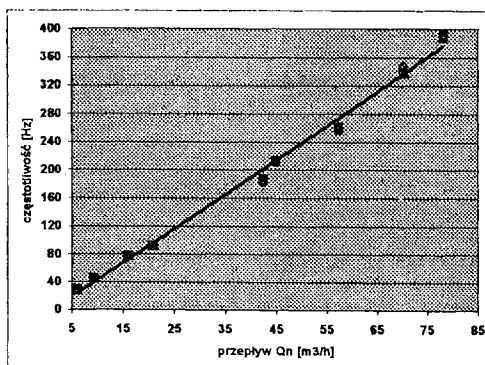
### 6.4. Pomiary

Na rys.12 przedstawiono widma amplitudowe dla wybranych, reprezentatywnych serii pomiarowych. Odpowiadają one dwóm wartościom unormowanego przepływu  $6,06 \text{ m}^3/\text{s}$  i  $9,27 \text{ m}^3/\text{s}$ .



Rys. 12. Widmo amplitudowe dla małych przepływów

Na rys. 13 zamieszczono charakterystykę przetwarzania  $f = f(Q_n)$ , na której umieszczono wszystkie serie pomiarowe. Równanie prostej regresji zaznaczonej na charakterystyce jest następujące:  $f = 4,88Q_n - 5,95$ . Współczynnik  $R^2$  dopasowania modelu prostej regresji do danych wynosi  $R^2 = 0,995$  i świadczy o wysokim stopniu dopasowania. Liczba impulsów jest liczbą pulsacji wirów Kármána na generatorze wirów co koresponduje z wyznaczaną w obliczeniach częstotliwością podstawową. Stałą wzorcowania porównano ze stałą



Rys. 13. Charakterystyka przetwarzania  $f=f(Q_n)$

wzorcowania przepływomierza Prowirl 70 W (Endress+Hauser) o średnicy nominalnej DN40 (szereg ANSI), w którym zastosowano bardzo zbliżony w kształcie generator wirów. Różnica jest nie większa niż 2,5% co w dużym stopniu potwierdza poprawność otrzymanych wyników.

Badania potwierdziły możliwość zastosowania metody zliczania fotonów do detekcji wirów. Pomiarzy przeprowadzono w przedziale  $6,06 \div 78,15 \text{ m}^3/\text{h}$  co daje zakresowość przetwornika 13:1.

## 7. BADANIA NAD LASEROWYMI CZUJNIKAMI CIŚNIENIA

### 7.1 Wybór zasady pomiaru

Ciśnieniowe elementy sprężyste są znane od dawna, dobrze przebadane i opisane teoretycznie. Stosuje się je zarówno do budowy zwykłych ciśnieniomierzy (manometrów) z odczytem lokalnym, jak i do budowy przetworników ciśnienia.

W przypadku manometrów mamy do czynienia z szeregiem błędów dodatkowych, związanych z dźwigniowo – zębatym układem przetwarzania niewielkiego ugięcia elementu sprężystego na duży kąt obrotu wskazówki. Błędy te wynikają z tarć i luzów mechanizmu, a także z nieliniowości mechanizmu korbowego zastosowanego do przetwarzania przemieszczenia liniowego na kątowe. Tak więc do błędów związanych z samym elementem sprężystym (histereza sprężysta, pełzanie) dodają się często wielokrotnie je przewyższające błędy wynikające z luzów i tarć w mechanizmie.

Do pomiaru odkształcenia elementu sprężystego najczęściej stosowane były i są tensometry. Mimo skomplikowanej technologii wnoszą one jednak także błędy dodatkowe związane z pełzaniem i histerezą nie tylko materiału elementu sprężystego, ale także tensometru i kleju.

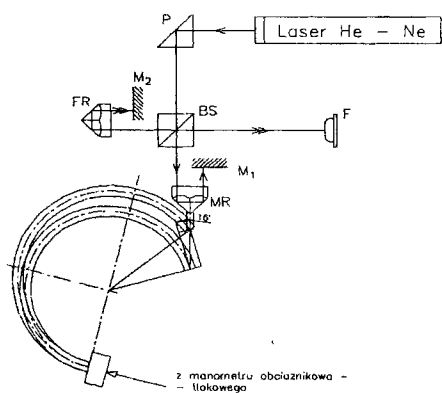
Obecnie najlepsze są półprzewodnikowe przetworniki tensometryczne wdyfundowanie w krzemowy element sprężysty (stosuje się też bardzo dokładne przetworniki pojemnościowe); nie eliminują one jednak z toru pomiarowego sygnału analogowego.

