

## Małgorzata KUJAWIŃSKA

POLITECHNIKA WARSZAWSKA  
INSTYTUT MIKROMECHANIKI I FOTONIKI  
ZAKŁAD TECHNIKI OPTYCZNEJ

# Rozwój technik fotonicznych komputerowo wspomagane optyczne systemy pomiarowe

Prof. dr hab. inż.  
Małgorzata KUJAWIŃSKA,



Kierownik Zakładu Techniki Optycznej w Instytucie Mikromechaniki i Fotoniki na Wydziale Machatroniki; prodziekan ds. nauki na Wydziale Mechatroniki. Jest sekretarzem SPIE - the International Society for Optical Engineering, prezesem Fundacji Wspierania Rozwoju i Wdrażania Technik Optycznych i członkiem zarządu Polskiego Towarzystwa Technik Sensorowych. Laureatka konkursu Fundacji Nauki Polskiej na subsydia dla uczonych (2001). Jej zainteresowania naukowe obejmują optyczne metody badań (interferometria klasyczna, holograficzna, siatkowa, metody prążków mory), ich zastosowania w mechanice eksperymentalnej, inżynierii materiałowej kontroli przemysłowej. Obecnie koncentruje się na problemach budowy połowych sensorów optycznych z automatyczną analizą obrazu oraz optyczno-numerycznych systemach pozyskiwania danych dla technik multimedialnych.

### Abstract

*Historical background and recent scientific researches in Optical Engineering Division at Institute of Micromechanics and Photonics at the field of photonics technologies are presented with special focus on the development of opto-numerical measurement systems. Also the outline of education program for Photonics Engineering specialisation is given.*

### Streszczenie

*W artykule przedstawiono rys historyczny i prowadzone w Zakładzie Techniki Optycznej prace naukowo-badawcze z zakresu technik fotonicznych, a w szczególności opto-numerycznych metod pomiarowych oraz zarys programu dydaktycznego realizowanego w ramach specjalności Inżynieria Fotoniczna.*

### Wstęp

Według światowych prognoz naukowych i technicznych, rozpoczynający się wiek XXI będzie wiekiem, w którym rozwój cywilizacyjny określany będzie przez postęp w fotonice i inżynierii optycznej. Fotonika, podobnie jak elektronika w wieku XX, jest nauką służebną dla wielu dziedzin życia takich jak techniki informacyjne i telekomunikacja, opieka zdrowotna i nauki biologiczne, energetyka, obrona narodowa, przemysł wytwórczy, edukacja, jednak jej wpływ na rozwój i przemiany w tych dziedzinach jest ogromny i ciągle wzrasta.

## ZAKŁAD TECHNIKI OPTYCZNEJ

### Rys historyczny

Historia Zakładu Techniki Optycznej [1] sięga 1953r., gdy w Oddziale Mechaniki Precyzyjnej na Wydziale Mechanicznym Technologicznym powołano Katedrę Optyki, której nazwa w 1960r. została zmieniona na Katedrę Przyrządów Optycznych. Organizatorem i kierownikiem Katedry był profesor Jan Matysiak. Profesor miał za sobą bogatą praktykę przemysłową. Pracę rozpoczął w 1933r. w Polskich Zakładach Optycznych, w których zajmował się obliczeniami układów optycznych. Po wojnie organizował produkcję w hucie szkła optycznego w Jeleniej Górze, w latach 1947-1958 był dyrektorem technicznym i naczelnym PZO, a od 1958 do 1963 kierował Centralnym Laboratorium Aparatury

Pomiarowej. Profesor Matysiak był twórcą i opiekunem specjalności kształcącej inżynierów-optyków, autorytetem w sprawach zawodowych i osobowością integrującą przez wiele lat środowisko optyków.

