



Politechnika Wroclawska

Wydział Elektroniki

# Laserowy układ do dokładnych pomiarów przestrzennych

Marcin Bielenin

Rozprawa doktorska

Promotor:

prof. dr hab. inż. Romuald Nowicki

Wrocław 2009

## SPIS TREŚCI

Wstęp.....	4
<b>1. Analiza metod pomiarowych błędów maszyn.....</b>	<b>6</b>
1.1. Wprowadzenie.....	6
1.2. Współczesne przyrządy oraz metody pomiarowe stosowane w przemyśle do pomiaru błędów geometrycznych oraz błędów posuwu maszyn.....	6
1.2.1. Liniały optyczne. Budowa. Zasada działania. Parametry.....	7
1.2.2. Sondy stykowe. Budowa. Zasada działania. Parametry.....	16
1.2.3. Współrzędnościowe maszyny pomiarowe i centra obróbcze.....	20
1.2.4. Interferometry laserowe. Budowa. Zasada działania. Parametry.....	27
1.2.5. Metody pomiarowe wykorzystujące interferometr laserowy: .....	42
- pozycjonowanie,	
- pomiar prostoliniowości (metoda uchyleń kątowych),	
- pomiar płaskości,	
- pomiar prostopadłości,	
- metoda wektorowa firmy Optodyne.	
1.2.6. Inne metody pomiaru przemieszczenia: .....	45
- „ballbar” laserowy,	
- pomiar przemieszczenia detektorem kwadrantowym,	
- pomiar przemieszczenia detektorem typu PSD.	
Literatura .....	52
<b>2. Analiza metod stabilizacji częstotliwości i mocy laserów He-Ne na potrzeby interferometrii przemysłowej.....</b>	<b>54</b>
2.1. Wprowadzenie.....	54
2.2. Czynniki wpływające na stałość częstotliwości wiązki laserowej lasera He-Ne.	56
2.3. Przegląd i porównanie metod stabilizacji częstotliwości i mocy laserów He-Ne.	59
2.3.1. Bierna stabilizacja częstotliwości.....	59
2.3.2. Aktywna stabilizacja częstotliwości: .....	59
- stabilizacja na centrum krzywej wzmocnienia,	
- rezonator bierny jako dyskryminator częstotliwości,	
- stabilizacja częstotliwości dwumodowego lasera He-Ne w oparciu o równowagę mocy dwóch modów. Stabilizacja lasera He-Ne z wykorzystaniem rozszczepienia „Zeemanowskiego” modu głównego lasera He-Ne.	
2.4. Sposób oceny stałości i powtarzalności częstotliwości wiązki laserowej laserów He-Ne. ....	67
Literatura .....	69
<b>3. Ciekłe kryształy. ....</b>	<b>72</b>
3.1. Wprowadzenie.....	72
3.2. Fazy ciekłych kryształów.....	75
3.2.1. Faza smektyczna.....	75
3.2.2. Faza cholesteryczna.....	77
3.2.3. Faza nematyczna ciekłego kryształu. ....	77
3.2.4. Zasady przejść fazowych w ciekłych kryształach.....	78
3.2.5. Efekt skręconego nematyka. Budowa komórki z kryształem TN.....	81
3.3. Smektyki ferroelektryczne.....	83
3.3.1. Wprowadzenie.....	83
3.3.2. Dielektryki ferroelektryczne. Kryształy ferroelektryczne.....	84
3.3.3. Budowa komórki z kryształem SSFLC.....	86
Literatura.....	91

<b>4.</b>	<b>Interferometr z komórką ciekłokrystaliczną do dokładnych pomiarów przestrzennych.....</b>	<b>94</b>
4.1.	Wprowadzenie.....	94
4.2.	Idea pomiaru przestrzennego.....	95
4.3.	Interferometr laserowy He-Ne o długości fali 632,8nm z komórką ciekłokrystaliczną oraz detektorem kwadrantowym do dokładnych pomiarów przestrzennych.....	96
	- schemat blokowy interferometrycznego systemu pomiarowego,	
	- układ stabilizacji stabilizacja lasera He-Ne w oparciu o równowagę dwóch składowych wiązki laserowej,	
	- układ detekcji prążków interferencyjnych,	
	- układ pomiarowy położenia wiązki laserowej,	
	- mikroprocesorowy układ zliczania prążków interferencyjnych, pomiaru wielkości środowiskowych oraz komunikacji z komputerem PC.	
4.4.	Oprogramowanie systemu laserowego do dokładnych pomiarów przestrzennych.....	131
	Literatura.....	137
<b>5.</b>	<b>Analiza czynników mających wpływ na wynik pomiaru.....</b>	<b>138</b>
5.1.	Wprowadzenie.....	138
5.1.	Analiza czynników mających wpływ na wynik pomiaru.....	138
5.1.1.	Badania stałości i odtwarzalności częstotliwości opracowanej głowicy interferometru laserowego.....	139
5.1.2.	Analiza czynników wynikających z błędu lokalizacji plamki na detektorze.....	147
	Literatura.....	156
<b>6.</b>	<b>Podsumowanie.....</b>	<b>157</b>

## Wstęp

Od początku cywilizacji człowiek wykorzystywał swoje zmysły do oceny (pomiaru) cech otaczających go przedmiotów oraz zdarzeń. Subiektywna (osobnicza) ocena powodowała jednak bardzo duże rozbieżności w wynikach pomiarów. Wraz z rozwojem technologicznym proste wzorce, np.: łokieć, stopa zostały zastąpione przez bardziej dokładne przyrządy pomiarowe: przymiary, linijki, kątomierze, wagi szalkowe, itd. Zakres mierzonych wielkości poszerzał się wraz z konstrukcją nowych przyrządów pomiarowych, jednocześnie zwiększając dokładność pomiaru. Zostały ustalone i ustandaryzowane wzorce różnych wielkości. Szybki rozwój techniki pomiarowej nastąpił z początkiem XX wieku wraz z rozwojem elektroniki i optoelektroniki. Kolejnym czynnikiem był rozwój techniki cyfrowej i pojawienie się mikroprocesora. Obecnie do funkcjonowania i rozwoju techniki oraz technologii wykorzystywane są przeróżne przyrządy pomiarowe oraz wzorce, działające w oparciu o rozmaite zjawiska fizyczne. Ponieważ optyczne przyrządy pomiarowe należą do najbardziej precyzyjnych instrumentów w metrologii, zajmują one ważne miejsce w metrologii jako nauce oraz w przemyśle:

- w zakresie pomiarów geometrycznych maszyn (również sterowanych numerycznie), tj.: kontrola przemieszczenia, prędkości ruchu, liniowości, płaskości, prostoliniowości, prostokątności, itp., jako system diagnostyczny, kalibrujący bądź też kompensacyjny,
- w zakresie kontroli jakości różnych produktów (kontrola jakości geometrii).

Do tych celów stosuje się, między innymi, metodę opartą na zjawisku interferencji światła ze względu na proste sposoby detekcji wyniku pomiaru. Koniecznym warunkiem wystąpienia interferencji jest koherencja (spójność) interferujących ze sobą fal. Pojawienie się w latach 60-tych XX wieku źródła spójnego światła w postaci lasera spowodowało szybki rozwój przeróżnych przyrządów pomiarowych do zastosowań przemysłowych wykorzystujących zjawisko interferencji, umożliwiających pomiar przemieszczeń z rozdzielczością i dokładnością rzędu kilku mikrometrów w warunkach przemysłowych na dystansie sięgającym kilkudziesięciu metrów. Współczesne interferometry laboratoryjne zapewniają rozdzielczości rzędu dziesiątek nanometrów i dokładność pojedynczych nanometrów. Dokładność tak jest niezbędna przy pozycjonowaniu np.: „wafla” krzemowych (oraz z innych materiałów) przy produkcji układów i elementów półprzewodnikowych lub pozycjonowania narzędzi w mikrobiologii.

W interferometrii laserowej długość fali źródła światła jest wielkością wzorcową i stanowi jednostkę przemieszczenia.

W 1983 roku Międzynarodowy Komitet Miar i Wąg (CIPM) określił źródła promieniowania, które mogą być użyte jako wzorce częstotliwości. Jednym z nich jest promieniowanie lasera He-He stabilizowanego na linii absorpcyjnej jodu  $^{127}\text{I}_2$ . Dla zastosowania takiego lasera jako wzorca odniesienia w pomiarach długości wymagana jest dokładność odtwarzania długości fali rzędu  $5 \cdot 10^{-12}$  [2.11]. W warunkach nie laboratoryjnych, ze względu na dyspersję ośrodka, w którym propagowana jest wiązka pomiarowa, dokładność pomiaru jest ograniczona do około  $1,5 \mu\text{m}/\text{m}/^\circ\text{C}$  co pozwala stosować mniej dokładne ale prostsze sposoby stabilizacji źródła o zmianach częstotliwości nie gorszych niż kilka razy  $10^{-8}$  Hz [2.11] (w przemyśle<sup>1</sup> wystarczająca jest stałość częstotliwości rzędu  $1,5 \cdot 10^{-7}$  Hz).

Oprócz wymagań postawionych przez CIPM laser stosowany do badania układów interferometrów powinien charakteryzować się zwartą konstrukcją umożliwiającą łatwe przenoszenie, oraz zapewniającą długą pracę bez konieczności ponownego justowania.

---

<sup>1</sup> Dotyczy pomiarów dokładności maszyn obróbczych i współrzędnościowych maszyn pomiarowych. Przemysł układów półprzewodnikowych wymaga większych dokładności, ale same pomiary przemieszczenia realizowane są w próżni przez co pozbawione są wpływu czynników środowiskowych.

Jednocześnie laser wzorcowy powinien być łatwy w obsłudze i maksymalnie zautomatyzowany, aby zmniejszyć błędy wynikłe z pracy operatora,.

Przyjęcie długości fali jako wzorca narzuca na źródło światła specjalne wymagania. Źródło musi generować falę o stałości częstotliwości takiej, aby jej zmiany nie wpływały na dokładność pomiarową interferometru (dokładność pomiaru).

Mierzone przemieszczenie jest krotnością długości fali. Podstawowa rozdzielczość laserowych interferometrów dwuczęstotliwościowych wynosi  $\lambda/4$  a laserowych interferometrów jednoczęstotliwościowych  $\lambda/8$ . Stosując techniki zwielokrotniania częstotliwości lub interpolacji amplitudy uzyskuje się rozdzielczości pomiarowe sięgające  $0,1\text{nm} \sim \lambda/5000$ . Osiągnięcie rozdzielczości pomiarowych tego rzędu wprowadziło pojęcie nano-interferometrii laserowej do techniki pomiarowej.

Istnieją dwa parametry ściśle opisujące jakość źródła do zastosowań w interferometrii: stałość częstotliwości oraz powtarzalność częstotliwości. Wielkość długookresowej powtarzalności częstotliwości dla interferometru przemysłowego nie powinna być gorsza niż kilka razy  $10^{-8}$  Hz [2.16].

Wymagane parametry spełniają jedno-, półtora- oraz dwudomowe lasery He-Ne małej mocy przy stabilizacji wykorzystującej równowagę mocy (natężeń) dwóch składowych (lub modów podłużnych) promieniowania.

W klasycznym układzie porównania składowych (modów) promieniowania, ze względu na różne drogi optyczne oraz zmiany charakterystyk elementów składowych układu stabilizacji następuje kumulowanie się błędu sygnału dyskryminującego i dryft (lub oscylacje) częstotliwości generacji źródła światła. Dryft ten może być bardzo wolny i trudny do oszacowania [2.16],[2.17].

Źródło światła dla interferometru, którego częstotliwość zmienia się w czasie będzie wprowadzać błąd do pomiaru przemieszczenia.

Autor zaproponował nowy sposób podejścia do problemu stabilizacji częstotliwości lasera przez modyfikację układu stabilizacji laserów He-Ne wykorzystujących równowagę mocy (natężeń) dwóch składowych (lub modów podłużnych) promieniowania. Metoda wykorzystuje elementy optoelektroniczne w postaci komórek z ferroelektrycznym ciekłym kryształem. Specjalnie dobrany typ kryształu [Rozdział 2, 3, 4] umożliwia konstrukcję przełączanej płytki półfalowej, bądź też ćwierćfalowej. Element tego typu w układzie stabilizacji częstotliwości lasera pozwala na scalenie dwóch torów pomiarowych, wyeliminowanie błędu sygnału dyskryminującego i tym samym poprawę jakości samego źródła. Dodatkowym autem jest uproszczenie konstrukcji.

Badanie maszyn obróbczych i pomiarowych pod względem dokładności ma za zadanie wykrycie źródeł błędów w celu ich skompensowania. Wykrycie źródeł niedokładności i ich składowych jest bardzo istotne przy instalowaniu nowo zakupionej maszyny jak również przy zmianie jej usytuowania czy regeneracji.

Większość współrzędnościowych maszyn pomiarowych to urządzenia o znacznych gabarytach i składających się dużej liczby elementów. Każdy z tych elementów posiada swój błąd, który w pewien określony sposób wpływa na prace każdej maszyny. Dla każdej osi maszyny można wyznaczyć sześć błędów składowych: trzy rotacyjne, dwa błędy prostoliniowości oraz błąd pozycjonowania liniowego. W przypadku maszyny o trzech osiach dochodzą jeszcze trzy błędy prostopadłości osi. Większość z wymienionych błędów można zmierzyć za pomocą interferometru laserowego i odpowiedniego układu optycznego. Pomiaru jednak wymagają bardzo dużej ilości czasu. Ponieważ maszyna w tym czasie nie pracuje powoduje to wzrost kosztów dla producenta i w konsekwencji wzrost ceny produktu końcowego.

Zbudowany przez autora prototyp układu wykorzystuje interferometr laserowy stabilizowany na równowagę mocy dwóch polaryzacji rozszczepionego w wyniku efektu Zemana modu jednodomowego lasera He-Ne. W wyniku tego efektu wiązka promieniowania lasera umieszczonego we wzdluznym, stalym polu magnetycznym ulega rozszczepieniu na dwie skladowe o polaryzacjach kolowych i wzajemnie przeciwnych. Różnica częstotliwości zwana częstotliwością zeemanowską (lub Zeemana) jest zależna od wielkości pola magnetycznego (0.5 - 3MHz dla pól 3 – 100mT; laser semi-dwumodowy He-Ne 1mW, ~633nm). Różnica częstotliwości zeemanowskiej toru referencyjnego oraz częstotliwości zeemanowskiej zmienionej przez efekt dopplera w torze pomiarowym, w trakcie pomiaru, pozwala na pomiar przemieszczenie w jednej osi z mikrometrową dokładnością.

Autor zaproponował zastosowanie układu detektora cztero-polowego w połączeniu z pół-falowym kryształem ferroelektrycznym bądź też nematycznym (jako przełączany o 90° polaryzator) do detekcji pozycji wiązki.

Scalenie ww. układu i interferometru laserowego umożliwia jednoczesny pomiar przemieszczenia w trzech osiach [**Rozdział 1, Rozdział 4**] i redukcje czasu potrzebnego na pomiar błędów maszyny obróbczej lub pomiarowej.

Autor określił cele swojej pracy oraz postawił tezę następującej treści:

### **Cel pracy:**

Opracowanie metody pomiarowej i prototypu urządzenia do szybkiego określania dokładności pozycjonowania maszyn w przestrzeni.

### **Teza pracy:**

Zastosowanie detektora kwadrantowego wraz z komórką ciekłokrystaliczną w układzie ze stabilizowanym zeemanowsko laserem He-Ne umożliwia pomiar położenia punktów w przestrzeni z dokładnością nie gorszą niż  $\pm 5\mu\text{m}$ .

Rozdział pierwszy dysertacji zawiera przegląd metod pomiarowych przemysłowych maszyn skrawających oraz współrzędnościowych maszyn pomiarowych. Przedstawiono w nim zarówno metody klasyczne z liniałami optycznymi, sondami dotykowymi, jak również nowoczesne metody z wykorzystaniem interferometru. Omówiono w nim również czynniki wpływające na błędy poszczególnych technik pomiarowych.

Rozdział drugi dysertacji przedstawia literaturowy przegląd metod stabilizacji częstotliwości i mocy laserów He-Ne na potrzeby interferometrii przemysłowej. Zamieszczono w nim sposób oceny stałości i powtarzalności częstotliwości laserów He-Ne.

Rozdział trzeci stanowi streszczenie podstawowych zagadnień związanych z konstrukcją układów wykorzystujących ciekłe kryształy. Omówione zostały właściwości, parametry i zastosowania kryształów ferroelektrycznych. Przedstawione zostały poszczególne fazy krystaliczne oraz zasady przejść fazowych.

Rozdział czwarty zawiera opis konstrukcji elektro-mechanicznej „Zeemanowskiego” interferometru laserowego z układem do dokładnych pomiarów przestrzennych. W rozdziale tym omówiono elektroniczną pętlę stabilizacji częstotliwości lasera oraz układu detekcji pozycji wiązki.

Rozdział piąty zawiera ocenę jakościową zaproponowanego rozwiązania. Omówiono źródła błędów wpływające na wynik pomiaru oraz oszacowano dokładność pomiarową skonstruowanego prototypu przyrządu pomiarowego.

Rozdział szósty zawiera podsumowanie prac nad układem do dokładnych pomiarów pozycji w przestrzeni.

# 1

## Analiza metod pomiarowych błędów maszyn

### 1.1. WPROWADZENIE

Odkąd rozpoczęto przemysłową produkcję wyrobów technicznych, wymagania związane z pomiarami i sprawdzaniem geometrii wyrobów nabierały coraz większego znaczenia. Pierwsze maszyny parowe produkowane przez J.Watta od 1769 roku miały tolerancje wykonania mierzone w milimetrach. Jedynym końcowym kryterium było działanie urządzenia. W związku z bardzo dużą tolerancją wymiarów i stosowanym, wówczas, kryterium sprawdzania jakości, często się zdarzało, że elementy z jednego egzemplarza nie pasowały do drugiego, itd. Kiedy w 1785 roku wprowadzono obrabiarki do przemysłu, zamienność części zapasowych i zgodność geometrii wyrobów nabrała większego znaczenia. Zaczęto wykonywać przedmioty z dokładnością do dziesiątych części milimetra.

Dalszy rozwój skomplikowanych maszyn technologicznych z jeszcze mniejszymi tolerancjami wymiarów wyrobów wynika z konieczności integracji procesu technologicznego (obróbczego) z pomiarami błędów wykonania [1.22]. W dalszej części pracy omówię najbardziej zaawansowane techniki pomiarowe i przyrządy pomiarowe stosowane w przemyśle. Rozważania będą dotyczyć rozwiązań, które można zastąpić w całości lub częściowo w procesie pomiarowym interferometrem laserowym lub wymagają interferometru laserowego w procesie kalibracji przyrządu.

#### 1.2.1.1. WSPÓŁCZESNE PRZYRZĄDY I METODY POMIAROWE STOSOWANE W PRZEMYŚLE DO POMIARU BŁĘDÓW GEOMETRYCZNYCH ORAZ BŁĘDÓW POSUWU MASZYN.