Idealne możliwości stwarza pomiar odkształcenia elementu sprężystego za pomocą interferometru laserowego. Daje on informację w postaci liczby impulsów proporcjonalnej do odkształcenia elementu sprężystego, a więc praktycznie informację w postaci cyfrowej. Nie obciąża przy tym elementu sprężystego, gdyż pomiar jest bezstykowy.

## 7.2. Budowa stanowiska badawczego

Wybrany elementami sprężystymi były sprężyny rurkowe Bourdona i sfalowane membrany. Rurki są powszechnie stosowane do pomiarów ciśnień powyżej 0.4 bar, górna granica jest praktycznie, przy specjalnych konstrukcjach rurki, nieograniczona. Ich odkształcenia kątowe, drogi swobodnego końca rurki w kierunku promieniowym i stycznym oraz jego kierunek są opisane dobrze znanymi wzorami. Sfalowane membrany zastosowano do mniejszych zakresów ciśnień, od pojedynczych kPa.

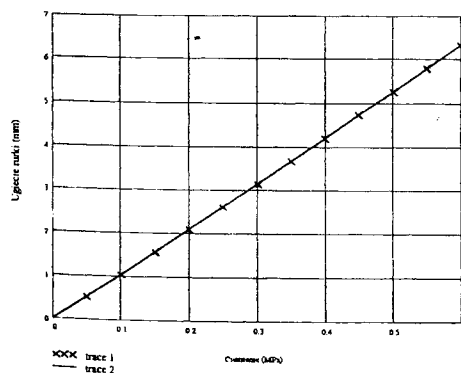
Schemat stanowiska badawczego przedstawiono schematycznie na rys. 14. Dla celów badawczych zestawiono głowicę interferencyjną składa się z lasera He-Ne, kierowacza P, kostki światłodzielącej BS, retroreflektorów MR i FR oraz zwierciadeł  $M_2$  oraz  $M_1$ . Wiązki pomiarowa i odniesienia po odbiciu od zwierciadeł powracają tą samą drogą do kostki światłodzielącej BS, a następnie interferują w płaszczyźnie fotodetektora F. Dzięki zastosowaniu pryzmatu narożnego jako retroreflektora MR, wiązka odbita od zwierciadła  $M_2$  biegnie równoległe do wiązki padającej na to zwierciadło. W konsekwencji, mimo pochylenia kątowych pryzmatu MR, nie następują zmiany w okresie i pochyleniu prążków interferencyjnych. Interferometr jest czuły jedynie na liniowe przemieszczanie się reflektora MR w kierunku równoległym do wiązki. Jest to szczególnie istotne, gdyż kierunek poruszania się końca rurki Bourdona jest złożony.



Ponieważ retroreflektor FR jest również wykonany w postaci pryzmatu narożnego, interferujące wiązki świetlne mają dokładnie ten sam stan polaryzacji, dając maksymalny kontrast prążków interferencyjnych. Charakterystykę w postaci ugięcia rurki w funkcji ciśnienia przedstawiono na rys. 15.

Rys. 14. Schemat ideowy stanowiska do badań nad laserowymi przetwornikami ciśnienia. MR, FR – retroreflektory,  $M_1$ ,  $M_2$  – nieruchome zwierciadła, BS – kostka dzieląca, P – pryzmat kierujący

Wykres odkształcenia rurki w funkcji ciśnienia:



Charakterystykę rurki aproksymowano linią prostą metodą najmniejszych sumy kwadratów. Obliczono współczynnik korelacji wynosi 0.999997465, jest więc bardzo bliski jedności, co świadczy o dobrej liniowości charakterystyki.