W latach 80-tych w ramach Centralnych Programów Badawczo-Rozwojowych (CPBR) podjęto szereg prac badawczych z zakresu interferometrii, dyfrakcji, akustooptyki, a efektem końcowym bezpośrednio wykorzystywanym w pracach badawczych i dydaktyce były stanowiska pomiarowe lub wręcz całe laboratoria. Podjęto problematykę automatycznej analizy obrazu, została opracowana metodyka i programy obliczeniowe pozwalające na nawiązanie współpracy z National Physical Laboratory w Anglii w zakresie pomiarów interferencyjnych. W latach 80-tych przy współpracy z Pracownią Konstrukcyjną Instytutu oraz Instytutem Podstaw Elektroniki Politechniki Warszawskiej zbudowano system Telegwiazda przeznaczony do orientacji przestrzennej sztucznego satelity (praca finansowana przez Centrum Badań Kosmicznych PAN). W latach 90-tych w ramach realizacji grantów KBN podjęto tematykę optycznych badań w podczerwieni, rozwinięto optyczne metody badań i kontroli w mechanice eksperymentalnej i inżynierii materiałowej, a szczególnie badań kształtu, deformacji powierzchni oraz przemieszczeń i odkształceń. Zakład wyspecjalizował się w budowie zautomatyzowanych systemów bazujących na technikach interferometrycznych (siatkowych i plamkowych). Opracowano i rozwinięto problematykę automatyzacji pomiarów bazujących na fazowych metodach analizy obrazów prążkowych. Te opracowania zespołu naukowego zdobyły uznanie w wielu ośrodkach krajowych i zagranicznych takich, jak Oxford University, National Physical Laboratory (Wielka Brytania), Worcester Polytechnic Institute (USA), Associazione Istituzione Libera Università Nuoro (Włochy). W ramach priorytetowego programu Inżynieria Fotoniczna w Politechnice Warszawskiej zbudowano spektrometr fourierowski przeznaczony do detekcji zanieczyszczeń atmosfery.

### Działalność naukowo badawcza (1996-2001)

Zakład Techniki Optycznej specjalizuje się z jednej strony w teorii dyfrakcji, interferencji i polaryzacji, z drugiej w rozwoju optycznych metod badań i pomiarów i w budowie zautomatyzowanych optycznych systemów pomiarowych. W skład kadry profesorskiej Zakładu wchodzi obok kierownika – prof. M. Kujawińskiej prof. dr hab. R. Józwicki kierujący obecnie pracami z zakresu interferometrii heterodynowej i holografii cyfrowej oraz prof. dr hab. inż. K. Patorski koncentrujący się na rozwoju metod interferometrii plamkowej (ESPI) i zastosowaniach metod optycznych w medycynie. W latach 1997-2001 udało się przyciągnąć do ZTO zespół zdolnych doktorantów (obecnie 12 osób) wywodzących się w większości z prowadzonej przez nas specjalności Inżynieria Fotoniczna a również reprezentujących takie specjalności jak automatyka, techniki multimedialne, inżynieria sprzętu precyzyjnego i fizyki uniwersyteckiej.

Celem działania zespołu jest stworzenie bazy optycznych metod i systemów pomiarowych mających wspomóc i zintensyfikować rozwój mikro- i nanotechnik, inżynierii odwrótej i technik multimedialnych.

**Szczegółowe cele naukowe realizowane w Zakładzie Techniki Optycznej obejmują następujące zadania [1,2]:**

a) **opracowanie koncepcji i budowa aktywnych, fazowych, optycznych systemów pomiarowych bazujących na najnowszych osią-**

gnięciach fotoniki (cyfrowe przestrzenne modulatory światła, aktywne elementy światłowodowe i falowodowe, mikrolasery i cyfrowe kamery CCD),