O konieczności rozwoju techniki pomiarowej oraz potrzebie tworzenia zarówno nowych metod pomiarowych jak i doskonalenia obecnych świadczy istnienie dużej ilości firm zajmujących się produkcją przyrządów pomiarowych dla przemysłu. Do kontroli (kalibracji) pracy maszyny obróbczej czy kontroli jakości produktu stosowane są przeróżne systemy pomiarowe. Niestety nie ma uniwersalnego przyrządu pomiarowego umożliwiającego pomiar wszystkich błędów posuwu (oraz innych), jakimi charakteryzuje się maszyna czy pomiaru tolerancji wykonania każdego produktu, o dowolnym kształcie. Z powodu ograniczonej funkcjonalności pojedynczego przyrządu pomiarowego produkowana jest cała gama specjalizowanych przyrządów pomiarowych przeznaczonych do pomiarów konkretnych błędów maszyny lub konkretnych wymiarów produktów. Obecnie najbardziej popularne (oraz najtańsze) są wszelkiego rodzaju przyrządy wykorzystujące zjawisko interferencji dwóch fal, głównie światła widzialnego. Do tej grupy można zaliczyć: interferometry laserowe (homodynamiczne oraz heterodynamiczne) oraz niektóre enkodery liniowe oraz obrotowe (liniały optyczne, optyczne enkodery obrotowe). Czasem ze względu na ograniczenia

technologiczne stosuje się „analogowe”<sup>1</sup> systemy pomiarowe: dalmierze laserowe, wibrometry, systemy pomiaru wykorzystujące przetworniki PSD (Position Sensor Detektor), detektory wielosegmentowe (kwadrantowe oraz CCD).

Najbardziej zaawansowanym przyrządem pomiarowym do pomiarów przestrzennych jest współrzędnościowa maszyna pomiarowa [WMP; **Rozdział 1.2.3**]. Sercem WMP są: wzorce pomiarowe oraz sonda stykowa [**Rozdział 1.2.2**] lub optyczne układy skanujące.

### 1.2.1. LINIAŁY. BUDOWA. ZASADA DZIAŁANIA. PARAMETRY.

Liniały metrologiczne (pomiarowe) stosowane są w różnych zastosowaniach od czasów zdefiniowania pierwszych jednostek długości (łokiec, stopa, cal, metr, itp.)

Obecnie w metrologii jako wzorcowy przybór pomiarowy zakłada się przyrząd pomiarowy odtwarzający odcinek linii prostej, kąt lub płaszczyznę o bardzo dużej precyzji wykonania. Niektóre posiadają naniesioną podziałkę, aby można było odczytać zmierzoną wartość.

Do wzorcowania systemów pomiarowych (laserowych oraz innych; mechanicznych) wykorzystuje się zarówno metalowe wzorce długości jak i grubości oraz kąta. Najprostszymi wzorcami długości są płytki wzorcowe, zdefiniowane w normie PN-EN ISO 3650.

Od roku 1983 jako wzorec długości może być użyty laserowy wzorec częstotliwości (np.: promieniowanie lasera He-He stabilizowanego na linii absorpcyjnej jodu  $^{127}I_2$ ; wymagana dokładność odtwarzania długości fali rzędu  $5 \cdot 10^{-12}$  [**2.11**]).

Oczywiście wzorec o takiej dokładności nie jest wymagany w każdym zastosowaniu. Wykorzystuje się je raczej do wzorcowania innych przyrządów oraz wzorców o niższej dokładności. Dodatkowym ograniczeniem jest wrażliwość na warunki środowiskowe, oraz koszt produkcji.

Alternatywą dla wzorca długości stabilizowanego na linii absorpcyjnej jodu  $^{127}I_2$  są interferometry laserowe i liniały optyczne.

Działanie liniałów (enkoderów kątowych) polega na zliczaniu przetworzonych sygnałów elektronicznych pochodzących z detektorów dekodujących podziałkę liniową naniesioną na wzorec (przymiar) [rysunek **Rys.1.2.1**]. Każdy impuls (okres) definiuje konkretną długość, która jest zależna od typu liniału. W najprostszym przypadku impulsy są kierowane do liczników z wyświetlaczem, gdzie można odczytać bieżącą wartość przesunięcia.

Ze względu na wartość mierzoną (liniałów optycznych oraz enkoderów obrotowych) możemy podzielić przymiary na dwie podstawowe grupy:

- tarczowe – odmierzające wartość kąta,
- liniowe – odmierzające wartość długości.

---

<sup>1</sup> Jako system analogowy w tym przypadku rozumie się system, w którym wzorcem długości nie jest długość fali tylko napięciowe lub prądowe źródło odniesienia bądź też oscylator o małej stałości częstotliwości (rzędu:  $10^{-5}$  lub mniej).



Kolejny podział wynika ze sposobu odczytu aktualnej pozycji i naliczania kroku pomiarowego:

- inkrementalne,
- kodowe,
- inkrementalno- kodowe,
- inkrementalne - interferencyjne.

Ostatni podział wynika bezpośrednio z wykorzystanego zjawiska fizycznego [1.10]:

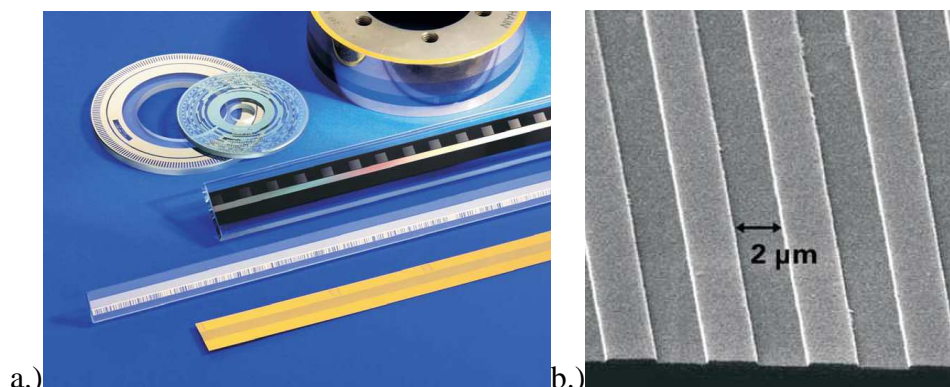
- **optyczne** - wzorzec w postaci liniału z ciemnymi i jasnymi polami ułożonymi na przemian, o okresie w przedziale  $0,25 \div 100 \mu\text{m}$  (niepewność  $2 \div 3 \mu\text{m}/1\text{m}$  przy rozdzielczości  $1 \mu\text{m}$ ),
- **elektromagnetyczne** – (*induktosynowe*) wykorzystują zjawisko indukcji magnetycznej, powstające pomiędzy uzwojeniami suwaka i linii w postaci meandrów o okresie  $2 \div 4 \mu\text{m}$  (niepewność w zakresie  $3 \div 5 \mu\text{m}/1\text{m}$ , również w oparciu o efekt Halla i magneto-rezystancyjne. Ze względu na konieczność wykonania precyzyjnych uzwojeń na suwaku i liniale, przyrządy tego typu są często bardzo krótkie. Rozdzielczość takiego przyrządu jest zwiększana głównie przez interpolację.
- **pojemnościowe** – podstawowym elementem pomiarowym jest kondensator różnicowy.

Ze względu na bardzo dobre parametry, możliwość rozbudowy oraz opanowaną technologię produkcji, najczęściej stosowane są przyrządy z elektrooptycznym układem odczytu skali.

Stosowane są dwa rozwiązania układowe optycznych liniałów:

- **transmisyjne** – pracujące w oparciu o światło przechodzące,
- **refleksyjne** – pracujące w oparciu o światło odbite.

Liniały optyczne (szklane, metalowe) są pewną odmianą wzorców kreskowych. Charakteryzują się naniesionymi strefami, na przemian: aktywnymi i pasywnymi, oraz układem elektrooptycznym do odczytu skali.



**Rys. 1.2.1. a.) Wzorce długości, kąta wykonane na metalu, szkle, ceramice lub materiałach kompozytowych (np.: ZERODUR [1.06], inwar [1.24]). b.) Wzorzec wykonany przez naniesienie na podłoże(ności) warstwy chromu [1.06].**

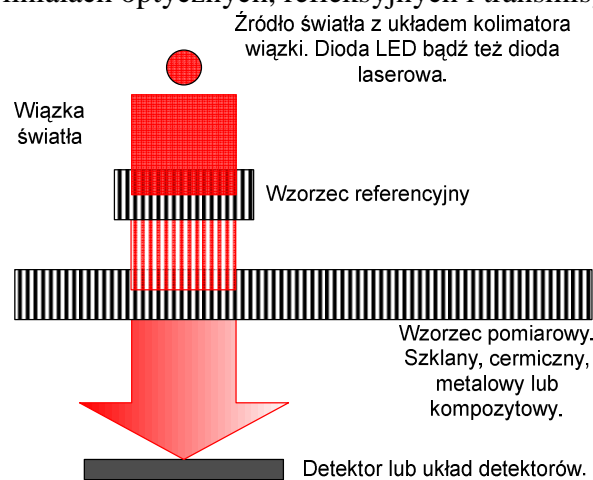
Strefy aktywne są nanoszone w różnych, zależnych od potrzeb i zastosowania, procesach foto-litograficznych:

- chromowych warstw na szkło,
- złotych obszarów na wytrawione szczeliny w stali,
- nanoszenie grubych warstw metalu (na szkło lub stal nierdzewną).

Wykorzystywane obecnie procesy pozwalają na uzyskanie jednorodnych warstw i w konsekwencji sygnałów o bardzo dobrej jakości. Firma Heidenhain wykonuje wzorce o kroku od  $2,048 \mu\text{m}$  do około  $100 \mu\text{m}$  [1.06], [1.10]. Wzorce ze stali nierdzewnej oferują rozszerzalność rzędu  $10 \mu\text{m}/^\circ\text{C}/\text{m}$ , ale za to osiągają długość 30 metrów. Wzorce szklane z

rozszerzalnością około  $1\mu\text{m}/^\circ\text{C}/\text{m}$  oferują zasięg do około 3 metrów. Podobnie inwar: średni współczynnik rozszerzalności cieplnej w zakresie temperatur od 20 do  $100^\circ\text{C}$  jest mniejszy niż  $1,3 \cdot 10^{-6} \text{m}/^\circ\text{C}/\text{m}$ . W najlepszych wzorcach stosuje się jako nośnik materiały kompozytowe jak Zerodur, które posiadają bardzo małe współczynniki rozszerzalności cieplnej (Zerodur:  $\alpha=0,05 \pm 0,1 \cdot 10^{-6} \text{m}/^\circ\text{C}/\text{m}$ ) oraz dużą odporność na starzenie. Długości wzorców z materiałów kompozytowych nie przekraczają 100cm.

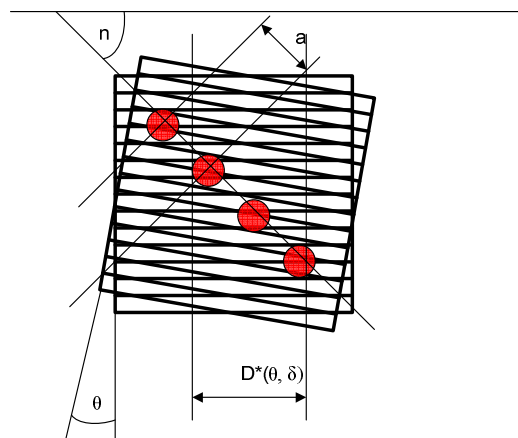
Najprostszy liniał pomiarowy zbudowany jest w ten sposób, że z jednej strony wzorca umieszczone jest źródło światła, z drugiej czujnik (np.: fotodetektor lub grupa fotodetektorów; można wykorzystać również światło odbite). Przesuwając liniał można zliczać impulsy. Znając liczbę impulsów i długość stref aktywnej i pasywnej, możemy określić odległość. Wzorce tego typu są zwane inkrementalnymi. Aby poprawić parametry sygnału pomiarowego stosuje się często dodatkowy wzorec referencyjny (odniesienia) [Rys.1.2.2], [Rys.1.2.4] (w liniałach optycznych, refleksyjnych i transmisyjnych).



**Rys.1.2.2. Optoelektroniczny układ pomiarowy wzorca liniowego.**

Często wzorec referencyjny jest skreślony względem wzorca pomiarowego o pewien kąt  $\theta$ . Występuje w tym przypadku zjawisko Moire'a, które powstaje w wyniku nałożenia na siebie dwóch siatek dyfrakcyjnych o podobnych odległościach prążków siatek  $D$  [Rys.1.2.3]. Skreślenie siatek o kilka minut powoduje powstanie prążków Moire'a. Uzyskane sygnały z czterech detektorów są przesunięte względem siebie o  $90^\circ$ , gdy spełniony jest warunek:

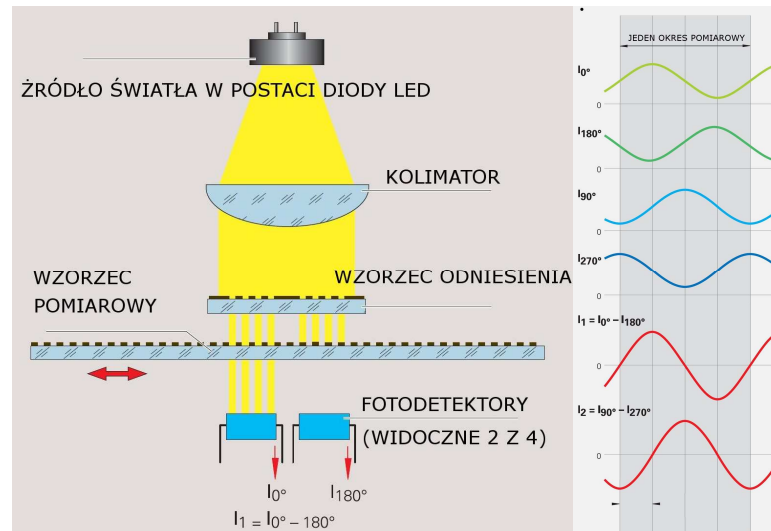
$$\cos(n) \cdot D(\theta, \delta) = 4a \quad (1.2.1)$$



**Rys.1.2.3. Metoda odczytu optoelektronicznego, inkrementalnego wzorca z wykorzystaniem efektu Moire'a [1.06], [1.10].**

gdzie:  $n$  - kąt skręcenia fotodetektorów,  $D(\theta, \delta)$  – stała prążków Moire'a,  $\theta$  – kąt skręcenia płytki wzorca referencyjnego,  $\delta$  – parametr określający zbieżność kolimatora (obiektywu),  $a$  – odległość pomiędzy detektorami.

Oprócz układów odczytu wykorzystujących efekt Moire'a stosowane są jeszcze układy ze specjalnie skonstruowanym wzorcem referencyjnym. Jest on „podzielony” na cztery obszary tak, że prążki (skala) w każdym z obszarów są przesunięte o  $90^\circ$ .



**Rys.1.2.4. Optoelektroniczny układ pomiarowy wzorca liniowego oraz uzyskane z detektorów pomiarowych sygnały definiujące przysunięcie ( $I_{180^\circ}, I_{270^\circ}, I_{0^\circ}, I_{90^\circ}$ ) [1.06].**

W obu przypadkach uzyskuje się cztery sygnały pomiarowe przesunięte względem siebie o  $90^\circ$  ( $I_{180^\circ}, I_{270^\circ}, I_{0^\circ}, I_{90^\circ}$ ). Pary sygnałów, które są przesunięte względem siebie o  $180^\circ$ , są podawane na wzmacniacze różnicowe. Efektem tej operacji są dwa sygnały sinusoidalne przesunięte względem siebie w fazie o  $90^\circ$ . Istnienie dwóch sygnałów sinusoidalnych pozwala na detekcję kierunku ruchu wzorca pomiarowego (najczęściej wzorec jest nieruchomy a nad nim jest przesuwany czytnik). Taki format danych jest wśród producentów pewnym standardem i pozwala na częściową zgodność podzespołów niektórych maszyn stosowanych w przemyśle.

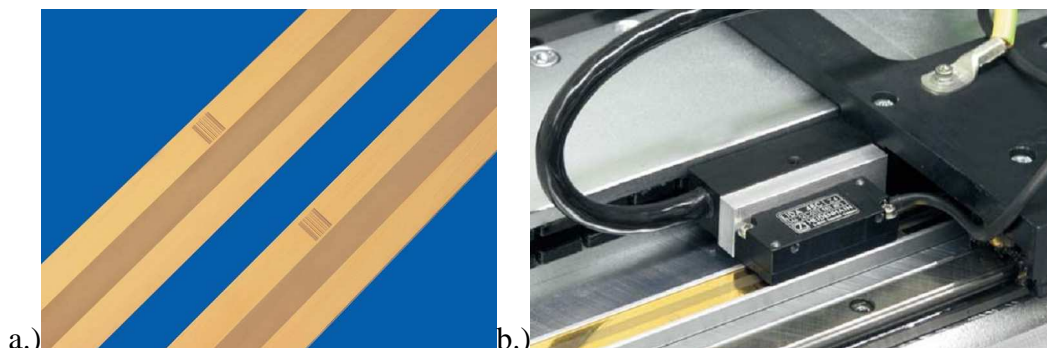
Niektóre liniaty bądź enkodery obrotowe posiadają dodatkowo wzorce absolutne. Aktualna wartość jest kodowana kodem binarnym, BCD, Graya, Watta itp. [1.10].



**Rys.1.2.5. Wzorce absolutne kąta (po lewej stronie) oraz inkrementalne (po prawej stronie). Heidenhain [1.06].**

Wykorzystując wzorce inkrementalne wyznacza się tylko względną jednostkę długości (przesunięcia). Niemożliwe jest określenie pozycji absolutnej. Aby wyeliminować tę niedogodność wprowadzono dodatkowy znacznik definiujący początek wzorca (wymagany

dodatkowy detektor). Na tej podstawie można określić bezwzględnie odmierzoną wartość. Często dla ułatwienia wprowadza się dodatkową skalę o zdefiniowanym kroku, znacznie większym od kroku inkrementalnego wzorca podstawowego. Takie „bezwzględne” znaczniki w wielu konkretnych przypadkach pomiarowych pozwalają na znaczne skrócenie pomiaru przez uproszczenie procedury pomiarowej.



**Rys.1.2.6. a.) Wzorec inkrementalny firmy Heidenhain ze znacznikiem bezwzględnej odległości [1.06]. b.) Ten sam wzorec w układzie maszyny pomiarowej.**

Określenie dokładnej pozycji w takim wzorcu jest niestety bardziej skomplikowane niż w przypadku wzorców „tylko” inkrementalnych. Konieczne jest zaimplementowanie odpowiedniej procedury przeliczającej, wiążącej skalę bezwzględną i względną.

Najbardziej zaawansowaną metodą odczytu informacji ze wzorców liniałów jest metoda interferometryczna. Rozwiązanie to wykorzystuje zjawiska zarówno dyfrakcji światła jak i interferencji<sup>2</sup>.