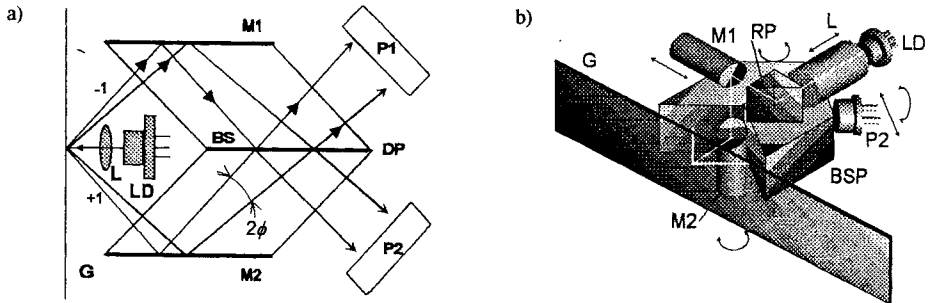
Rys. 15. Charakterystyka rurki Bourdona o zakresie 0.6 MPa



### 7.3. Badania prototypu czujnika ciśnienia z diodą laserową

Do realizacji prototypu przetwornika ciśnienia zastosowano przetwornik przemieszczeń [17] oparty o nieco inną zasadę działania niż zastosowana przy badaniach ciśnieniowych elementów sprężystych (rys.16).

Przestrzennie koherentna wiązka światła diody laserowej LD po uformowaniu soczewką L pada na siatkę dyfrakcyjną G. Powstałe w wyniku ugięcia rzędy dyfrakcyjne +1 oraz -1 kierowane są przy pomocy pary równoległych powierzchni odbijających M1 i M2 w kierunku płaszczyzny światłodzielną BS. Elementy optyczne M1, M2 oraz BS utworzone są przez powierzchnie podwójnego pryzmatu DP. Powierzchnia światłodzielną powoduje, że wiązki rzędów dyfrakcyjnych +1 i -1 interferują w płaszczyznach fotodetektorów P1 i P2



Rys. 16. a) Idea działania interferencyjnego przetwornika przemieszczeń wzorca  
b) Konstrukcja zespołu interferencyjnego

Jeżeli siatka przemieszcza się z prędkością  $\vartheta_s$  w kierunku prostopadłym do jej linii, to w wyniku efektu Dopplera prążki interferencyjne w płaszczyznach fotodetekcji przemieszczają się z prędkością  $\vartheta_f$  według zależności

$$\frac{\vartheta_f}{\vartheta_s} = -\frac{2\delta}{d} \quad (4)$$

gdzie  $d$  jest okresem prążków a  $\delta$  jest stałą siatki. Równanie powyższe pokazuje, że przemieszczenie siatki o jedną stałą, zmienia fazę prążków interferencyjnych o  $4\pi$ , to znaczy o dwa okresy. Istotne jest to, że jeżeli fotodetektor umieszczony jest w zerowym rzędzie interferencji (tzn. w miejscu gdzie różnica dróg optycznych jest zerowa), to położenie i kontrast prążków nie zależą od charakterystyki widmowej źródła światła.

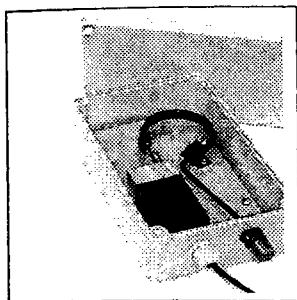
Pomiar przemieszczeń siatki realizowany jest metodą zliczania przemieszczających się prążków. Dwie strefy interferencyjne wykorzystane są do utworzenia dwóch przebiegów sinusoidalnych różniących się w fazie o  $\pi/2$ . Pozwala to na wykrycie kierunku ruchu prążków i realizację zliczania rewersyjnego.

Ideę konstrukcji zespołu optycznego przetwornika przedstawia rys. 16b. Pokazuje on wzajemne przestrzenne rozmieszczenie podstawowych elementów przetwornika. Na rysunku tym zaznaczono strzałkami stopnie swobody elementów układu pozwalające na jego adiustację. Pokazany na rys. 16b zespół interferometru został zamocowany w korpusie czujnika z umożliwieniem regulacji ustawienia względem ruchomego wzorca. Wzorec przetwornika prowadzony jest w czujniku przy użyciu precyzyjnej prowadnicy kulkowej zapewniającej błędy prowadzenia mniejsze niż  $1'$ .

Jako źródło światła w analizowanym układzie interferometrycznym zastosowano wielomodową diodę laserową o mocy około 5 mW oraz długości fali emitowanego promieniowania równej 650 nm.

Układ elektroniczny przetwornika składa się z płytki zespołu w głowicy i karty komputera zawierającej wydzielony zasilacz lasera.

Układ laserowego przetwornika ciśnienia opartego o wzorzec inkrementalny i diody laserowe przebadanego w warunkach laboratoryjnych sprzężono z dużą rurką Bourdona i zmontowano w obudowie przemysłowej o stopniu ochrony IP 67 (rys. 17).