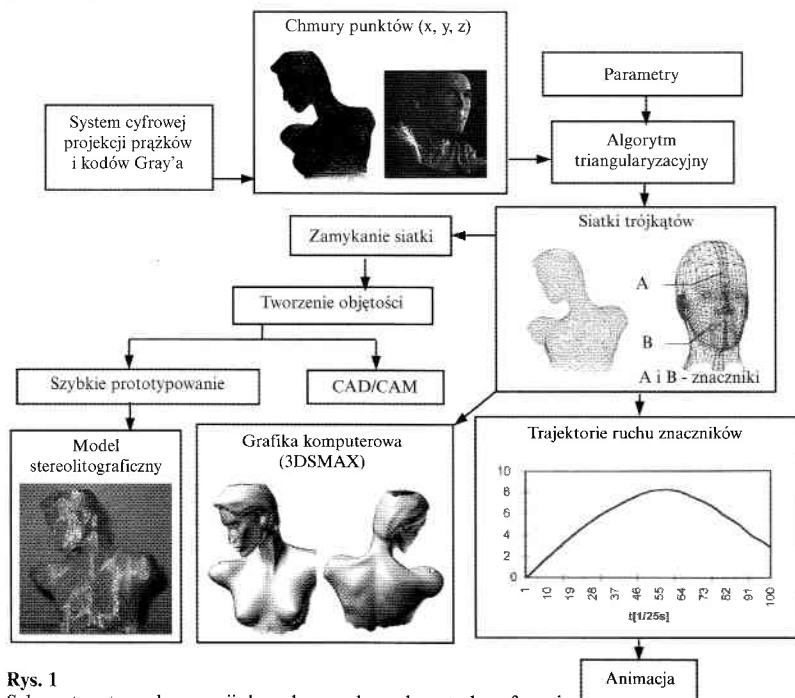
b) **opracowanie adaptacyjnej metodyki analizy obrazów prążkowych**, w których kodowana jest informacja uzyskana za pomocą większości optycznych metod pomiarowych. Metodyka powinna umożliwiać analizę obiektów i zjawisk o różnym poziomie zmienności czasowo-przestrzenno-spektralnej oraz obsługiwać metody koherentne i niekoherentne,

c) **opracowanie metodyki konwersji danych pozyskanych metodami optycznymi** do systemów MES, CAD/CAM, szybkiego prototypowania, tomografii komputerowej, grafiki i animacji komputerowej, internetu,

d) **opracowanie podstaw cyfrowo-optoelektronicznego obrazowania trójwymiarowego** dla aplikacji w mikromechanice, medycynie i technikach multimedialnych, (telewizja holograficzna, internet),

Realizacja powyższych celów naukowych związana jest z konkretnymi zadaniami aplikacyjnymi, do których nawiązują realizowane habilitacje oraz wykonywane pod kierunkiem kadry profesorskiej prace doktorskie. **I tak w nawiązaniu do odpowiednich obszarów zastosowań realizowane prace to:**

1. **Opracowanie rodziny optyczno-numerycznych systemów pomiaru kształtu obiektów trójwymiarowych** (rys. 1) bazujących na zintegrowanej metodzie projekcji prążków i kodów Gray'a i umożliwiającą pomiar bezwzględnych współrzędnych obiektów trójwymiarowych ( $x, y, z$ ) i pozyskanie informacji o teksturze obiektów (RGB) oraz automatyczną konwersję wyników do siatki trójkątów [4]. Modyfikacja tych systemów tak, aby umożliwiały pomiar obiektów ruchomych i zmiennych w czasie oraz metodyki konwersji danych dla dopasowania wyników do systemów animacji komputerowej i wirtualnej rzeczywistości VR.



Rys. 1 Schemat systemu konwersji danych pozyskanych metodą cyfrowej projekcji prążków i kodów Gray'a

2. **Opracowanie nowej generacji ekstensometrów optycznych** [3], których cechą szczególną jest pełna integracja z maszynami wytrzymałościowymi, niska czułość na drgania i wysoka dokładność pomiarów. W tym zakresie zrealizowano wspólnie z Instytutem Technologii Eksploatacji (Radom) i Akademią Techniczno-Rolniczą (Bydgoszcz) projekt celowy, którego wynikiem jest wdrożenie do produkcji laserowego ekstensometru siatkowego (LES) realizującego w czasie rzeczywistym pomiar odkształcenia w do-

wolnym punkcie pola widzenia układu oraz pomiar pól przemieszczeń i odkształceń (rys. 2) próbki według zadanego protokołu pomiarowego.