Z definicji dyfrakcja to ugięcie fal na krawędzi przeszkody (np.: otworu), powodujące przenikanie ruchu falowego w obręb cienia za przeszkodą (lub szczeliną). Zaburzone jest w ten sposób prostoliniowe rozchodzenie się np.: promieni świetlnych. Dyfrakcję w prosty sposób tłumaczy zasada Huygensa - Fresnela, w myśl której każdy punkt przestrzeni, do którego dociera płaska fala, staje się źródłem elementarnej fali sferycznej, przy czym nie uwzględnia się fali wstecznej. Fale te następnie interferują ze sobą, tworząc nowe czoło fali. Interferujące ze sobą fale tworzą charakterystyczne wzory w postaci prążków o na przemian maksymalnej i minimalnej wartości natężenia światła.

Każdy element wzorca inkrementalnego jest, więc przeszkodą w rozumieniu zjawiska dyfrakcji światła. Rozwijając dalej eksperyment, można stwierdzić, że wzorec (liniał optyczny) jest siatką dyfrakcyjną, czyli szeregiem przeszkód dla czoła fali płaskiej.

Konstrukcja interferometrycznej głowicy odczytującej będzie zależeć od odległości pomiędzy prążkami dyfrakcyjnymi, czyli od odległościami pomiędzy elementami samej siatki dyfrakcyjnej oraz długością użytej fali światła.

Wzór na wartość natężenia światła w funkcji kąta odchylenia (od wiązki nieodchylonej) ma postać:

$$I(\alpha) = I_0 * \left(\frac{\sin(\alpha)}{\alpha}\right)^2 * \left(\frac{\sin(N\psi)}{\sin(\psi)}\right)^2 \quad (1.2.2)$$

<sup>2</sup> Ze względów historycznych redystrybucję światła powstającą w wyniku superpozycji fal wytwarzanych przez skończoną liczbę dyskretnych źródeł spójnych, przyjęto nazywać interferencją. Redystrybucję światła powstałą w wyniku superpozycji fal wytwarzanych przez źródła spójne rozłożone w sposób ciągły (np.: szczelinę), przyjęto nazywać dyfrakcją [1.01], [1.25]

$I(\alpha)$  – natężenie światła,  $I_0$  – natężenie światła dla wiązki nie odchylonej, czyli dla kąta  $\alpha=0$ ,  $\lambda$  – długość fali,  $\Psi=\pi d/\lambda \cdot \sin(\alpha)$ ,  $d$  – szerokość szczeliny,  $N$  – ilość szczelin (przeszkód)

Warunek na powstanie minimum natężenia światła (w przybliżeniu):

$$\alpha=0^\circ \text{ lub } d \cdot \sin\alpha=(2n+1)\lambda/2 \quad (1.2.3)$$

oraz warunek na powstanie maksimum natężenia światła:

$$d \cdot \sin\alpha=n\lambda \quad (1.2.4)$$

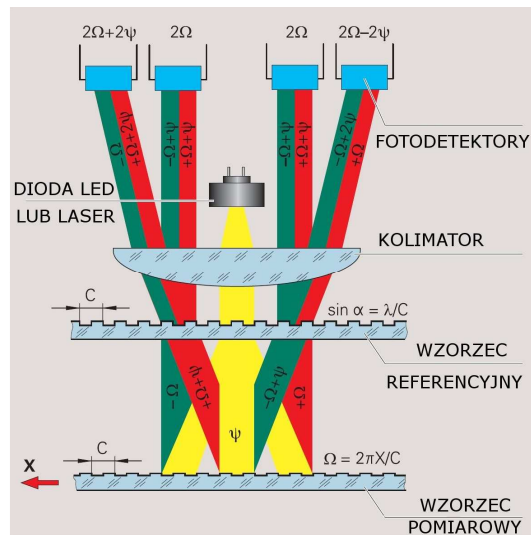
$d$  – szerokość szczeliny,  $\alpha$  – kąt,  $n$  – rząd maksimum, minimum,  $\lambda$  – długość fali

Zjawisko dyfrakcji zachodzi dla wszystkich szerokości przeszkód, ale wyraźnie jest obserwowalne dla przeszkód o rozmiarach porównywalnych z długością fali.

Dla przykładu: w wyniku dyfrakcji światła na przeszkodzie (szczelinie) o szerokości  $d \approx \lambda$  na ekranie otrzymuje się obraz dyfrakcyjny z maksimum zerowego rzędu na wprost szczeliny oraz dwa minima pod kątem  $\pm 90^\circ$  względem padającej na szczelinę wiązki światła. Jeżeli mamy przeszkodę o szerokości  $5\mu\text{m}$  i źródło światła  $632,8\text{nm}$  (np.: laser He-Ne) uzyskamy minima co  $\sim 7,3^\circ$  oraz maksima :  $0^\circ, \pm 10,4^\circ, \pm 18,1^\circ, \pm 26,1^\circ, \pm 24,5^\circ$ , itd.

Na podstawie warunków [1.2.3], [1.2.4] można wyznaczyć pozycje minimów i maksimów dla wzorca referencyjnego oraz pomiarowego w liniałach optycznych oraz wyznaczyć wielkości i odległości pomiędzy fotodetektorami a także wymaganą odległość fotodetektorów od siatki dyfrakcyjnej (wzorca).

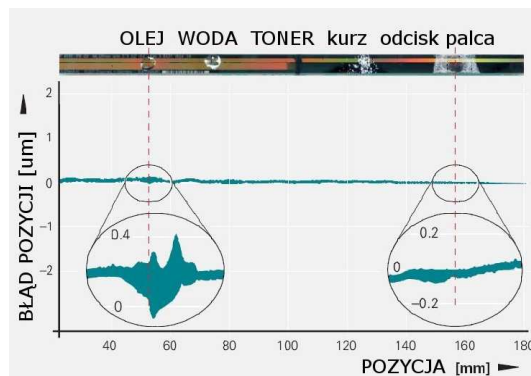
W układach stosowanych w inkrementalnych, interferometrycznych wzorcach liniowych, wiązka światła ulega trzykrotnej dyfrakcji (dwukrotnie na wzorcu referencyjnym oraz raz na wzorcu pomiarowym) [Rys.1.2.7]. Wybrane rzędy fali poddane trzykrotnej dyfrakcji interferują ze sobą i padają na fotodetektory. Otrzymujemy trzy sygnały niosące informacje o kierunku ruchu wzorca pomiarowego i o kolejnych elementach wzorca pomiarowego (naniesionej skali), czyli wartości przesunięcia. Takie interferometryczne układy skanujące wytwarzają sygnały bez wyższych harmonicznych i mogą być poddane interpolacji uzyskując znacznie wyższe dokładności pomiaru przesunięcia. Rozwiązanie to, dodatkowo, pozwoliło na zwiększenie o ponad jeden rząd rozdzielczości i dokładności pomiaru przemieszczenia.



**Rys.1.2.7. Optoelektroniczny układ interferometrycznego wzorca liniowego ( $\Psi$  – przesunięcie fazy fali przechodzącej przez wzorec referencyjny,  $\Omega$  - przesunięcie fazy fali światła spowodowanej ruchem w osi X wzorca pomiarowego [1.06].**

Rozdzielczość linii optycznych wynika z określonej długości fali promieniowania użytego źródła światła oraz użytego wzorca (może zostać zwiększona poprzez interpolację).

Dokładność pomiarowa jest ograniczana przez zmianę czynników środowiskowych, takich jak: temperatura, ciśnienie, wilgotność powietrza oraz temperatura materiału, z jakiego została wykonana maszyna pomiarowa lub mierzony przedmiot [Rozdział.1.2.5]. W przypadku linii optycznych dodatkowymi czynnikami zmniejszającymi rozdzielczość i dokładność (oraz generującymi błędy pomiaru) są: typ oraz jakość materiałów, z jakich został wykonany liniał (typ wykorzystanego przymiaru), wibracje, zabrudzenia liniału [Rys.1.2.8].



**Rys.1.2.8. Przykładowy wpływ różnego typu zabrudzeń liniału optycznego na błędy odczytu pozycji [1.06].**

Podstawowe zalety i wady liniałów optycznych:

**Za:**

- rozdzielczość porównywalna z interferometrami laserowymi, uzyskiwana głównie przez interpolację przebiegu sinusoidalnego,
- mniejsza wrażliwość na zmiany środowiskowe, zabrudzenia (dotyczy liniałów obudowanych),
- możliwość pomiaru do 30 metrów (z jednoczesnym znaczącym zmniejszeniem rozdzielczości i dokładności pomiaru),
- niższa cena systemu pomiarowego,
- możliwość automatycznej kompensacji błędów przesuwu w maszynach CMM
- osiągalne większe prędkości pomiaru.

**Przeciw:**

- system jest przeznaczony dla konkretnej maszyny oraz jest z nią zintegrowany, przez co nie jest możliwa inspekcja wielu maszyn obróbczych jednym liniałem optycznym,
- jeden liniał mierzy jedną oś. Konieczność pomiaru większej ilości osi wiąże się ze zwiększeniem kosztów,
- ograniczone zastosowania: pomiar przesunięcia lub kąta obrotu (enkodery obrotowe),
- pomiar długich osi (praktycznie powyżej 2 metrów) z bardzo dużą precyzją (rzędu  $\pm 1\mu\text{m}$ ) jest niemożliwy lub bardzo kosztowny (problemy z wykonaniem odpowiednio precyzyjnego wzorca-skali).

W tabeli **Tab.1.2.1** zamieszczono parametry kilku przykładowych liniałów optycznych różnych producentów.

Nazwa przyrządu	Typ przyrządu	Maksymalna dokładność systemu od 19°C do 21°C [ $\mu\text{m}$ ]	Zakres pomiarowy [mm]	Zastosowanie	Inne
Przymiar Heidenhain	MT 2571 (Zeroduj)	$\pm 0,2\mu\text{m}$ (d: 0,4 lub $0,2\mu\text{m}$ )	do 25mm	Kontrola produkcyjna precyzyjnych przyrządów, elementów, kalibracja przyrządów wzorcowych.	
Skala liniowa o obudowie otwartej, Heidenhain	LIF 481 (wzorzec: na szkle lub DIADUR)	$\pm 3\mu\text{m}$ (d: $0,4\mu\text{m}$ )	od 70 do 3040mm	Wiertarki obwodów drukowanych, maszyny fotokładu, precyzyjne manipulatory, maszyny pomiarowe, kontrolne	Mała dokładność i zakres pomiarowy.
Skala liniowa o obudowie zamkniętej, Heidenhain	LB 382 (wzorzec: taśma miernicza, stalowa AERODUR)	$\pm 5\mu\text{m}$ (d: $\pm 40\mu\text{m}$ )	od 440 do 30040mm	Obrabiarki erozyjne, szlifierki, frezarki, itp.)	Mała dokładność
Renishaw,	Wzorzec inwarowi RELM, $-0.6\mu\text{m}/\text{m}/\text{C}$	$\pm 1\mu\text{m}$ , kalibrowany	do 980mm		kosztowne
Skala liniowa „Linear scale” MITUTOYO	AT115	$(5+5 L_0/1000)\mu\text{m}$ (d: $20\mu\text{m}$ ), znaczniki co 50mm	od 100 do 1500 mm		
Skala liniowa BEI LINEAR	LN-24-100-PZ-C40-28V/V	$\pm 10\mu\text{m}$ (rozdzielczość: $0,5\mu\text{m}$ )	do 11m		Wzorzec w postaci wzorcowanych stalowych kulek. Odczyt magnetyczny.

**Tab.1.2.1. Zestawienie liniałów pomiarowych. Ze względu na szeroką ofertę dostępnych na rynku liniałów, ograniczono zestawienie do kilku przedstawicieli z oferty różnych producentów.**

Warto zwrócić uwagę na kluczową wadę liniałów: zależność dokładności od zakresu pomiarowego.



## 1.2.2. SONDY STYKOWE. ZASADA DZIAŁANIA. PARAMETRY.

Głowice pomiarowe (sondy) służą do lokalizacji punktów pomiarowych, które są podstawą wyznaczania wymiarów przestrzennych analizowanych przedmiotów. Są kolejnym bardzo ważnym elementem współrzędnościowych maszyn pomiarowych. Mogą być również wykorzystywane przy produkcji w centrach obróbkowych do pozycjonowania materiału lub półproduktu. Zbudowane są z charakterystycznej końcówki stykowej z rubinową kulką (lub innych materiałów zależnych od producenta; *Rys.1.2.9*, *Rys.1.2.10*), którą dotyka się przedmiot w różnych punktach. Moment dotknięcia jest sygnałem do pomiaru pozycji z przymiarów i lokalizację punktu w przestrzeni.

Główny podział sond wynika z zastosowanego zjawiska fizycznego i materiału z jakiego został wykonany mierzony przedmiot:

- *stykowe* - do przedmiotów z materiałów niesprężystych, twardych,
- *bezystykowe* - do przedmiotów wykonanych z tkaniny, gumy; sprężystych lub miękkich.

Najczęściej stosowane głowice stykowe stanowią obecnie większość rynku sond używanych w metrologii przemysłowej.

Kolejny podział sond wynika ze zmian w ich konstrukcji wprowadzanych w ciągu ostatnich trzydziestu lat, wynikających głównie z postępu w elektronice, w budowie układów elektromechanicznych, mikro-mechanice.

Najprostsze w konstrukcji (i historycznie najstarsze) są głowice stykowe sztywne. Ich trzpień jest sztywno związany z korpusem głowicy. Nie posiadają żadnych elementów elektronicznych. Mogą same stanowić część obwodu elektrycznego<sup>3</sup>. W najprostszym przypadku pomiar głowicą sztywną odbywa się przez doprowadzenie, przez operatora, końcówki sondy do styku z mierzoną powierzchnią przedmiotu. Decyzję o zaliczeniu punktu pomiarowego podejmuje operator przez przyciśnięcie przycisku zaliczającego. Odpowiedni układ zapamiętuje wtedy bieżące wartości współrzędnych z trzech liniałów optycznych maszyny pomiarowej. Pomiar taki jest bardzo trudny, ponieważ trzpień sondy odkształca się sprężysto co powoduje błędy w lokalizacji punktu pomiarowego dochodzące do kilkunastu mikrometrów [1.10]. Drugi przypadek zakłada, że operator nie dotknie końcówką sondy przedmiotu zostawiając szczelinę, co ponownie powoduje błędy w lokalizacji. Pomiar głowicami sztywnymi opiera się więc głównie na doświadczeniu osoby wykonującej pomiar.

Rozwinięciem konstrukcji głowic sztywnych są głowice impulsowe (przełączające). Dotknięcie do powierzchni mierzonego przedmiotu (z zadaną siłą, zależną od typu sondy) z dowolnej strony powoduje rozwarcie jednego z trzech styków (rozłożonych co 120°) i wygenerowanie informacji dla układu sterującego o zakończeniu przesuwu sondy. Jednocześnie jest to informacja dla układu pomiarowego do zapamiętania aktualnej pozycji. Odpowiednia konstrukcja zapewnia detekcję kontaktu (styku z powierzchnią mierzoną) dla bardzo małych sił nacisku.

---

<sup>3</sup> Dotyczy sztywnych sond pomiarowych, których końcówka przewodzi prąd.

Niektóre typy sond (np.: sonda TP20; **Rys.1.2.9**) zapewniają użytkownikowi możliwość wymiany całej końcówki z trzpieniem pomiarowym na inną końcówkę, wymaganą w procesie pomiarowym. Wymiana może być ręczna lub automatyczna bez konieczności kalibracji.



**Rys.1.2.9. Sonda elektro-stykowa ST20 firmy Renishaw przeznaczona do współrzędnościowej maszyny pomiarowej (dwa moduły: trzpień pomiarowy z końcówką i trzpień montażowy) [1.02].**

Do trzpienia pomiarowego mogą zostać dołączone końcówki o różnych długościach i średnicach. W zależności od końcówki będzie się zmieniać czułość w płaszczyźnie poziomej, zakresy pomiarowe oraz błąd wskazania pozycji [1.03], [1.10]. Zestawienie niektórych parametrów sond kilku producentów umieszczono w tabeli **Tab.1.2.2**.



**Rys.1.2.10. Końcówka pomiarowa sondy dotykająca mierzonego przedmiotu [1.02].**

Ponieważ przełączniki w sondach stykowych są umieszczone co  $120^\circ$ , siła jaka jest potrzebna do zadziałania przełączników jest bardzo zależna od kąta pomiędzy punktu styku z przedmiotem mierzonym i przełącznikami. Aby wyeliminować tę wadę oraz poprawić dokładność odczytu pozycji do typowej sondy stykowej wprowadzono dodatkowo trzy przetworniki piezoelektryczne (lub indukcyjne: sonda typu DT firmy C.Zeiss). Została zmniejszona w ten sposób wymagana wartość siły nacisku na mierzony przedmiot i zwiększona dokładność i powtarzalność pomiaru pozycji do  $\pm 0,5\mu\text{m}$ .

W niektórych typach sond wprowadzono pomiar siły nacisku za pomocą układów optoelektronicznych (sonda SP25M firmy Renishaw ; przetworniki PSD, **Rozdział. 1.2.6**) lub indukcyjnych. Odczytana wartość napięcia jest przetwarzana na wartość przesunięcia, które dodawane jest następnie do wartości współrzędnych odczytanych z liniałów dla trzech osi maszyny współrzędnościowej [1.10].

Dzięki możliwości odczytu siły nacisku zmienił się sposób pomiaru przedmiotu. Przy detekcji siły nacisku, w dowolnej osi, układ napędowy przemieszcza sondę tak, aby siła nacisku była minimalna. Dla sondy typu MT firmy C.Zeiss przemieszczenie w każdym kierunku (X, Y lub Z) można mierzyć z rozdzielczością  $0,1\mu\text{m}$  w zakresie  $\pm 200\mu\text{m}$ .

Niektóre typy sond pomiarowych, zarówno z indukcyjnym odczytem jak i optoelektronicznym, posiadają dodatkowe przetworniki elektromagnetyczne (po jednym dla każdej osi), dzięki którym można zadawać pewną siłę nacisku. Siła ta może być regulowana

płynnie, lub krokowo (sonda MT firmy C.Zeiss, Vast firmy C.Zeiss, Mpp-300, Mpp-100 firmy Mitutoyo, SP80 firmy Renishaw). Dzięki takiemu rozwiązaniu możliwe jest skanowanie mierzonego przedmiotu (poruszanie się po powierzchni przedmiotu), a nie tylko punktowy pomiar.

Ostatnią grupą sond pomiarowych są sondy bezstykowe. Zasada ich działania polega na detekcji pozycji wiązki światła laserowego, odbitej od przedmiotu na detektorze wykonanym w postaci linijki (detektor PCD lub kamerę CCD). Z zasady działania głowice te mierzą tylko jeden wymiar.

Niedokładność pomiaru rzędu  $\pm 10\mu\text{m}$ , praktycznie o rząd mniejsza od sond stykowych, przy zakresie pomiarowym do 60mm, wyklucza tego typu sondy z większości zastosowań przemysłowych. Dodatkową wadą jest zależność dokładności pomiaru od własności rozpraszających powierzchni mierzonego przedmiotu.

Sondami bezstykowymi są mierzone przedmioty o powierzchni podatnej na nacisk. Szczególnie są przydatne w skaningowych pomiarach odtwarzających kształt powierzchni tworzonych w modelu miękkim, np.: obić tapicerskich drzwi samochodów, deski rozdzielczej, foteli, itp.