Rys. 17. Przetwornik ciśnienia oparty o wzorzec inkrementalny i diody laserowe zmontowany w obudowie przemysłowej IP 65

Podobnie jak w przypadku pomiaru za pomocą interferometru zbadano charakterystyki rurki dla pełnego zakresu ciśnienia (6 MPa) i dla zakresu ograniczonego (1 MPa) przed i po 3-miesięcznych próbach eksploatacyjnych.

Charakterystyki po próbach nie odbiega od cha-

rakterystyk uzyskanych przed próbami, zarówno pod względem rozrzutu, jak i histerezy.

## 8. WNIOSKI

W referacie przedstawiono kilka wybranych opracowań z zakresu metrologii laserowej. Omówione zastosowania wynikały z uwarunkowań zaistniałych w toku realizacji tych prac. Szersze spojrzenie na każde z nich pozwoli łatwo poszerzyć obszar zastosowań o pomiar szeregu innych wielkości fizycznych. Choćby przedstawiona w p.7 praca nad laserowymi czujnikami ciśnienia; jej efektem jest opracowany układ mikrointerferometru laserowego o dużej rozdzielczości. Interferometr taki można zastosować bezpośrednio do wszelkich pomiarów długości i kąta, a pośrednio wszędzie tam, gdzie sprawdzana wielkość fizyczna jest mierzona pośrednio poprzez pomiar długości lub kąta (tak jak ma to miejsce w p.7 referatu). Podobnie jest też i z pozostałymi propozycjami pomiarowymi zamieszczonymi w referacie. Analityczne spojrzenie pozwoli znaleźć dla nich wiele innych zastosowań.

## LITERATURA

- [1] IPC Int. Conf. On Opto-Electronics, Toronto, May, 2001
- [2] S.A. Weiss, editor's papers, Photonics Spectra, June 2001, July 2001
- [3] Jablonski R.: New measuring tools in mechatronics, Proc. Int. Conf. Mechatronics 2000. Warsaw, Poland Vol. 1, pp. 26-32
- [4] Seasholtz, et al.: Flow measurement based on Rayleigh scattering and Fabry-Perot interferometer, Optics and Lasers "Engineering, 27 (1977) pp. 543-570
- [5] Goldsmith A., W dół ziemi, Thermal Control Co Ltd. Hove, East Sussex
- [6] Baron and Willeke (B&W) Aerosol Measurement, 2<sup>nd</sup> Edition, J. Wiley and Sons, 2001-11-13 Hinds, Aerosol Technology, J. Wiley and Sons, 1982 (2<sup>nd</sup> Edition 1999)
- [6] Hind W.C., Aerosol technology: Properties, Behaviour and Measurement of Airborne Particles, J. Wiley and Sons, 1999

- [8] Morgan P., Development of improved methods for calibration of optical particle counters, NASA, August 12, 1996
- [9] Peterson J.C., Maurer F. A method for the analysis of laser Doppler signals using a computer connection with a fast A/D-converter", Proceedings of the LDA-symposium, Copenhagen 1975, p. 312
- [10] Burton J.P., Alexander D. R., Schaub S.A.: Theoretical determination of net radiation force and torque for spherical particle illuminated by a focused laser beam. *J. Appl. Phys.* Vol. 66, No 10 (1989)
- [11] Gussgard R., Lindomo T., Breik I.: Calculation of the trapping force in a strongly focused laser beam. *J. Opt. Soc. Am. B.* Vol. 9, No 10 (1992) 1992-1930
- [12] Svoboda K., S. M. Block, Biological applications of optical forces. *Ann. Rev. Biophys. Biomol. Struct.*, 23, 247-285, 1994
- [13] Self S.A.: Focusing of spherical Gaussian beam. *Appl. Opt.* 22 (5), 658-661, 1983
- [14] Chester W., Breach D.R., Proudman I.: On the flow past a sphere at low Reynolds number. *J. Fluid Mech.* Vol. 37. Part 4 (1969)
- [15] MSP 430 Family, Architecture Guide and Module Library, Data Book, Texas Instruments, 1996, SLAUE10B.
- [16] Sproston J. L., El-Wahed A., Johnson M. W. An electrostatic vortex shedding meter. *Flow Measurement and Instrumentation*, vol. 1, July 1990
- [17] Dobosz M., Application of a focused laser beam in a grating interferometer for high-resolution displacement measurements, *Optical Engineering*, 1999, Vol. 38, s. 958-967