3. **Opracowanie rodziny mikrointerferometrów** [2,3] dla badań mikroelementów oraz nowych materiałów. W odpowiedzi na światowe i krajowe zapotrzebowanie na nowoczesne systemy pomiarowe dostarczające szczegółowej informacji o polach przemieszczeń, odkształceń, deformacji i lokalnych stałych materiałowych dla wysoko odpowiedzialnych, nowych materiałów technologicznych (nanomateriały, materiały „inteligentne”, materiały kompozytowe i gradientowe) oraz nowej klasy elementów i systemów mechanicznych (MEMS – mikro-elektro-mechaniczne systemy), optoelektronicznych (MOEMS – mikro-opto-elektro-mechaniczne systemy, elementy torów światłowodowych, falowody) i pakietów elektronicznych. W ZTO opracowano koncepcję wielofunkcyjnego stanowiska do mikropomiarów.

W ramach grantów naukowo-badawczych KBN oraz Programu Priorytetowego Politechniki Warszawskiej „Mikrosystemy” rozpoczęto prace nad budową rodziny mikrointerferometrów zintegrowanych z mikroskopem optycznym (rys. 3) i bazujących na interferometrze siatkowym, ESPI, interferometrze Twyman’a-Green’a oraz układzie interferometrii heterodynowej i cyfrowej interferometrii holograficznej. Opracowany w ZTO falowodowy mikrointerferometr siatkowy zdobył srebrny medal na wystawie Brussel-Eureka 2000. Dodatkowo dla potrzeb wyznaczania trójwymiarowego rozkładu współczynnika załamania w elementach światłowodowych i falowodowych opracowano metodykę i zbudowano system tomografii mikrointerferencyjnej.

Planowane w ramach w/w prac opracowanie metodyki pomiarowej, analizy i konwersji danych oraz budowy systemów pomiarowych wychodzi naprzeciw potrzebom nowopowstałych ośrodków naukowych zajmujących się technologiami światłowodowymi, MEMS i MOEMS,

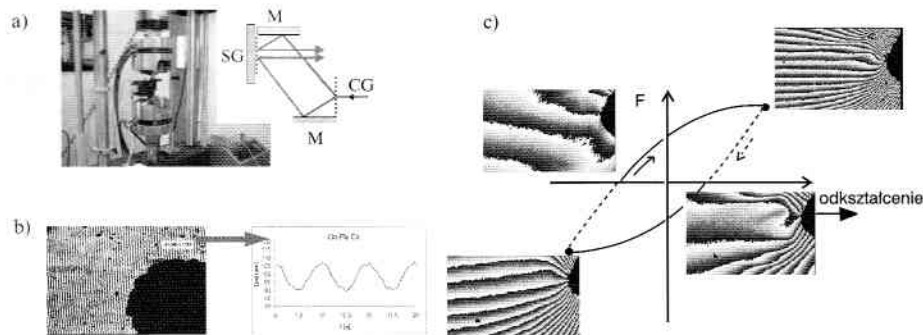
4. **Opracowanie nowych metod systemu cyfrowej rejestracji i optoelektronicznej rekonstrukcji hologramów (HC)** jako próba stworzenia toru cyfrowej telewizji holograficznej dla celów modelowania nowatorskich systemów multimedialnych i zdalnej diagnostyki elementów konstrukcji. W ZTO duży nacisk położony jest na rozwój nowych metod rekonstrukcji numerycznej w holografii cyfrowej i budowę systemów HC wykorzystujących najnowsze osiągnięcia fotoniki (wysokorozdzielcze modulatory przestrzenne i kamery CCD, światłowodowe tory transmisji informacji) i techniki komputerowej. Techniki HC stają się wiodącymi wśród optycznych metod mikropomiarów. Z drugiej strony ich rozwój stwarza nowe perspektywy dla tak długo oczekiwanych telewizji i kina holograficznego.