Zestawienie parametrów kilku sond (głowic) mierzących przedstawiono w poniższej tabeli.

Nazwa sondy	Rozdzielczość [ $\mu\text{m}$ ]	Dokładność [ $\mu\text{m}$ ]	Zakres pomiarowy [mm]	Prędkość skanowania [mm/s]	Siła nacisku [N/mm]	Maksymalna długość końcówki [mm]
MPP-300, Mitutoyo		0,3 (dla 3mm/s)	$\pm 1$	10	0,22	200
MPP-100, Mitutoyo		1,5 (dla 200mm/s)	$\pm 1$	120	0,7	200
VAST, C.Zeiss	0,05	$\pm 1$	$\pm 5$	0,5 punkta/s	1	450
MT C.Zeiss	0,1		$\pm 0,2$	b.d.	1	200
SP25M, Renishaw	< 0,1	$\pm 4\mu\text{m}$ dla końcówek 200mm ( $\pm 0,9$ dla $20\mu\text{m}$ )	$\pm 0,5$	b.d.	od 0,2 do 0,6 zależnie od dł. końcówki	200
SP80, Renishaw	0,02	$\pm 2\mu\text{m}$ dla końcówek 500mm	$\pm 2,5$	b.d.	około 1,8	500
MP700, Renishaw	b.d.	0,25	b.d.	b.d.	nie dotyczy	200

**Tab.1.2.2. Zestawienie sond (głowic) pomiarowych. Ze względu na szeroką ofertę dostępnych na rynku sond, ograniczono zestawienie do kilku przedstawicieli z oferty różnych producentów.**

Wszystkie sondy posiadają zdefiniowane przez producenta maksymalne błędy pomiaru wynikające z niedoskonałości układu detekcji styku z mierzonym przedmiotem. Przyczyną takiego stanu jest konstrukcja styku inicjującego odczyt aktualnej pozycji z liniałów metrologicznych w osiach maszyny. Pomiędzy momentem rzeczywistego styku a

momentem wyzwolenia impulsu przez sondę, końcówka pomiarowa przemieszcza się o pewien odcinek długości, który może wynosić nawet kilka mikrometrów. Odcinek ten jest zwany *drogą przełączania*.

Dokładność sond pomiarowych (głowic) można opisać następującymi właściwościami [1.10]:

- średnia droga przełączania,
- niestabilność średniej drogi przełączania w płaszczyźnie,
- powtarzalność przełączania,
- niedokładność jednowymiarową,
- niedokładność dwuwymiarową,
- niedokładność trójwymiarową,
- błąd głowicy pomiarowej (wg. Normy PN-EN ISO 10360-2:2002),
- funkcja błędów głowicy (sondy) FBG,
- histereza pracy głowicy.

Występowanie powyższych błędów jest związane z występowaniem jednego, bądź większej ilości następujących czynników [1.10]:

- ugięcia końcówki pomiarowej pod wpływem nacisku i jego zmian,
  - zmiany przełożenia układu elektrostykowego w funkcji różnej długości końcówek pomiarowych,
  - zmiany w geometrii końcówki pomiarowej, głównie w wyniku jej zużycia,
- oraz (lub):
- prędkości przemieszczania głowicy
  - właściwości materiału mierzonego przedmiotu,
  - mikrogeometrii mierzonej powierzchni,
  - zmian temperatury, wibracji, itp.

Wyznaczenie parametrów metrologicznych głowic pomiarowych jest możliwe, jeżeli zastosuje się układy o dokładności o rząd lepszej niż badane głowice. Takiej kalibracji dokonuje się na stanowisku z interferometrem laserowym. Prostszy i tańszy sposób przewiduje wykorzystanie współrzędnościowej maszyny pomiarowej oraz wzorców pomiarowych.

### 1.2.3. WSPÓŁRZĘDNOŚCIOWE MASZYNY POMIAROWE (WMP) I CENTRA OBRÓBCZE.

Centra obróbcze są jednymi z najnowocześniejszych systemów do obróbki materiałów. W zależności od potrzeb można nimi obrabiać przestrzeń od kilku do kilkuset decymetrów kwadratowych.

Maszyna sterowana jest za pomocą specjalistycznego komputera, do którego przed rozpoczęciem produkcji wprowadza się odpowiednie dane w postaci wymiarów geometrycznych przedmiotu, który maszyna ma wykonać. Maszyna nie ma możliwości jednoczesnego skrawania i precyzyjnego pomiaru (jedynie za pomocą ewentualnych liniałów optycznych) i wymaga okresowego sprawdzenia. Sprawdzenie maszyny przeprowadza się najczęściej interferometrami laserowymi.

Brak możliwości weryfikacji wykonanego przedmiotu podczas obróbki oraz ograniczone możliwości pomiarowe interferometrów laserowe, zmuszają producentów do posiadania współrzędnościowej maszyny pomiarowej (WMP<sup>4</sup>), odpowiednich wzorców do określenia błędów produkcji oraz laboratorium, w którym dokonuje się pomiaru produktu. Jest to proces bardzo czasochłonny, jednak niezbędny, aby zapewnić odpowiednią jakość produkcji.

Maszyny współrzędnościowe opisują ruch czujnika pomiarowego w przestrzeni. Sam system współrzędnościowy został wynaleziony przez francuskiego filozofa i matematyka Kartezjusza (fr. René Descartes) w początkach XVII wieku. Jego traktat „*La géométrie*” (1637) zawiera oryginalny pomysł nadania każdemu punktowi na płaszczyźnie nazwy przez przypisanie mu dwóch liczb. Rozwój idei Kartezjusza doprowadził do powstania geometrii analitycznej, a badania własności geometrycznych krzywych metodami algebraicznymi do powstania rachunku różniczkowego i całkowego, a następnie geometrii różniczkowej. Idea ta jest więc źródłem wszystkich obecnych systemów pomiarowych. W szczególności, bezpośrednim rozwinięciem powyższej idei jest WMP, która nadaje pewnym punktom w przestrzeni trzy liczby (współrzędne), na podstawie których, w dalszej kolejności, tworzony jest komputerowy model. Dalsza obróbka otrzymanych danych pozwala na wyznaczenie błędów wykonania przedmiotów i optymalizację procesu obróbczego przez wprowadzenie odpowiednich parametrów korekcyjnych.

Pierwsza współrzędnościowa maszyna pomiarowa (WMP) powstała w 1969 roku. Została wyprodukowana przez firmę DEA (obecnie Brown&Sharpe). W 1974 roku firma Zeiss wprowadziła na rynek pierwszą maszynę sterowaną komputerowo, ale dopiero lata dziewięćdziesiąte pozwoliły na szersze wprowadzenie tych systemów pomiarowych do przemysłu (lotniczego oraz motoryzacyjnego) dzięki szybkiemu rozwojowi techniki komputerowej. W 1994 roku powstała pierwsza norma międzynarodowa ISO 10360-2:1994 uwzględniająca współrzędnościową technikę pomiarową w procesie produkcyjnym. W normie określono sprawdzanie dokładności WMP przez kontrolę długości pomiarów wzorca pomiarowego oraz w przypadku pomiarów niektórych błędów posuwu - interferometryczne pomiary laserowe. W roku 2001 powstała norma ISO/TS 17540-1: „Geometrical Product Specification” (GPS) określająca pojęcia i model matematyczny dla specyfikacji i weryfikacji geometrii wyrobów [1.11].

---

<sup>4</sup> W wielu materiałach naukowych, związanych z tą tematyką, wykorzystywany jest angielski skrót: CMM (Coordinate Measuring Machine). Niektóre najnowsze rozwiązania przewidują montaż sondy pomiarowej zamiast głowicy skrawającej z frezem i wykonanie weryfikacji przedmiotu po jego wykonaniu.

Współrzędnościowa technika pomiarowa opiera się na zlokalizowaniu, podczas procesu pomiarowego, charakterystycznych punktów na przedmiocie mierzonym i stworzeniu komputerowego modelu przedmiotu. Model jest tworzony poprzez przetwarzanie informacji z pomiaru:

1. wyznaczenie powierzchni, z jakich zbudowany jest model przedmiotu na podstawie odpowiedniej ilości punktów uzyskanych w pomiarze,
2. wyznaczenie wymiarów stworzonego komputerowego modelu i wyznaczenie kątów pomiędzy powierzchniami oraz wzajemnego zorientowania elementów skojarzonych
3. wyznaczanie tolerancji wykonanego przedmiotu.

Ponieważ pomiar powierzchni przedmiotu dokonywany jest „punkt po punkcie”, należy podczas definiowania procedury pomiarowej danego przedmiotu, ustalić ile powinno być punktów pomiarowych i w jakich miejscach powinny one się znajdować.

Powierzchnię każdego mierzonego przedmiotu można opisać za pomocą podstawowych elementów geometrycznych, takich jak np.: punkt, prosta, płaszczyzna, okrąg, kula, walec, stożek, oraz bardziej złożonych matematycznie: elipsa, pierścień, torus.

Dla podstawowych elementów geometrycznych określono minimalną pomiarową liczbę punktów pozwalających na identyfikację lub weryfikację figury [1.10]:

<b>figura</b>	<b>minimalna pomiarowa ilość punktów</b>
punkt	1
prosta	3
płaszczyzna	4
okrąg	4
kula	6
elipsa	6
walec	8
stożek	12

Pomiarowa minimalna liczba punktów jest tak dobrana, aby wpływ najmniejszej odchyłki kształtu na wynik pomiaru był nieistotny.

Przy wyborze punktów pomiarowych muszą być spełnione warunki dodatkowe, np.: w przypadku kuli – punkty nie mogą leżeć w jednej płaszczyźnie, w przypadku otworu – punkty nie mogą leżeć blisko siebie, itp.

Jeżeli czas pomiaru nie jest istotny, ilość punktów można zwiększyć uzyskując, w ten sposób, mniejszą niepewność pomiaru.

Wyznaczenie właściwości podstawowych figur geometrycznych, wchodzących w skład powierzchni mierzonego przedmiotu, jest w większości przypadków niewystarczające. Potrzebne są również, informacje o wzajemnych odległościach, grubościach ścian, kątach, rzutach i przekrojach. Z tego powodu program typowej maszyny współrzędnościowej zawiera procedury obliczeniowe relacji między elementami geometrycznymi: odległości i kąty oraz dodatkowe procedury: obliczania elementów przecięcia, obliczenia symetrii i odbić lustrzanych względem osi i płaszczyzn, wyznaczania przekrojów. Programy do obsługi maszyn współrzędnościowych zawierają również procedury wyznaczania typowych odchyłek kształtu: prostoliniowość, okrągłość, płaskość, walcowatość, oraz odchyłek położenia i bicia: równoległość, prostopadłość, tolerancja kąta, współśrodkowość, współosiowość, symetria, bicie poprzeczne, bicie wzdłużne [1.10].

Tworzenie procedur wyznaczania podstawowych figur geometrycznych przedmiotu mierzonego oraz zależności pomiędzy tymi figurami stanowi obecnie temat prac pomiarowych laboratoriów w Polsce i za granicą, np.: ([1.07-1.11], [1.20],[1.22]) oraz firm produkujących maszyny współrzędnościowe: Renishaw, C.Zeiss, Mitutoyo, DEA, itp. Polepszenie wspomnianych procedur pod względem dokładności lub skrócenie procedury pomiarowej pozwala na podwyższenie jakości produkcji lub/i obniżenie jej kosztów, ma więc wymierne korzyści dla odbiorcy maszyny pomiarowej i odbiorcy produktu finalnego.

Sposoby opisywania zmierzonych błędów, sposoby pomiarów i analizy wyników zostały zawarte w normie PN EN ISO 10360:2002. Ponieważ jednak normy nie mogą opisywać sposobu pomiaru wszystkich istniejących kształtów, zostały tam zawarte tylko pewne reguły pomiarów dla różnych systemów pomiarowych, umożliwiające zminimalizowanie błędów wykonanych przez operatora. W przypadku WMP operator (producent) sam decyduje w jaki sposób należy weryfikować geometrię produktu.

Bardzo ważnym zespołem maszyny współrzędnościowej jest opisana w rozdziale 1.2.2 głowica pomiarowa, zwana również sondą pomiarową. Dzięki sondzie możliwe jest umiejscowienie punktu w przestrzeni. W wyniku jej sygnału aktualne wartości pozycji z linałów optycznych [**Rozdział 1.2.1**] dla trzech osi maszyny zostają przesłane do komputera.

Sama sonda i linały optyczne nie wystarczą jednak, aby dokonać pomiaru. Dodatkowo na współrzędnościową maszynę pomiarową składają się:

- korpus,
- uchwyty przedmiotu mierzonego,
- łożyska i prowadnice,
- napęd,
- komputer oraz urządzenia peryferyjne,
- wyposażenie dodatkowe, jak: stół obrotowy, mechanizm wymiany sond,
- mechanizmy i oprogramowanie sterujące,
- oprogramowanie do obliczeń geometrycznych, wyznaczania błędów, generowania raportów.

We współrzędnościowej technice pomiarowej podstawą jest maszyna, której zespoły mogą się przemieszczać w trzech wzajemnie prostopadłych osiach, oznaczonych:  $X_m$ ,  $Y_m$ ,  $Z_m$ . (istnieją maszyny wykorzystujące inne układy współrzędnych). Kierunki te przedstawiają przestrzenny układ współrzędnych. Przesunięcia wzdłuż konkretnych osi są mierzone przez linały optyczne i przekazywane do specjalizowanego komputera, który steruje odpowiednio układem napędowym. Pomiar może dokonywać się w dowolnym ułożeniu przedmiotu. Przedmiot może mieć dowolne kształty, ale jednocześnie ze wzrostem złożoności kształtu wzrasta wielokrotnie czas potrzebny na pomiar, złożoność pomiaru i metod wyznaczania błędu.



***Rys.1.2.11. Olbrzymia bramowa współrzędnościowa maszyna pomiarowa firmy Brown&Sharpe (DEA) typu Gantry o zakresach pomiarowych do 8000 x 3850 x 3700mm [1.22].***

Obok typowych maszyn pomiarowych współrzędnościowych coraz częściej stosowane są ramiona pomiarowe [Rys.1.2.12]. Doskonalenie konstrukcji wzorców, technologii materiałowych oraz technologii obróbczych pozwoliło na stworzenie nowej rodziny maszyn współrzędnościowych pomiarowych. Charakteryzują się one brakiem wyróżnionych trzech zespołów przesuwnych wzdłuż osi XYZ. Urządzenie pomiarowe stanowi ramię o czterech stopniach swobody. Końcówka pomiarowa jest identyczna (co do zasady działania) z tymi stosowanymi w standardowych współrzędnościowych maszynach pomiarowych. Zastosowanie ramienia pomiarowego zamiast „bramy” pozwoliło na zwiększenie zakresu pomiarowego, dzięki czemu można mierzyć elementy o znacznie bardziej złożonej strukturze. Niestety „prostsza” konstrukcja i rozszerzenie zakresu pomiarowego powodowało znaczny wzrost kosztu systemu pomiarowego ze względu na znacznie większe rygory w wykonaniu elementów ramienia. Początkowo systemy współrzędnościowe oparte o taką konstrukcję były stosowane w koncernach produkujących samochody do pomiaru nadwozi oraz w przemyśle lotniczym. Obecnie dostępne są już znacznie tańsze rozwiązania różnych firm.

Do specyficznych zastosowań ramion pomiarowych można zaliczyć możliwości pomiarów współrzędnościowych z przestawieniem pozycji ramienia dla elementów większych niż zdefiniowany obszar pomiarowy.





**Rys.1.2.12. Przenośna współrzędnościowa maszyna pomiarowa typu Titanium Arm firmy FARO o zakresach pomiarowych do 3700mm [1.13].**

Ponieważ dla tego typu urządzeń pomiarowych nie zdefiniowano jeszcze norm związanych z kontrolą dokładności, firmy proponują różnego rodzaju testy dokładności [1.10]: test pojedynczego punktu kuli kalibracyjnej, test powtarzalności punktu, test przestrzennej dokładności liniowej (analogiczny test dla ramowych maszyn współrzędnościowych jest wykonywany wg. Normy ISO 10360-2 [1.07]).

WMP, jak wszystkie maszyny pomiarowe, wymagają wcześniejszej kalibracji. Złożona struktura kinematyczna WMP, jej charakter przestrzenny oraz duże wymiarowo, w porównaniu z innymi przyrządami pomiarowymi, podzespoły są powodem szczególnej wrażliwości na termiczne wpływy środowiskowe [1.21]. Stosowane są też odpowiednio klimatyzowane pomieszczenia laboratoryjne, aby zminimalizować wpływ temperatury. Dodatkowo instalowane są w niewrażliwych punktach maszyny czujniki temperatury w celu kompensacji rozszerzalności termicznej maszyny. Jeżeli przyjąć, że maszyna pomiarowa wykonana jest ze stali, to jej rozszerzalność termiczna jest rzędu  $10\mu\text{m}/\text{metr długości maszyny}/^\circ\text{C}$ . W klimatyzowanym pomieszczeniu może występować gradient temperatury sięgający kilku stopni  $^\circ\text{C}$ , co przy nieumiejętnej instalacji przyrządu pomiarowego może prowadzić do bardzo dużych błędów pomiarowych. Nawet kilkudniowy okres dopasowywania się zespołów WMP do zmian temperatury rzędu  $1^\circ\text{C}$  nie gwarantuje zdefiniowanej przez producenta dokładności pomiaru. Jedynym sposobem na dokonanie właściwej korelacji temperaturowej błędów może być poznanie rzeczywistego charakteru kształtowania się błędów WMP w warunkach zmian temperatury otoczenia.

Kolejnym źródłem błędów WMP mogą być wzorce użyte do kalibracji przyrządu. Pierwszym parametrem jest dokładność wzorca. Jeżeli założymy, że jest ona znana, gradient temperatury będzie powodował zmiany wymiarów geometrycznych wzorca i błędy kalibracji, mimo, iż są one wykonane z termostabilnego materiału.

Wzorce wykonane są w postaci pewnego przedmiotu: kuli na podstawie, ramy z kulami, siatki z kulami, płyty z otworami, itp. Od tego czy wzorzec został właściwie dobrany do potrzeb, zależy późniejsza dokładność pomiarów, kalibracji i wielkość kolejnych błędów.

Jeśli założy się pracę w ustabilizowanych warunkach termicznych to pozostaje trzeci parametr: dokładność kalibracji (błędy pomiaru sondą, błędy pomiaru pozycji przesunięcia na linałach linałów, itp.).

Można rozróżnić pięć podstawowych grup źródeł błędów wpływających na niepewność pomiaru WMP oraz centrów obróbczych [1.08], [1.22]:

1. Błędy przyrządu pomiarowego (błędy geometryczne, bezwładność ruchomych podzespołów, zakres pomiarowy, układ pomiarowy, sonda pomiarowa, oprogramowanie, korekcja matematyczna),
2. Błędy wynikające z wpływu środowiska na wielkość mierzoną (temperatura, gradient przestrzenny temperatury, gradient czasowy temperatury, promieniowanie cieplne, oświetlenie, wilgotność, ciśnienie, drgania, czystość powietrza, zakłócenia elektromagnetyczne, itp.),
3. Błędy wykonania przedmiotu mierzonego (odchyłki kształtu, falistość, chropowatość, typ materiału, wymiary, masa),
4. Błędy wprowadzone przez operatora (dobór przyrządu, mocowanie, zorientowanie przedmiotu, dobór końcówek, dobór wyposażenia przyrządu pomiarowego, masa),
5. Błędy pomiaru / strategia pomiaru (dobór punktu startowego, ilość punktów pomiarowych, rozmieszczenie punktów pomiarowych, filtracja sygnału pomiarowego, itp.).

Aby zminimalizować wymienione błędy zaleca się stosowanie odpowiednich procedur opisanych w odpowiednich normach lub zaleceniach (dla centrów normy mogą być inne):

Ad.1. Obecny poziom techniczny narzędzi pomiarowych umożliwia uzyskanie błędu pomiaru mniejszego niż  $\pm 1 \mu\text{m}/\text{m}$ . Aby utrzymać taką dokładność wymagana jest okresowa kontrola WMP (PN-EN ISO 10360-2, ISO PN-EN 10360-6, PN-EN 45001) lub obrabiarki (PN-EN-ISO 230-2), odpowiednia kontrola, nadzór systemu (PN-ISO 9001, PN-EN ISO 10012-1),

Ad.2. Wpływ środowiska przejawia się w wahaniach temperatury maszyny i wokół maszyny oraz w gradientach temperatury. Czynniki te wpływają na zmiany wymiarów, deformacje mierzonych przedmiotów i przyrządu pomiarowego. Najlepszym rozwiązaniem jest klimatyzowanie laboratorium pomiarowego i aklimatyzacja mierzonego przedmiotu oraz maszyny pomiarowej. Temperatura, w jakiej powinny być dokonywane pomiary wynosi  $20^{\circ}\text{C}$  (PN-55/N-02101, PN-EN 45001)

Drugim czynnikiem środowiskowym są drgania maszyny pomiarowej. Eliminuje je się stosując podstawy pod stanowisko pomiarowe o właściwościach tłumiących drgania, najlepiej na oddzielnych fundamentach lub ciężkich płytach stalowych.

Ad.3. Odchyłki geometryczne oraz chropowatość i/lub falistość powierzchni wpływają na dokładność pomiaru. Operator musi zdecydować czy są potrzebne specjalne algorytmy obliczeniowe i wyznaczyć krytyczne miejsca pomiarowe na mierzonym przedmiocie oraz wyznaczyć konieczną liczbę punktów pomiarowych.

Ad.4., Ad.5. Odpowiednio przeszkolony operator maszyny pomiarowej (PN-EN 45001) jest odpowiedzialny na ustawienie przedmiotu, dobór końcówek pomiarowych, wyznaczenie strategii pomiarów i metody opracowania wyników.

W wyniku występowania tak dużej ilości źródeł błędów o różnym charakterze, może się zdarzyć, że pomiary tego samego przedmiotu w innych warunkach lub na innej maszynie o identycznych parametrach, będą się różnić. Stosując się do odpowiednich zaleceń oraz norm należy dążyć do wykrycia przyczyny błędów i do ich wyeliminowania lub redukcji.

Producenci na ogół nie podają danych szczegółowych dotyczących poszczególnych rodzajów błędów, lecz ogólnie niedokładność całej maszyny odniesioną do błędów wskazań pomiaru długości.

Wyznaczanie dokładności i powtarzalności pozycjonowania WMP oraz obrabiarek charakteryzowana przez wiele norm i wytycznych, np.: Stowarzyszenia Niemieckich Inżynierów i Elektrotechników - VDI/VDE 2617 [1.04], Stowarzyszenie Producentów WMP - CMMA [1.12], PN-ISO 230, JIS.

Metody różnią się głównie ilością wymaganych punktów pomiarowych, sposobie realizacji samego pomiaru oraz sposobie realizacji i interpretacji wyników. Wyznaczane są błędy składowe, czyli: błędy pozycjonowania, prostoliniowości, prostopadłości, błędy skrzywienia (rotacyjne), błędy pozycjonowania kąтового, odchyłki od osi obrotu, przestrzenno-kątową niedokładność pomiarową [1.10]. Większość błędów zdefiniowanych w różnych normach i zaleceniach wymaga w procesie oceny wykorzystania interferometru laserowego w różnych konfiguracjach optycznych.

Nazwa przyrządu	Typ przyrządu	Maksymalna dokładność systemu od 19°C do 21°C [μm]	Zakres pomiarowy [mm]	Zastosowanie	Inne
FARO GAGE	Ramię	±5μm +8*L/1000 (ISO 10360-2) Powtarzalność (±6μm)	Półsfera 1200 mm	Weryfikacja części, inżynieria wsteczna, tworzenie modeli CAD z rzeczywistych obiektów, dokumentacja powykonawcza, badanie braków, sprawdzanie pras, wtryskarek, maszyn obróbczych.	
FARO Titanium 3.7m	Ramię	±172μm (powtarzalność: ±122μm)	Półsfera 3700 mm		6-stopni swobody Dla wersji Platinum wszystkie błędy dwa razy mniejsze.
C.Zeiss, PRISMO 7	Portalowa	$MPE_E = (1,7 + L/300)\mu m$	1100mm*1100mm *1495mm		
Cimcore Infinite	Ramię	0,1mm	Półsfera 3600 mm		
DEA Global	Portalowa	$MPE_E = (2,7 + L/300)\mu m$	2000mm*4000mm *1500		

**Tabela 1.2.3. Parametry wybranych współrzędnościowych systemów pomiarowych firm: FARO Technologies, C.Zeiss, DEA, Cimcore.**

**Zalety WMP:**

- Możliwość pomiaru geometrii trójwymiarowych przedmiotów z mikrometrową rozdzielczością oraz wyznaczenia błędów wykonania przedmiotu,
- Możliwość przeprowadzenia inżynierii odwrotnej (ang. reverse engineering) i stworzenia modelu CAD do dalszej modyfikacji.

### Wady WMP:

- Konieczność tworzenia skomplikowanych algorytmów wyznaczania wymiarów i błędów pomiarów dla nietypowych, skomplikowanych figur geometrycznych,
- Dokładność pomiaru zależna w bardzo dużej mierze od doświadczenia operatora,
- Duża wrażliwość na warunki środowiskowe,
- Nieujednolicony sposób oceny parametrów (błędów) WMP oraz centrów obróbczych. W praktyce system oceny jest zdefiniowany przez producenta, czasem konkretnego odbiorcę produktu.
- Olbrzymi koszt maszyny, koszt konserwacji i obsługi przez wykwalifikowany personel.

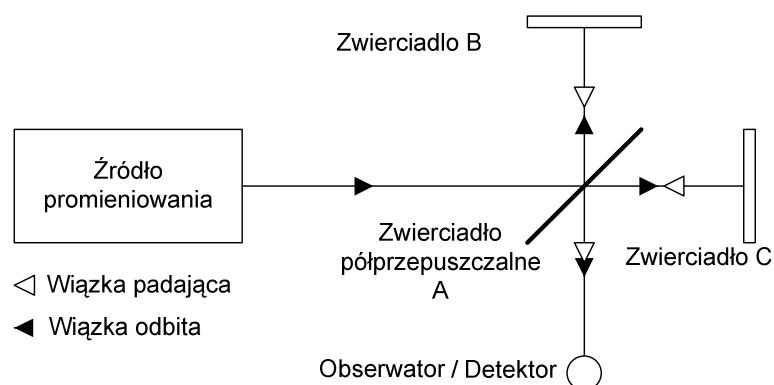
## 1.2.4. INTERFEROMETRY LASEROWE. BUDOWA. ZASADA DZIAŁANIA. PARAMETRY.

Przemysł oraz wiele dziedzin nauki wymaga pomiarów przemieszczeń z rozdzielczością i dokładnością rzędu dziesiątych, setnych lub tysięcznych części mikrometra. Dokładności takie są wymagane np.: podczas produkcji układów scalonych, mechanicznych pamięci masowych, produkcji obrabiarek sterowanych numerycznie. Bardzo często z taką dokładnością są weryfikowane wymiary produktu już po wykonaniu, np.: silniki samolotów, układy napędowe maszyn pomiarowych i obróbczych.

Urządzeniami zdolnymi spełnić wymagania dużej rozdzielczości i dokładności pomiaru są przyrządy pomiarowe wykorzystujące zjawisko interferencji lub dyfrakcji fali, w szczególności fali świetlnej - interferometry.

Zasada działania opiera się na obserwacji wzorów interferencyjnych powstałych przez nałożenie się na siebie dwóch fal spójnych.

Znakomitym przedstawicielem takich przyrządów pomiarowych jest interferometr optyczny skonstruowany w 1880 roku przez amerykańskiego fizyka Alberta A. Michelsona (*Rys.1.2.17*), [1.16], [3.09], [1.14]. W roku 1881 przeprowadził on eksperyment (powtórzony w 1887 r. wraz z Edwardem Morleyem), dowodzący, że prędkość światła nie zależy od prędkości orbitalnej Ziemi czy wiatru eteru i ma skończoną maksymalną wartość w próżni. Eksperyment Michelsona miał na celu wyznaczenie prędkości poruszania się Ziemi względem eteru kosmicznego (będącego hipotetycznym nośnikiem światła) poprzez wykazanie obecności efektu Dopplera. Negatywny wynik badania ostatecznie wykluczył istnienie eteru i stał się doświadczalną podstawą teorii względności [1.14].



*Rys.1.2.17. Schemat interferometru Michelsona [1.14], [2.02].*

W interferometrze Michelsona, równoległa wiązka światła z lampy sodowej była dzielona na dwie, wzajemnie prostopadłe wiązki światła. Obydwie wiązki po odbiciu od zwierciadeł (C i B, *Rys.1.2.17*) były sumowane. Michelson wiedział, że prążki interferencyjne będą obserwowalne w przypadku różnych dróg optycznych, zmiany tych dróg i/lub w przypadku sumowania się prędkości światła i prędkości orbitalnej Ziemi w eterze. Ponieważ drogi optyczne były stałe, jedynym czynnikiem była prędkość wiatru eteru. Gdyby istniał wiatr eteru, wystarczyłoby obrócić interferometr, a układ prążków powinien się zmienić. Michelson oszacował, że niedokładność pomiaru w skonstruowanym przez siebie urządzeniu jest wystarczająco mała i ruch prążków interferencyjnych, jaki powinien uzyskać dla prędkości ruchu Ziemi wokół Słońca, powinien być wyraźnie obserwowalny i możliwy do zmierzenia. Eksperyment był powtarzany wielokrotnie, lecz Michelson nie wykrył<sup>5</sup> ruchu prążków interferencyjnych [1.14]. Wynik doświadczenia pozwolił nie tylko obalić teorię eteru, ale przyczynił się do powstania nowej rodziny przyrządów pomiarowych.

W 1907 r. Michelson dostał Nagrodę Nobla za bardzo dokładne określenie prędkości światła oraz za konstrukcję precyzyjnych instrumentów optycznych.

Istotną cechą interferometru Michelsona jest to, że jeżeli istnieje potrzeba wyznaczenia wartości jednej z dróg optycznych nie jest wymagane wyznaczenie ani pomiar prędkości światła, a dodatkowo dokładność pomiaru będzie zbliżona do długości fali źródła. To spostrzeżenie pozwoliło na konstrukcje różnych rodzajów interferometrów.

Ze względu na ilość interferujących ze sobą wiązek fal świetlnych interferometry optyczne dzielimy na [1.14]:

- jednowiązkowe: interferometr różnicowy,
- dwuwiązkowe:
  - Interferometr Michelsona (wykorzystywany do pomiaru przemieszczenia),
  - Interferometr Mirau,
  - Interferometr Fizeau,
  - Interferometr Macha-Zehndera (wykorzystywany do oceny współczynnika załamania światła dla różnych materiałów),
  - Interferometr Sagnaca (wykorzystywany w konstrukcjach żyroskopów),
  - Interferometr Lloyd'a,
  - Zwierciadła Fresnela (wykorzystywany do oceny układów optycznych),
- trzy wiązkowe
  - Interferometr na wirach optycznych IVO [1.44]
- wielowiązkowe:
  - Interferometr Fabry'ego-Perota,
  - Interferometr Newtona.

Ponieważ w dysertacji wykorzystywany jest interferometr Michelsona o zmodyfikowanej konstrukcji, dalsze rozważania będą ograniczone do tej konstrukcji.

---

<sup>5</sup> W eksperymencie nie zostały wykryte przemieszczenia prążków wskazujące na istnienie wiatru eteru.

Jeżeli w interferometrze Michelsona odległość pomiędzy zwierciadłem A i B oznaczmy, jako  $D_{AB}$  i odległość pomiędzy zwierciadłem A i C oznaczmy jako  $D_{AC}$  to różnica dróg optycznych wyniesie [1.16]:

$$S = 2 \cdot (D_{AC} - D_{AB}) \quad (1.2.12)$$

Jednocześnie, jeżeli przy stałej odległości  $D_{AC}$  będzie się zmieniać odległość  $D_{AB}$ , natężenie światła  $I$  docierającego do obserwatora lub detektora będzie opisane zależnością:

$$I = 0,5 \cdot (A_B^2 + A_C^2) + A_B \cdot A_C \cdot \cos(2 \cdot k \cdot (D_{AC} - D_{AB})) \quad (1.2.13)$$

Dla  $k = 2 \cdot \pi / \lambda$  (gdzie  $\lambda$  - dł. fali źródła) oraz  $n = 0, \pm 1, \pm 2$ , itd.

Maksimum natężenia światła dostajemy przy  $(D_{AC} - D_{AB}) = n \cdot \lambda / 2$ .

Natężenie światła  $I$  docierającego do detektora będzie się zmieniało z okresem równym połowie długości fali źródła. Jest to podstawowa rozdzielczość pomiaru przesunięcia jednego z luster.

Idea pomiaru interferometrem Michelsona wiąże się z kilkoma kluczowymi zagadnieniami:

- interferometr mierzy zmianę położenia jednego ze zwierciadeł przesuwanego wzdłuż biegu wiązki i nie pozwala na pomiar bezwzględny dystansu np.:  $D_{AC}$ ,
- mierzone są zmiany odległości:  $D_{AC}$ ,  $D_{AB}$ . Aby wyznaczyć zmianę tylko jednej odległości, druga musi pozostać bez zmian (nie dotyczy pomiarów kątowych),
- dokładność pomiaru interferometrycznego zależy od stałości częstotliwości użytego źródła światła.

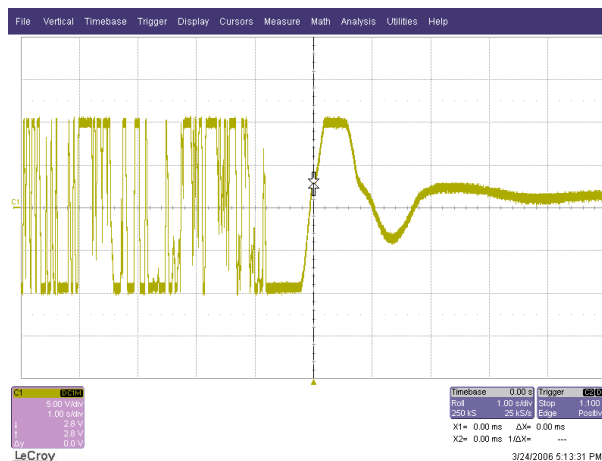
Z ostatniego punktu wynika, że rozdzielczość i dokładność pomiaru jest zależna głównie od jakości źródła promieniowania. Wymagany jest więc laser o dużej stałości częstotliwości. Korzystne by było również, aby laser generował wiązkę światła w widzialnym zakresie. Najlepiej pasującym do tego opisu jest laser gazowy helowo-neonowy. Przy odpowiedniej jego długości można go zmusić do generacji pojedynczego modu o bardzo małej szerokości (rzędu kilkunastu kHz). Dodatkowo nawet przy stabilizacji pasywnej można uzyskać stałość generowanej częstotliwości rzędu  $10^{-7}$  Hz [Rozdział 2]. W konstrukcjach interferometrów laserowych stosowany jest, dodatkowo, układ stabilizacji temperatury lasera He-Ne w celu uzyskania jeszcze wyższej stabilności generowanej częstotliwości wiązki laserowej. Ciekawe rozwiązanie zastosowała firma Hewlett-Packard w interferometrze 5528A. Poprzez specjalną konstrukcję rury lasera He-Ne automatycznie kompensuje on swoją długość ze zmianami temperatury, dlatego nie są wymagane dodatkowe systemy stabilizacji i czas potrzebny do uzyskania gotowości tego interferometru laserowego do pracy wynosi 1 do 2 minut.

Coraz częściej do konstrukcji interferometrów laserowych stosowane są półprzewodnikowe diody laserowe, jednak ze względu na bardzo małą drogę koherencji wiązki tych laserów (w najlepszym przypadku rzędu kilku metrów; [1.30]), stosowane są one w przypadkach gdzie nie jest wymagany duży zakres pomiarowy: stoliki mikroskopowe, w układach mikromechanicznych, sondy pomiarowe do WMP oraz inne przetworniki wielkości nie-elektrycznych: temperatury, siły nacisku, grubości, wibracji itp.

Mając stabilne źródło światła trzeba zwrócić uwagę na jeszcze jeden problem: długość fali źródła w powietrzu jest zależna od właściwości dyspersyjnych tego ośrodka<sup>6</sup>. Oprócz stabilnego źródła światła wymagane jest również określenie długości fali promieniowania w konkretnych warunkach pomiarowych przez wyznaczenie współczynnika załamania ośrodka. Wiąże się to z koniecznością wyznaczenia trzech podstawowych parametrów opisujących właściwości ośrodka: temperatury, ciśnienia oraz wilgotności.

Praktycznie wszystkie dostępne na rynku interferometry laserowe przeznaczone dla przemysłu posiadają czujniki tych wielkości fizycznych. Dodatkowo stosuje się pomiar temperatury materiału (lub/i maszyny).

Interferometr laserowy wykorzystujący laser He-Ne w konstrukcji Michelsona posiada pewną wadę uniemożliwiającą stosowanie lusterek płaskich. Jeżeli wiązka laserowa powrotna powraca w zbyt dużej części do lasera (generatora) powoduje jego destabilizację (self-mixing, self-pulsing). W zjawisku sprzężenia zwrotnego laser może zostać wprowadzony w stan niestabilności i chaosu nawet wiązką powrotną o mocy rzędu -21dB [3.09, 1.17-1.19]. Zakładając, że współczynnik odbicia  $R$  zwierciadła lasera wynosi 0.98, oznacza to, iż zaburzenie pracy lasera powoduje już wiązka o mocy około miliona razy mniejszej (-55 dB) od intensywności pola w rezonatorze.