**W ZTO powstało unikalne w Polsce i jedno z najlepszych na świecie oprogramowanie do automatycznej analizy obrazów prążkowych** metodami fazowymi (przesunięcia fazy i transformaty Fouriera). Oprogramowanie Fringe Application wykorzystywane jest w różnych wersjach w większości badawczych i handlowych systemów zbudowanych w Zakładzie Techniki Optycznej.

#### Laboratoria naukowe

Zakład Techniki Optycznej posiada dobrze wyposażone laboratoria naukowe, a w szczególności:

a) **laboratorium pomiaru kształtu obiektów trójwymiarowych** wyposażone w 3 systemy pomiarowe (objętości pomiarowych do  $100 \times 100 \times 100 \text{ mm}^3$ , do  $1,5 \times 1,5 \times 1,5 \text{ m}^3$ , do  $0,5 \times 0,5 \times 0,5 \text{ m}^3$ ) bazujące na cyfrowych projektorach światła i dobrym sprzęcie komputero-

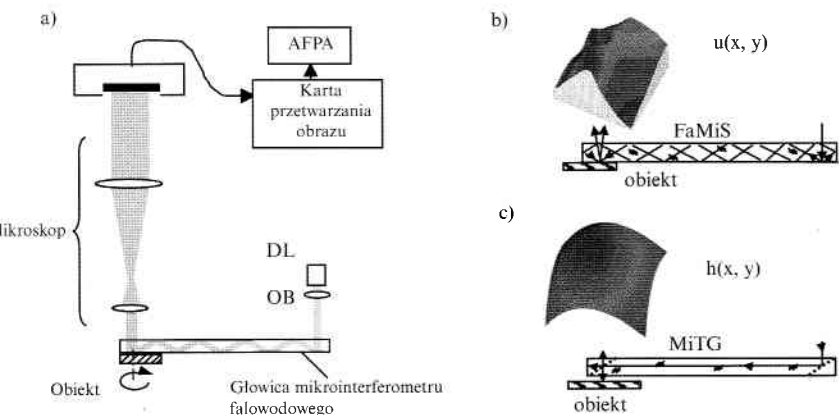


Rys. 2

Lasery ekstensometr siatkowy: a) zdjęcie LES na maszynie wytrzymałościowej i optyczny schemat działania LES, b) przykładowy interferogram z zaznaczoną lokalizacją „punktowego” pomiaru i wynik pomiaru odkształceń w czasie rzeczywistym oraz c) mapy pól przemieszczeń wyznaczone zgodnie z określonym protokołem pomiarowym. SG i CG - siatki przedmiotowa i kompensacyjna, M - zwierciadła, F - siła.

wym, różne zestawy kamerowe umożliwiają pomiary kształtu i tekstury obiektów trójwymiarowych oraz ich deformacji i ruchu w objętości pomiarowej.

b) **laboratorium optycznych pomiarów** w mechanice i inżynierii materiałowej wyposażone w laboratoryjny system interferometrii siatkowej oraz dwa systemy optycznych ekstensometrów warsztatowych, laboratoryjny układ elektronicznej interferometrii plamkowej i układ mikroskopu optycznego dostosowanego do współpracy z mikrointerferometrem falowodowym. Aby umożliwić prace



Rys. 3

Falowodowy mikrointerferometr zintegrowany z mikroskopem optycznym a) schemat płytki falowodowej do pomiarów, b) przemieszczeń w płaszczyźnie, c) przemieszczeń pozapłaszczyznowych wraz z przykładowymi wynikami pomiarów

nad zintegrowanym stanowiskiem interferometrycznym do badań mikroelementów mikroskop uzupełniony jest o mikropozycjonery oraz konstruowany jest system obciążający dla mikroelementów, c) **stanowisko interferometrii heterodynej** do pomiaru mikrostruktury obiektów trójwymiarowych realizowanego metodą quasiheterodyny czasowej i wyposażone w kamerę CCD o częstotliwości akwizycji obrazu do 1 kHz,