**Rys.1.2.18. Powrót lasera He-Ne do stanu stabilizacji ze stanu chaosu spowodowanego wiązką powrotną. Sygnał błędu układu stabilizacji w systemie pomiarowym LSP30 [1.27],[3.09].**

Chaos w laserze objawia się przypadkowymi zmianami intensywności obu polaryzacji (stosunku obu polaryzacji), co zostało przedstawione na rysunku **Rys.1.2.18**, przypadkowe zmiany wartości sygnału błędu pętli, fluktuacji mocy wiązki i częstotliwości generacji lasera. Przy pomiarze odległości rzędu nanometrów w układzie interferometrycznym najmniejsza destabilizacja częstotliwości spowoduje błędny pomiar. Dlatego należy stosować izolację wiązki powrotnej.

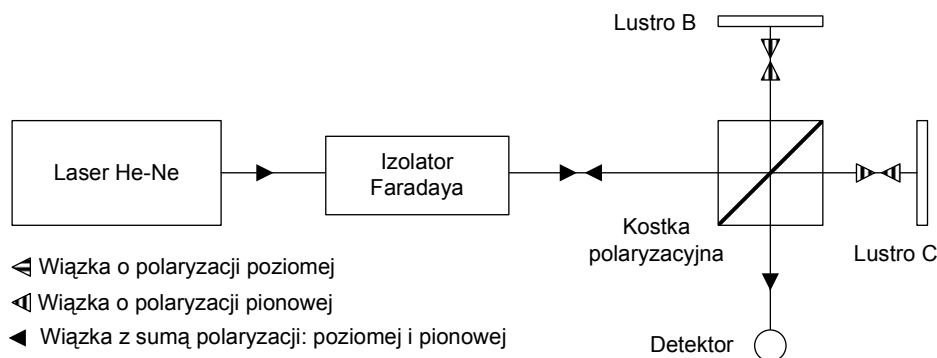
Stosowane są trzy sposoby izolacji wiązki powrotnej [1.26], [1.28]:

- zastosowanie izolatora Faradaya,
- izolacja częstotliwościowa,
- izolacja geometryczna.

<sup>6</sup> Tym samym długość fali jest funkcją współczynnika załamania w powietrzu na drodze pomiarowej.

Wykorzystując tę zasadę można wyznaczać współczynnik załamania wiązki światła dla różnych przezroczystych materiałów (interferometr Macha-Zehndera).

Zasada pracy izolatora Faradaya polega na skręceniu płaszczyzny polaryzacji wiązki światła spolaryzowanej liniowo przy przejściu przez ośrodek umieszczony w polu magnetycznym i tłumieniu tej wiązki przy powrocie. Dzięki zastosowaniu takiego elementu pomiędzy źródłem światła a lustrem półprzepuszczalnym lub kostką polaryzacyjną można całkowicie zabezpieczyć laser He-Ne przed szkodliwą wiązką powrotną (**Rys.1.2.19**).



**Rys.1.2.19. Schemat interferometru Michelsona z laserem He-Ne jako źródłem światła oraz izolatorem optycznym Faradaya [1.14], [2.02].**

Wpływ pola magnetycznego na właściwości optyczne materiałów odkrył w 1845 roku Faraday.

Izolator optyczny składa się z polaryzatora, rotatora Faradaya zmieniającego kąt polaryzacji o  $45^\circ$  oraz analizatora ustawionego pod kątem  $45^\circ$  do polaryzatora. Liniowo spolaryzowane światło przechodzi przez polaryzator, następnie zostaje skręcone o  $45^\circ$  i przez analizator przechodzi do wyjścia izolatora. Zastosowanie analizatora jest niezbędne w celu utrzymania odpowiedniego stanu polaryzacji wiązki powracającej. Powracająca wiązka o takiej samej polaryzacji przechodzi przez analizator, zostaje skręcona o kolejne  $45^\circ$  w rotatorze i następnie wytłumiona na polaryzatorze w wyniku skręcenia wiązki odbitej względem pierwotnej o  $90^\circ$ . Typowe wartości tłumienia mocy laserowej wiązki powrotnej w izolatorach oferowanych na rynku przekraczają 30dB.

Kąt skręcenia wiązki wyjściowej  $\theta$  jest zależny od długości fali świetlnej przechodzącej, wartości natężenia pola magnetycznego i długości ośrodka:

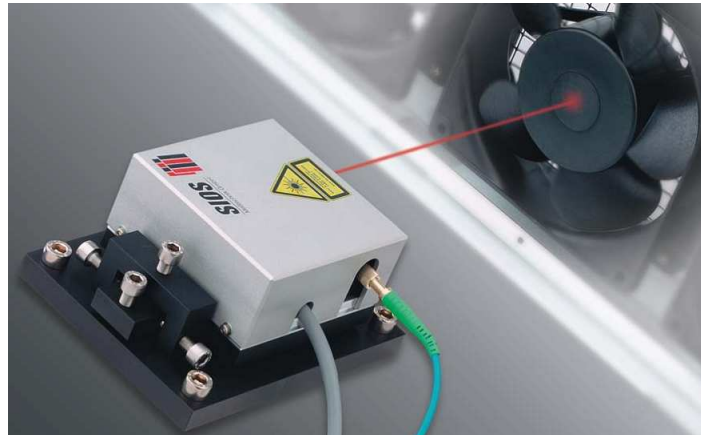
$$\theta = \int_l V * H * dl \quad (1.2.14)$$

H – wartość natężenia pola magnetycznego, V - współczynnik Verdera (maleje ze wzrostem długości fali, należy stosować źródło o wąskim widmie promieniowania), l – długość ośrodka

Najbardziej pożądane w tym przypadku są materiały posiadające jony paramagnetyczne o budowie heliakalnej tj.: terb, szkło flintowe domieszkowane terbem. Do znanych materiałów wykazujących silny efekt Faradaya można zaliczyć: YIG (granat itrowo-żelazowy), TGG (granat terbowo-galowy) oraz TbAlG (granat aluminiowo-terbowy). Izolatory produkowane są na konkretną długość fali źródła, ponieważ współczynnik Verdet w dużym stopniu jest od niej zależny: dla 632.8 nm  $V = -134 \text{ rad/T-1/m}$ , podczas gdy, dla 1064 nm,  $V = -40 \text{ rad/T-1/m}$ . Często, aby można było uzyskać strojenie izolatora zapewniana jest możliwość zmiany wartości pola magnetycznego przez zmianę położenia magnesu.

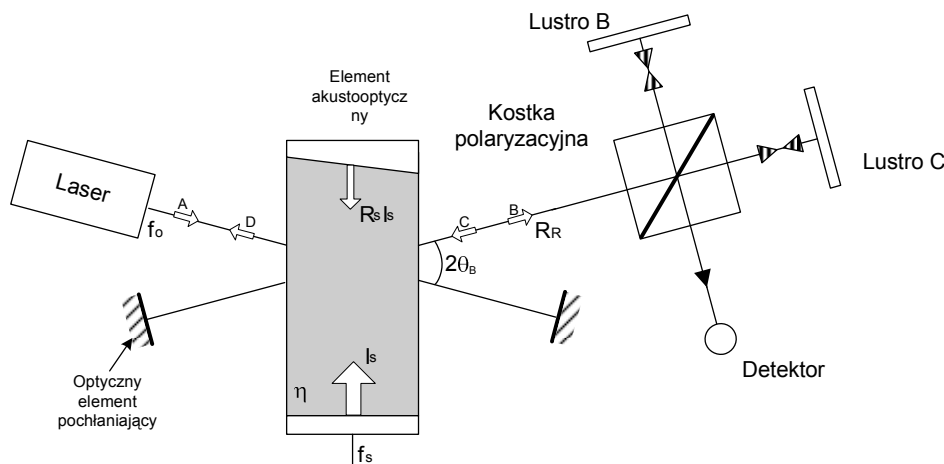


Zastosowanie izolatora Faradaya podnosi koszty układu pomiarowego, powoduje dodatkowe straty mocy wiązki laserowej i komplikuje układ. Jest stosowane w układach pomiarowych z zwierciadłami, gdzie wymagany jest pomiar punktowy lub gdzie nie można zastosować układu z izolacją częstotliwościową czy geometryczną. Ze względu na komplikacje nie jest również stosowany razem z interferometrami heterodynowymi (*Rys.1.2.23*).



**Rys.1.2.20. Interferometr laserowy zbudowany na laserze He-Ne firmy SIOS Meßtechnik, typu SP-S, ze światłowodowym prowadzeniem wiązki, w układzie do pomiaru wibracji. Brak retropryzmatu sugeruje podstawowy układ Michelsona – wiązka odbija się od przedmiotu mierzzonego [1.29]. Aby izolować wiązkę, prawdopodobnie, zastosowano izolatory Faradaya.**

Innym sposobem zmniejszenia wpływu wiązki powrotnej na stabilność lasera He-Ne jest zastosowanie elementu akustooptycznego (AOM – ang.: acusto-optical modulator) i przesunięcie częstotliwości wiązki powracającej o pewną częstotliwość. Wystarczające jest przesunięcie częstotliwości fali powracającej rzędu kilku MHz aby wyeliminować wpływ wiązki powracającej do lasera (według [3.09] 3MHz).



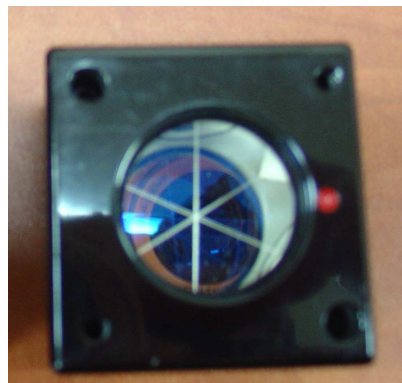
**Rys.1.2.21. Schemat interferometru Michelsona z laserem He-Ne jako źródło światła oraz elementem akustooptycznym [1.14], [3.09], [1.28].**

Schemat układu optycznego eliminującego wrażliwość laser na odbicie wsteczne został pokazany na rysunku *Rys.1.2.21*. W układzie tym generowana przez laser wiązka (A) o częstotliwości  $f_0$  pada na modulator akustooptyczny pod kątem Bragga  $\theta_B$  (tj. pod kątem 6 mrad). Wiązka, przesunięta w częstotliwości o wartość  $f_s$  opuszcza modulator również pod kątem  $\theta_B$  (wiązka B), odbija się od układów optycznych i wraca z powrotem do AOM (wiązka C). Z racji symetrii modulatora wiązka C jest identycznie załamywana jak wiązka A,

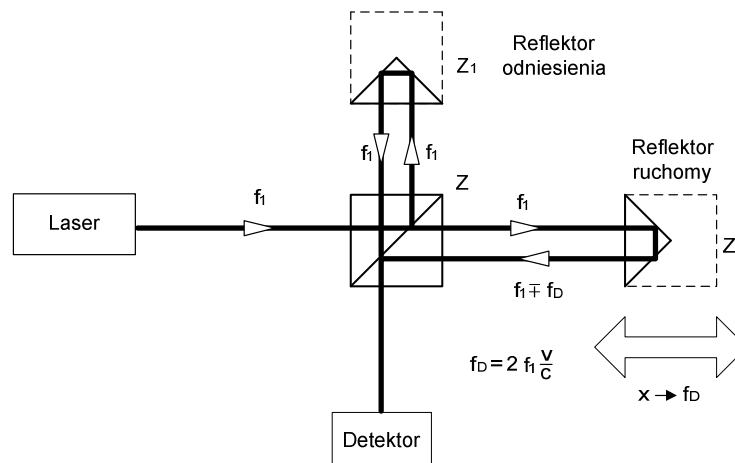
czyli do lasera wraca wiązka ( $D$ ) o częstotliwości  $f_o+2f_s$ . Jeśli częstotliwość fali akustycznej jest wystarczająco duża to laser nie zareaguje na wiązkę powracającą (tj.  $D$ ) [3.09].

Ponieważ średnica wiązki laserowej wychodzącej z typowego interferometru laserowego stosowanego w przemyśle wynosi około 8mm a jednocześnie kryształy akustooptyczne posiadają wysokości rzędu 2-5mm, AOM musi być umieszczony pomiędzy laserem (lustrem wyjściowym) a kolimatorem wiązki laserowej. Takie rozwiązanie wymusza integrację lasera i kryształu modulującego już w fazie produkcji interferometru. Dodatkową wadą jest występowanie innych, niewykorzystywanych rzędów ugięcia wiązki laserowej, na które tracona jest część mocy wiązki, i które mogą powodować problemy w justowaniu całego układu na pierwszy rząd i uniemożliwić pomiar na krótkiej drodze

Najprostszym sposobem ograniczenia mocy sygnału powracającego do lasera jest zmiana toru wiązki powrotnej. W tym celu zwierciadła (zwierciadła) płaskie w układzie interferometru Michelsona [Rys.1.2.17] zastępuje się tzw. retro-reflektorami (lub retro-pryzmatami) [Rys.1.2.22.2]. Ten element optyczny jest tak skonstruowany, że wiązka odbita może wracać po innej, ale zawsze równoległej drodze w stosunku do wiązki padającej.



Rys.1.2.22.1. Zdjęcie retropryzmatu firmy Renishaw.



Rys.1.2.22.2. Schemat zmodyfikowanego interferometru Michelsona z laserem He-Ne jako źródło światła oraz retropryzmatami do separacji wiązki powrotnej [1.10], [3.09], [1.27], [1.15]. Układ w konfiguracji do pomiaru przemieszczenia.

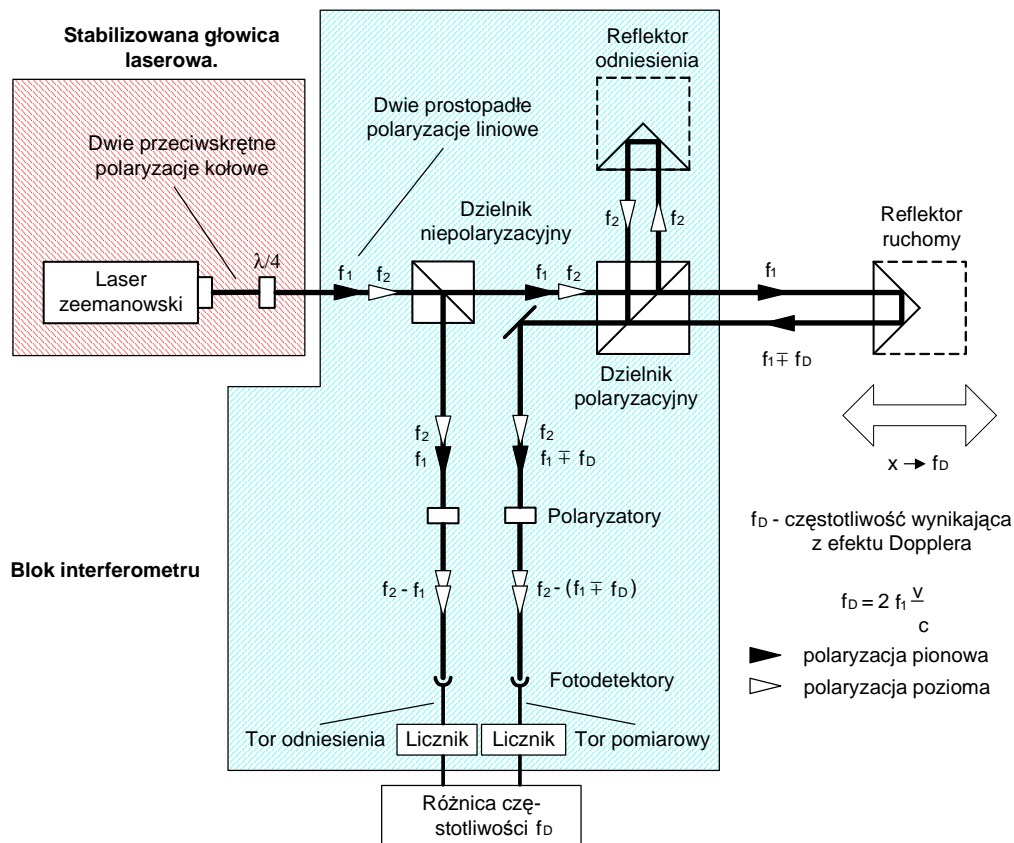
Rozwiązanie to ze względu na prostotę jest stosowane we wszystkich interferometrach przeznaczonych do kalibracji WMP czy maszyn obróbczych (nie dotyczy układów pomiaru wibracji czy metody wektorowej firmy Optodyne). Oprócz opisanej izolacji wiązki wstecznej

układ ten jest dodatkowo niewrażliwy na nieprostopadłe prowadzenie retropryzmat w stosunku do wiązki laserowej. W układach z zwierciadłami każdy ruch kątowy zwierciadła powoduje ucieczkę wiązki z pola detektora i przerywa pomiar. Wadą, natomiast, tego rozwiązania jest stosowanie stosunkowo dużego elementu, jakim jest retropryzmat (reflektor odniesienia), przez co układ nie może być wykorzystany np. do pomiaru wibracji małych obiektów, osi, itp. [Rys.1.2.20]

Dość istotnym parametrem charakteryzującym interferometry laserowe jest sposób stabilizacji [Rozdział 3.1.1] oraz wynikające z niego metody pomiaru dystansu.

Producenci stosują dwa sposoby stabilizacji w swoich konstrukcjach:

- stabilizację heterodynową (LSP-30 Lasertex, MCV-500 Optodyne),
- stabilizację homodynową (ML-10, RLD10 Renishaw, LL10 Lasertex, 5528A Hewlett-Packard, itp.)



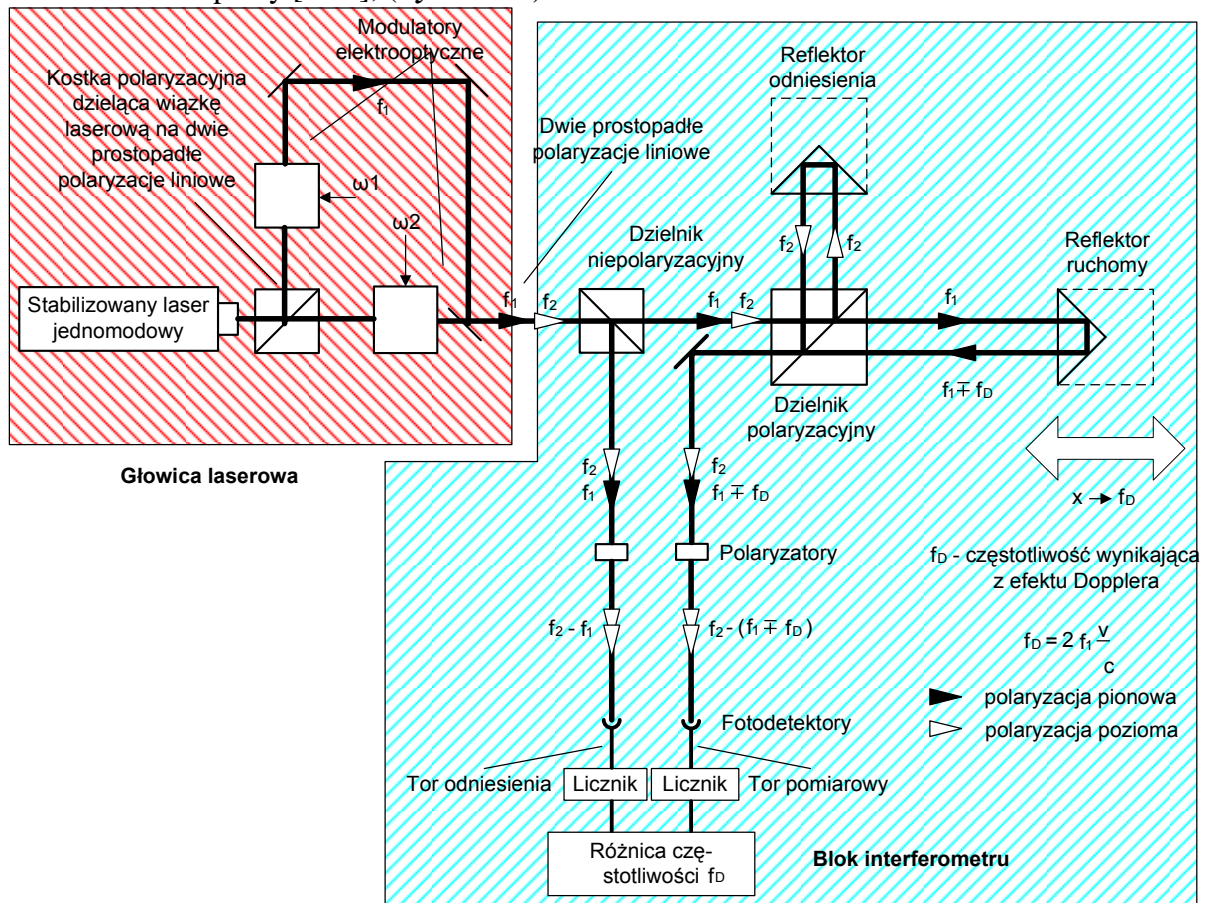
Rys.1.2.23. Schemat blokowy interferometru laserowego z pomiarem heterodynowym [1.45], [2.10].

W układach heterodynowych mierzona jest częstotliwość  $f_0$  [Rys.1.2.23] wynikająca z efektu Dopplera, powstająca podczas przesuwania retropryzmatu w torze pomiarowym. Ponieważ mierzona jest różnica częstotliwości sygnałów toru pomiarowego i odniesienia, układ jest bardzo mało wrażliwy na wahania amplitudy wiązki powrotnej czy zakłócenia docierające do detektorów (znacznie większy stosunek sygnał/szum w porównaniu do układów homodynowych). Podstawowa rozdzielczość wynika bezpośrednio z częstotliwości wiązki użytego lasera i wynosi  $\lambda/2$ . Możliwa jest cyfrowa interpolacja sygnału pomiarowego przez zastosowanie układów mnożących częstotliwość (np.: stukrotne zwiększenie

rozdzielczości). Wadą tych interferometrów jest stosunkowo mała maksymalna prędkość przesuwania retropryzmatu w torze pomiarowym, wynikająca z również małej wartości częstotliwości Zemana (ok. 1MHz [1.27]; **Rozdział 2.1.2, Rozdział 4.1.3**) i ograniczonych zmian częstotliwości wynikających z efektu Dopplera. Metoda heterodynowa daje poprawne rezultaty tylko wtedy, gdy  $f_D$  nie przekracza wartości różnicy częstotliwości lasera  $f_2 - f_1$ , co ogranicza maksymalną prędkość przesuwu ramienia pomiarowego, w jednym z kierunków, do ok. 0.3 m/s. Kolejną wadą metody heterodynowej jest używanie obu generowanych częstotliwości, podczas gdy w metodzie homodynowej druga z częstotliwości może być dowolnie użyta, np. do pomiaru przemieszczenia w drugiej osi pomiarowej. W metodzie heterodynowej pomiar drugiej osi przy zastosowaniu jednego źródła jest również możliwy, ale wymaga zastosowania dodatkowego dzielnika, co zmniejsza, o co najmniej 50% dostępną moc wiązki pomiarowej.

Możliwa jest konstrukcja interferometru heterodynowego w oparciu o dwudomowy stabilizowany laser He-Ne bez rozszczepienia zeemanowskiego. Wykorzystywane są dwa modulatory akustooptyczne do rozsunięcia względem siebie, w funkcji częstotliwości, dwóch prostopadłych polaryzacji wiązki laserowej [2.20]. Rozwiązanie to może zwiększyć maksymalną prędkość przesuwania retropryzmatu.

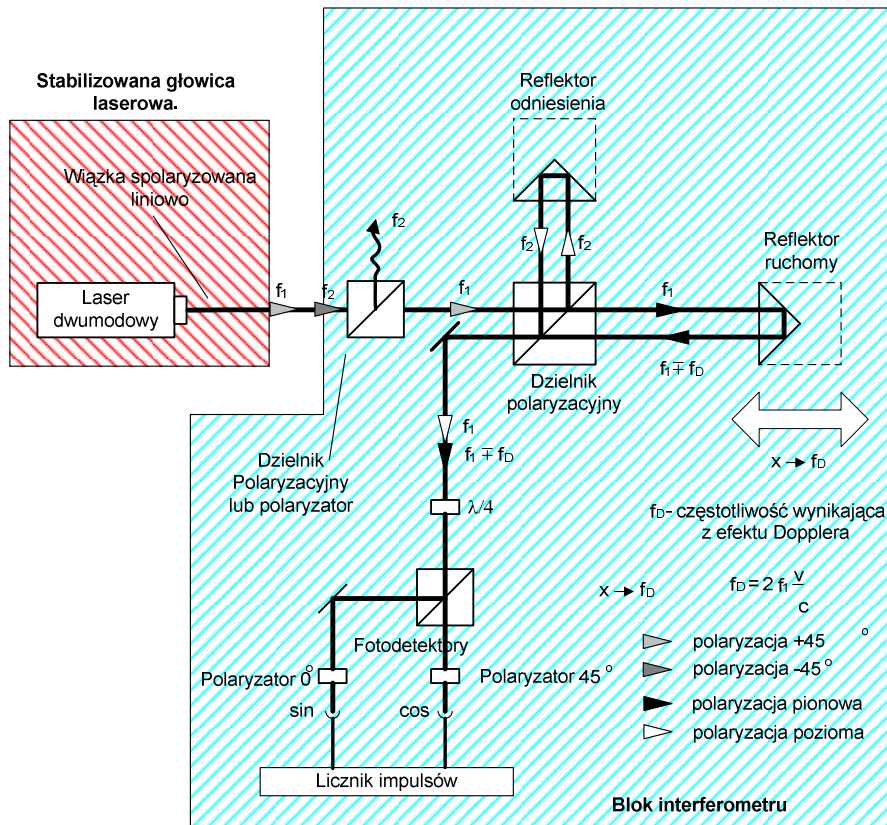
Podobne rozwiązanie, ale z wykorzystaniem stabilizowanego lasera jednomodowego, zostało zrealizowane w pracy [2.20], (**Rys.1.2.24**).



**Rys.1.2.24. Układ interferometru laserowego ze stabilizacją heterodynową częstotliwości lasera w oparciu o równowagę mocy dwu składowych z modulatorami elektrooptycznymi [2.20], [3.09], [2.28], [2.29].**

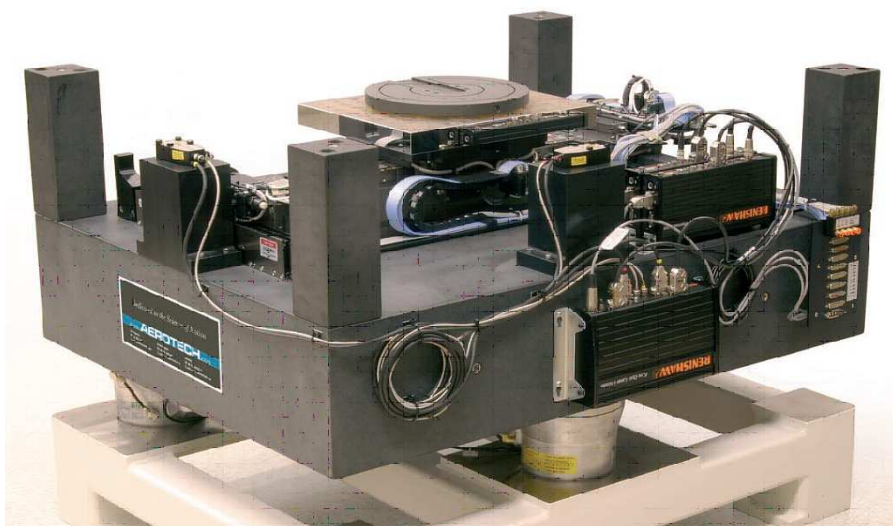
Wiązka światła laserowego o z lasera jednomodowego zostaje rozłożona na dwie składowe polaryzacje: pionową i poziomą za pomocą kostki polaryzacyjnej. Następnie obie polaryzacje są niezależnie modulowane na modulatorach elektrooptycznych tak, że częstotliwość

sygnałów modulujących różni się o kilka MHz. Układ pomiarowy i detekcyjny jest identyczny z klasycznym układem z rozszczepieniem linii emisyjnej [Rys.1.2.23].



Rys.1.2.25. Schemat blokowy interferometru laserowego z pomiarem homodynowym [1.32].

W układach homodynowych mierzona jest amplituda sygnałów pomiarowych i detekowana ich faza (głównie ze względu na konieczność detekcji przejścia przez „zero”; również w celu późniejszej, ewentualnej interpolacji). Z układu detekcyjnego otrzymuje się dwa przebiegi sinusoidalne przesunięte względem siebie w fazie o 90°. Istnienie dwóch sygnałów sinusoidalnych pozwala na detekcję kierunku ruchu retropryzmatu w torze pomiarowym. Ponieważ ten format danych wyjściowych z interferometru może być identyczny z tym, jaki uzyskuje się z liniałów optycznych, lasery homodynowe mogą być również stosowane we współrzędnościowych maszynach pomiarowych, jednak ze względu na znacznie większe koszty (w porównaniu do liniału optycznego) stosowane są w układach wymagających bardzo dużej dokładności pomiaru przemieszczenia (np.: pozycjonowanie „wafli” krzemowych podczas produkcji układów scalonych).



**Rys.1.2.26. Stolik do bardzo dokładnego pozycjonowania firmy Aerotech Inc. z sześcioma interferometrami laserowymi RLE10 (RLE20) firmy Renishaw.**

Podstawowa rozdzielczość wynika bezpośrednio z częstotliwości wiązki użytego lasera i wynosi  $\lambda/2$  (lub  $\lambda/4$ ), możliwa jest jednak analogowa lub cyfrowa interpolacja sygnału pomiarowego i uzyskanie rozdzielczości rzędu ułamka nm.

Wadą tego typu interferometrów jest stosunkowo duża wrażliwość na zakłócenia świetlne docierające do detektorów pomiarowych, wynikająca z tego, że w układach homodynowych bardzo ważna jest wartość amplitudy obu sygnałów pomiarowych. Jakikolwiek zakłócenie wartości amplitudy może spowodować błąd w odczycie tej amplitudy i błędne naliczenie przesunięcia. Szczególnie jest to istotne podczas interpolacji sygnału pomiarowego, gdzie jeden okres sinusoidalnego przebiegu pomiarowego jest dzielony na dziesiątki, setki lub nawet tysiące części i na podstawie chwilowej amplitudy wyznaczany jest sygnał interpolowany.

Ponieważ w układach homodynowych wykorzystywany jest jeden z dwóch modów wiązki laserowej do budowy kompletnego toru pomiarowego [Rys.1.2.25], drugi mod można wykorzystać do budowy kolejnego kompletnego układu pomiaru interferometrycznego. Na rysunku Rys.1.2.26 widać trzy interferometryczne systemy pomiarowe RLE10 (RLE20): trzy jednostki główne RLU 10 (RLU20) z laserami He-Ne oraz światłowodowe głowice pomiarowe RLD10 (RLD20) firmy Renishaw. Do każdego systemu RLU10 (lub RLU20) można podłączyć dwie światłowodowe głowice pomiarowe typu RLD. Pomiar może być jednoprzebiegowy, dwuprzebiegowy, różnicowy z wyjściem równoległym bądź prostopadłym do głównej osi głowicy. Możliwy jest pomiar przesunięcia w konfiguracji gdzie wiązka w torze pomiarowym odbija się zarówno od luster jak i od retropryzmatu.



**Rys.1.2.27. Głowica światłowodowego interferometru laserowego RLU10 90° firmy Renishaw w układzie pomiarowym.**

Wszystkie układy interferometrów laserowych, mimo, że zapewniają rozdzielczości rzędu nawet ułamka nm, w rzeczywistości, w warunkach „pokojowych”, oferują dokładność mierzoną w  $\mu\text{m}$ . Różnica ta wynika z wspomnianej zależności długość fali źródła w powietrzu od wspomnianych czynników środowiskowych (nie dotyczy pomiarów w próżni). Aby uzyskać satysfakcjonujące dokładności wyznaczana jest chwilowa długość fali promieniowania przez wyznaczenie współczynnika załamania powietrza. Wiąże się to z koniecznością zmierzenia i wyznaczenia chwilowych wartości: temperatury, ciśnienia oraz wilgotności.

Każdy prążek interferencyjny posiada szerokość, wyrażoną wzorem:

$$L = N * \frac{\lambda}{2} \quad (1.2.15)$$

gdzie:  $N$  – liczba impulsów,  $\lambda$  - długość fali źródła światła.

Zgodnie z formułą:

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad (1.2.16)$$

Długość fali zależy od częstotliwości lasera  $f$  i prędkości światła  $v$  na drodze pomiarowej. Gdyby pomiar był dokonywany w próżni, to  $v = c = 3 \cdot 10^8$  m/s. Prędkość fali świetlnej w ośrodkach innych niż próżnia jest mniejsza i wyraża się wzorem

$$v = \frac{c}{n} \quad (1.2.17)$$

gdzie:  $n$  – współczynnik załamania.

Dla pomiarów o małej dokładności lub dla pomiarów w próżni, przyjmuje się, że  $n$  jest stałe i zależy tylko od rodzaju ośrodka. W rzeczywistości wartość współczynnika załamania zależy od wielu parametrów. W stosunku do fali świetlnej rozchodzącej się powietrzu najistotniejsze są wpływy ciśnienia  $P$ , temperatury  $T$  i wilgotności  $H$ . Zależność  $n_{T,P,H}$  dla powietrza z zawartością  $\text{CO}_2$  na poziomie 300ppm, została wyznaczona empirycznie przez Ediena i dana jest wzorem [1.31 -1.33]:

$$n_{T,P,H} - 1 = 2,8775 * 10^{-7} * P \frac{1 + 10^{-6} * P * (0,613 - 0,00997 * T)}{1 + 0,003661 * T} + \Delta n \quad (1.2.18)$$

$$\Delta n = -3,033 * 10^{-9} * H * e^{0,057627 * T} \quad (1.2.19)$$

Z powyższych wzorów wywodzą się zależności współczynnika załamania dla poszczególnych zmiennych środowiskowych w warunkach normalnych (T=293K, P=1000hPa, H=50%):

$$\frac{\partial n}{\partial T} = -0,93 * 10^{-6} \left[ \frac{1}{K} \right] \quad (1.2.20)$$

$$\frac{\partial n}{\partial P} = +0,27 * 10^{-6} \left[ \frac{1}{hPa} \right] \quad (1.2.21)$$

$$\frac{\partial n}{\partial H} = -0,96 * 10^{-8} \left[ \frac{1}{\%} \right] \quad (1.2.22)$$

Najbardziej krytycznym czynnikiem jest temperatura, gdyż jej zmiana o 1°C powoduje o rząd większe zmiany wartości współczynnika n niż zmiana ciśnienia o 1hPa i o dwa rzędy większe zmiany niż zmiana wilgotności o 1%.

Do kompensacji zmian parametrów środowiskowych firma Renishaw oferuje moduł RCU10 (refraktometr). Monitoruje on warunki środowiska obrabiarki za pośrednictwem sieci czujników oraz realizuje zaawansowaną kompensację sygnałów zwrotnych położenia, zanim zostaną przekazane do dalszej części systemu pomiarowego, np.: do układu sterowania przemieszczeniami w WMP lub obrabiarce, lub do układu interpolacji. System umożliwia pomiar temperatury w sąsiedztwie toru wiązki. Dzięki takiej kompensacji można uzyskać dokładność pomiaru rzędu  $\pm 1\mu\text{m}/\text{m}$ . Dodatkowo w układach, gdzie interferometr laserowy zastępuje liniał optyczny możliwa jest dynamiczna kompensacja parametrów środowiskowych przez modyfikację sygnałów wyjściowych z interferometru. Sterowana takimi sygnałami maszyna obróbcza wykona zaprojektowany przedmiot w taki sposób, że będzie on posiadał wymiary mieszczące się w określonych tolerancjach dla każdej temperatury pracy przedmiotu.

Inne firmy oferują własne systemy kompensacji parametrów środowiskowych [2.21]. Często możliwy jest dodatkowy pomiar temperatury maszyny, której parametry są mierzone, lub obrabianego materiału. Należy jednak zwrócić uwagę, w jaki sposób umieszczone są takie czujniki, bowiem niewłaściwe ich umieszczenie może wprowadzić dodatkowe błędy pomiaru. Wartości błędów mogą być bardzo duże. Przykładowa rozszerzalność stali wynosi około  $11,5\mu\text{m}/\text{m}/^\circ\text{C}$

Niestety, z tego powodu, zastosowanie we WMP interferometrów laserowych zamiast liniałów optycznych nie zwalnia z konieczności kalibracji maszyny i pracy w ustabilizowanych warunkach temperaturowych.

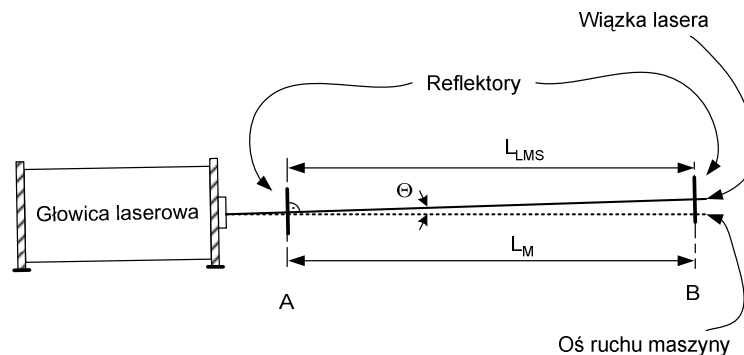
Dodatkowe błędy pomiaru interferometrem laserowym mogą wynikać z rozjustowania pomiarowego toru optycznego, tj. wtedy, gdy wiązka padająca na retropryzmat pomiarowy i wiązka odbijająca się od niego nie są równoległe do osi ruchu. Powoduje to rozbieżność między odległością zmierzoną, a odległością faktycznie przebytą. Ten błąd rozjustowania jest znany pod nazwą błędu cosinusa, gdyż wielkość tego błędu jest proporcjonalna do kąta między niezrównoległymi wiązkami: wiązką lasera i osią ruchu.



Kiedy wiązka promieniowego laserowego jest nierównoległa do osi ruchu, błąd cosinusa spowoduje, że zmierzona odległość będzie mniejsza niż odległość rzeczywista.