d) **stanowisko holografii i holograficznej interferometrii cyfrowej** wyposażone w kamerę CCD o rozdzielczości 1024\*1024 pikseli, laboratoryjny układ do rejestracji hologramów wykorzystujące jako źródło światła laser He-Ne oraz układ do optoelektronicznej rekonstrukcji hologramów bazujący na ciekłokrystalicznych modulatorach światła. Układ jest wystarczający do modelowania podstawowych zjawisk i procesów, natomiast przejście do zastosowań multimedialnych wymagać będzie dużych nakładów. Podejmowane są próby poszukiwania partnerów europejskich,

e) **stanowisko do tomografii interferencyjnej:** układ do pomiarów obiektów fazyowych o wymiarach milimetrych i submilimetro-

wych z automatyczną akwizycją i analizą wielu (>100) pomiarów. Realizuje się tu pomiary rozkładów współczynnika załamania np. w złączach światłowodowych,

f) **laboratorium pomiaru elementów optycznych** wyposażone w zautomatyzowany interferometr Fizeau do pomiaru elementów płaskich o średnicach mniejszych niż 210 mm oraz interferometr modułowy do pomiaru płaskich i sferycznych elementów optycznych,

g) **laboratorium spektrofotometryczne** wyposażone w spektrometry firmy Perkin Elmer (lambda 40 (VV, VS, N, R) i Spektrum 100FT-IR oraz spektrometr furierowski (IR) zbudowany w Zakła-

dzie Techniki Optycznej.

### Działalność dydaktyczna

Zakład Techniki Optycznej szkoli studentów w specjalności Inżynieria Fotoniczna. Jest to specjalność interdyscyplinarna, łącząca zagadnienia fizyki i matematyki stosowanej z problemami technicznymi w dziedzinie projektowania, wytwarzania i badania sprzętu optycznego i optoelektronicznego.

Przedmioty prowadzone na specjalności obejmują m.in. takie zagadnienia jak projektowanie układów optycznych, technikę laserów, sensorykę optyczną, cyfrową i optyczną analizę obrazu, technikę podczerwieni i światłowodową, inżynierię urządzeń optycznych. Wszystkie przedmioty obejmują wykłady i zajęcia laboratoryjne lub projektowanie. Końcowa edukacja prowadzona jest zgodnie z wyborem jednego z kierunków dyplomowania:

- budowy optycznych systemów pomiarów i automatyzacji,
- optycznych metod badań i kontroli.

ZTO prowadzi również liczne zajęcia dla innych specjalności wydziałowych i pozawydziałowych, studiów zaocznych i doktoranckich. Uwzględniając współczesne trendy naukowe, w których fotonika odgrywa coraz większą rolę na Wydziale Mechatroniki wprowadzono w bieżącym roku akademickim wydziałowy

przedmiot Podstawy Fotoniki (V semestr, wykład i laboratorium) opracowany i prowadzony przez pracowników ZTO. Równocześnie kadra profesorska Zakładu opracowała wykład o tym samym tytule dla wprowadzonych na rynek edukacyjny przez trzy Wydziały PW (Mechatronika, Elektryczny i Elektroniki i Technik Informatycznych) studiów internetowych.

### Literatura

- [1] K. Patorski Instytut Mikromechaniki i Fotoniki „Mechatronika wczoraj i dziś. 35-lecie Wydziału”, Oficyna Wydawnicza PW, Warszawa 1997.
- [2] M. Kujawińska, L. Sałbut „Interferometria laserowa”, Mat. IV Szkoły-Konferencji Metrologia Wspomagana Komputerowo MWK'99, t. 1, 11-58, 1999.
- [3] M. Kujawińska „Interferometria laserowa - stan aktualny i prognoza rozwoju”, Mat. V Szkoły-Konferencji Metrologia Wspomagana Komputerowo MWK'01, t. 1, 101-116, 2001.
- [4] M. Kujawińska „Hybrid Methods of acquisition and analysis of 3D shape information”, Opto-Electronics Review, 9, 229-237, 2001.