Jeśli jako reflektor używane jest lustro płaskie, wiązka laserowa musi być prostopadła do tego zwierciadła aby jednocześnie była równoległa do osi ruchu maszyny [Rys.1.2.28]. Gdy maszyna zmienia położenie z punktu A do B, wiązka lasera pozostanie prostopadła do płaszczyzny zwierciadła, ale będzie przemieszczać się po jego powierzchni. Zmierzona przez system pomiarowy odległość  $L_{LMS}$  będzie mniejsza od rzeczywistej drogi pokonanej przez narzędzie obróbcze  $L_M$  zgodnie z zależnością:

$$L_{LMS} = L_M \cdot \cos \Theta \quad (1.2.23)$$



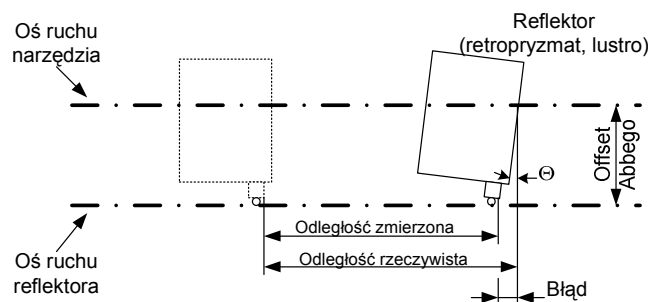
**Rys.1.2.28. Rozjustowanie wiązki jako przyczyna błędu cosinusa [1.35], [3.09].**

Jedynym sposobem eliminacji błędu cosinusa jest przeprowadzenie dokładnego justowania układu przed wykonaniem pomiaru.

Gdy narzędzie obróbcze przesuwa się wzdłuż osi, prowadnice spełniają dwie podstawowe funkcje: po pierwsze, utrzymanie prostopadłości ruchu; po drugie, zabezpieczenie narzędzia przed ruchami kątowymi (skrętnymi; Rys.1.2.29).

Błędy wprowadzone przez ruchy kątowe definiują tzw. błąd Abbe'go. Jeśli pomiar przemieszczenia jest dokonywany w miejscu oddalonym o pewne przesunięcie (tzw. offset Abbe'go) od rzeczywistego punktu przemieszczenia, to odległość rzeczywista jest inna od odległości zmierzonej. Na każdą sekundę łuku ruchu kątowego wprowadzany błąd wynosi około  $5\mu\text{m}$  na 1m przesunięcia [1.31], [1.27].

Uniknięcie błędu Abbe'go jest możliwe wtedy, gdy reflektor prowadzony jest w identyczny sposób jak narzędzie obróbcze.



**Rys.1.2.29. Ilustracja błędu Abbe'go, [1.45], [3.09].**

W związku z istnieniem powyższych źródeł błędów większość producentów interferometrów pomiarowych podaje dokładność swoich interferometrycznych systemów pomiarowych na poziomie  $\pm 1,5\mu\text{m}/\text{m}/^\circ\text{C}$  przy włączonym układzie kompensacji parametrów środowiskowych.

Nazwa przyrządu	Typ przyrządu	Maksymalna dokładność (rozdzielczość) systemu	Zakres pomiarowy [m]	Zastosowanie	Inne
Renishaw HS10X	He-Ne, homodynowy	$1,5\mu\text{m}/\text{m}/^\circ\text{C}$ (1nm)	60	Ocena maszyn pomiarowych i obróbczych	Zewnętrzny moduł kompensacji parametrów środowiskowych.
Renishaw RLU20	He-Ne, homodynowy, światłowodowe doprowadzeni wiązki laserowej do głowicy	$1,4\mu\text{m}/\text{m}/^\circ\text{C}$ (4nm)	4	Zamiennik liniałów optycznych	Możliwość pomiaru w dwóch osiach z jednym laserem. Wyjście typu A-quad-B. Możliwość interpolacji do części nm. Zewnętrzny moduł kompensacji parametrów środowiskowych.
Lasertex LSP30	He-Ne, heterodynowy	$1,5\mu\text{m}/\text{m}/^\circ\text{C}$ (100 lub 10nm)	30	Ocena maszyn pomiarowych i obróbczych	Najmniejszy przenośny interferometr laserowy. Zintegrowany moduł kompensacji parametrów środowiskowych.
HP 5529	He-Ne, homodynowy	$2\mu\text{m}/\text{m}/^\circ\text{C}$ (100nm) $\sim 0,3\text{m}/\text{sek}$ (dokładność zależna od temperatury otoczenia)	30	Ocena maszyn pomiarowych i obróbczych	Zintegrowany moduł kompensacji parametrów środowiskowych. Możliwość równoczesnych pomiarów w dwóch osiach.
SIOS MI 5000	He-Ne, światłowodowe doprowadzeni wiązki laserowej do głowicy	(1nm)	5	Zamiennik liniałów optycznych	Przeznaczony do montażu.
Optodyne MCV-500	He-Ne, heterodynowy	$\pm 1\mu\text{m}/\text{m}/^\circ\text{C}$ (10nm)	do 100	Ocena maszyn pomiarowych i obróbczych.	Umożliwia pomiary przestrzenne („wolumetryczne”) metodą firmy Optodyne. Możliwość wykorzystania jako optycznego „ball-baru” (1.2.6)
ZLI 150 Spindler & Hoyer	He-Ne	$\pm 0,5\mu\text{m}/\text{m} \pm 0,02\mu\text{m}$ $\pm 0,001\mu\text{m}$ (maks: $\pm 0,5\mu\text{m}/\text{m} \pm 0,02\mu\text{m}$ $\pm 0,08\mu\text{m}$ )	40	Ocena maszyn pomiarowych i obróbczych.	Zewnętrzny refraktometr LR1

**Tabela 1.2.4. Parametry przykładowych interferometrów laserowych firm: HP, Renishaw, SIOS, Lasertex, Optodyne, Spindler& Hoyer .**

#### Zalety interferometrów laserowych:

- Możliwość pomiaru przemieszczeń z dokładnością rzędu pojedynczych  $\mu\text{m}$  w powietrzu oraz ułamka nm w próżni,
- Możliwość bezstykowych pomiarów przesunięć, wibracji, kąta.
- Możliwość pomiaru innych wielkości nieelektrycznych jak np.: temperatura (interferometry światłowodowe), ciśnienie, itp.

### Wady interferometrów laserowych:

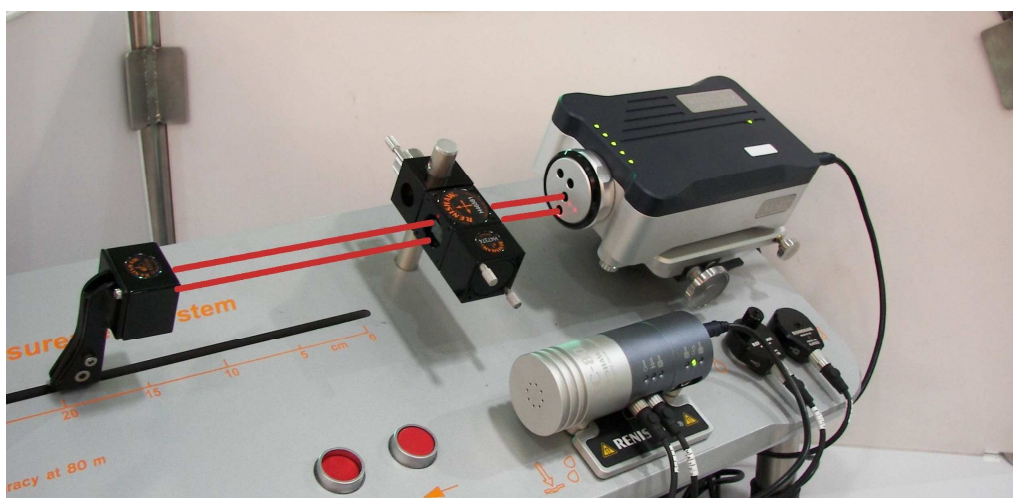
- Wrażliwość długości fali źródła na warunki środowiskowe,
- Możliwość wprowadzenia dodatkowych błędów do pomiaru przez niewłaściwe umieszczenie czujników parametrów środowiskowych,
- Konieczność stosowania drogiej i skomplikowanej optyki, innej dla każdego typu pomiaru,
- Wrażliwość na zabrudzenia optyki, silne pola magnetyczne i zakłócenia elektromagnetyczne.

## 1.2.5. METODY POMIAROWE WYKORZYSTUJĄCE INTERFEROMETR LASEROWY.

Ze względu na bardzo dużą rozdzielczość oraz dużą dokładność pomiaru interferometry laserowe są wykorzystywane w wielu układach, gdzie wymagany jest pomiar przemieszczenia, kąta, itp. Szczególne miejsce interferometr laserowy znalazł w procedurach kalibracji współrzędnościowych maszyn pomiarowych oraz obrabiarek, w procesie weryfikacji wymiarów niektórych produktów, a także w laboratoriach pomiarowych w różnych systemach pozycjonowania.

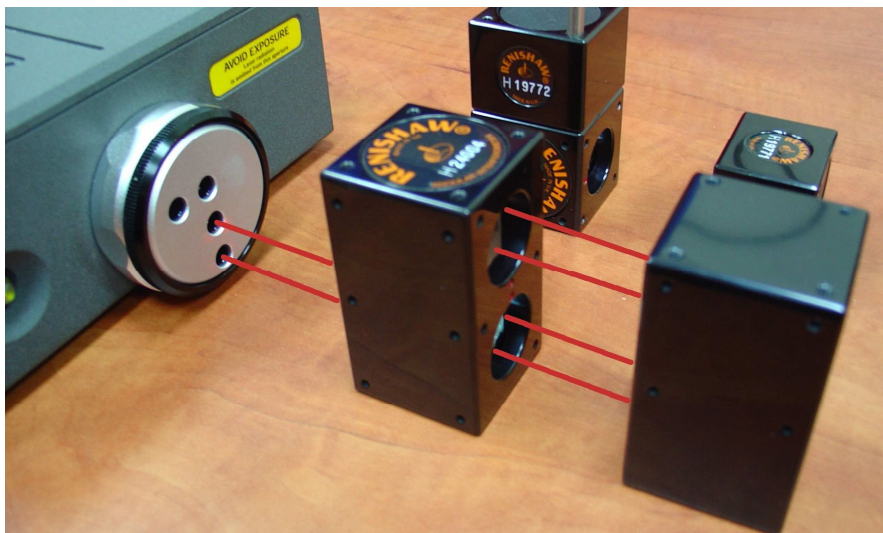
Poniżej przedstawiono różne rodzaje pomiarów, jakie można wykonać interferometrem laserowym z uwzględnieniem zapotrzebowania przemysłu.

Podczas pomiarów błędów maszyny **POMIARY LINIOWE** są najczęściej wykorzystywaną opcją pomiarową. Wymagany jest podstawowy układ optyczny składający się z polaryzacyjnej kostki światłdzielącej, retropryzmatów w torze pomiarowym oraz w torze odniesienia [Rys.1.2.23-1.2.25, Rys.1.2.30]. Konfiguracja taka umożliwi wykonanie pomiarów przemieszczeń liniowych, pomiarów prędkości przesuwu, pomiarów pozycjonowania maszyny obróbczej oraz wibracji [Rys.1.2.21]. Pomiary można wykonywać w trzech wzajemnie prostopadłych osiach pomiarowych X, Y, Z. Zmiana osi pomiarowej wymaga przestawienia optyki.



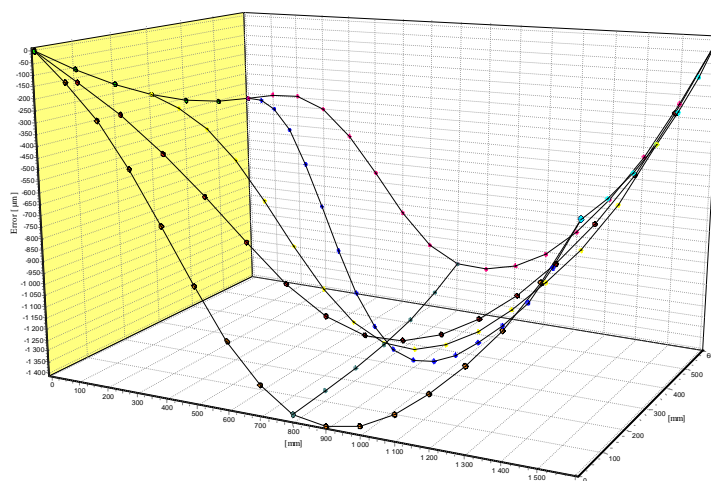
*Rys.1.2.30. Interferometr laserowy XL80 firmy Renishaw w konfiguracji do pomiaru przemieszczenia (pozycjonowania liniowego osi X) wraz z modulem pomiaru parametrów środowiskowych XC80 oraz czujnikami temperatury [1.34].*

**POMIARY KĄTOWE** wykorzystywane są do pomiarów prostoliniowości łoża maszyny obróbczej, płaskości powierzchni i do pozycjonowania kąтового. Pomiary prostoliniowości można wykonywać w trzech wzajemnie prostopadłych osiach pomiarowych X, Y, Z. Zmiana osi pomiarowej wymaga przestawienia optyki.



*Rys.1.2.31. Interferometr laserowy ML10 firmy Renishaw w konfiguracji do pomiarów kątowych (prostoliniowości lub płaskości powierzchni). Oś X [1.34].*

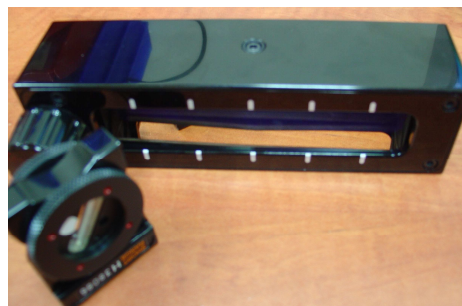
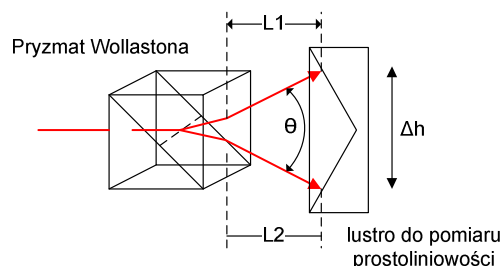
**POMIARY PŁASKOŚCI** powierzchni składają się z serii *pomiarów prostoliniowości* (pomiarów kątowych) na badanej powierzchni. Lokalizacja odcinków, w jakich wykonywane są pomiary prostoliniowości zależne są od wymaganych norm lub zaleceń, badanej powierzchni lub wymagań producenta.



*Rys.1.2.32. Przykładowa mapa płaskości stołu wykonana interferometrem LSP30 firmy Lasertex w konfiguracji do pomiarów płaskości powierzchni (w układzie koperty) [1.15], [1.27].*

Pomiar prostoliniowości i płaskości a także **prostopadłości** można również wykonać za pomocą układu z **pryzmatem Wollastona** [Rys.1.2.33].

Pryzmat Wollastona to kostka złożona z dwóch prostokątnych pryzmatów z kryształu dwójłomnego (np.: kalcytu), stosowana do rozdzielania wiązki światła na dwa promienie spolaryzowane liniowo w płaszczyznach wzajemnie prostopadłych i rozchodzące się względem siebie pod pewnym kątem  $\theta$  (zbudowany przez W.H. Wollastona).



**Rys.1.2.33. Schemat układu oraz zdjęcie optyki firmy Resnishaw do pomiarów płaskości powierzchni z wykorzystaniem pryzmatu Wollastona [1.34].**

Zmiana położenia w pionie specjalnie skonstruowanego zwierciadła powoduje odpowiednio zmniejszenie lub zwiększenie drogi optycznej dla jednej z dwóch polaryzacji wydzielonych przez pryzmat. Błąd prostoliniowości wynosi:

$$S_E = 0,5 \cdot (L1 - L2) / \sin \theta \quad (1.2.24)$$

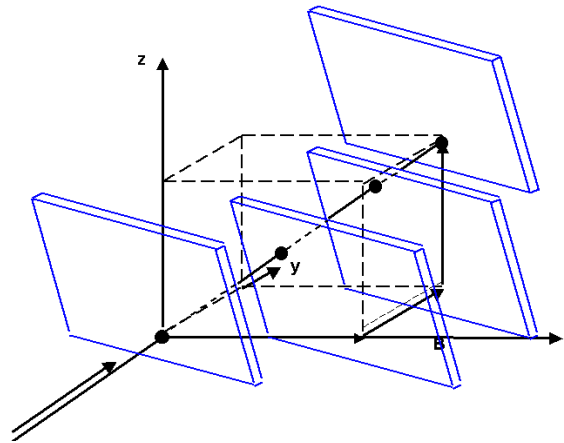
gdzie:  $L1$ ,  $L2$  – odległości pomiędzy pryzmatem Wollastona a zwierciadłem dla poszczególnych polaryzacji,  $\theta$  – kąt pomiędzy rozszczepionymi wiązkami.

Pomiary te są bardzo rzadko stosowane, ponieważ są bardzo czasochłonne i bardzo trudne w wykonaniu. Dodatkowo wymagane są kosztowne elementy optyczne.

W przypadku konieczności wyznaczenia błędów współrzędnościowej maszyny pomiarowej lub obrabiarki, prostszą metodą, wydaje się być wektorowa metoda firmy Optodyne.

Metoda ta wykorzystuje system pomiarowy złożony z interferometru heterodynowego MCV-500 firmy Optodyne oraz płaskiego zwierciadła.

Interferometr MCV-500 jest zintegrowaną konstrukcją zawierającą stabilizowany laser He-Ne, układ optyczny izolujący wiązkę powrotną oraz układ detekcyjny. Wiązka powrotna wraca po tej samej drodze co wychodząca z interferometru, dzięki czemu możliwy jest pomiar punktowy od zwierciadła lub powierzchni bardzo silnie odbijającej światło (lustrzanej) bez dodatkowych izolatorów optycznych. Podczas pomiaru, w torze pomiarowym, wykorzystywane jest zwierciadło płaskie o zwiększonej powierzchni, tak, aby możliwe było jego przemieszczenie w osiach maszyny o kilka, kilkanaście milimetrów bez przerwania wiązki pomiarowej.



**Rys.1.2.34. Sposób realizacji pomiaru błędów maszyny obróbczej lub WMP z wykorzystaniem wektorowej techniki pomiarowej firmy Optodyne [1.36].**

Lustro zamontowane jest na wrzecionie maszyny. Przesuwając lustro o stały krok  $dR$ , kolejno w osiach X, Y, Z maszyny, w ten sposób, aby wiązka z interferometru nie dochodziła do żadnej z krawędzi zwierciadła (i cały czas się od zwierciadła odbijała, powracając do głowicy interferometru), można wyznaczyć cząstkowe błędy pozycjonowania  $dE(X)$ ,  $dE(Y)$ ,  $dE(Z)$  dla danej przekątnej przestrzeni obróbczej (lub pomiarowej) maszyny. Suma wszystkich błędów cząstkowych daje informację o błędzie pozycjonowania dla przekątnej oraz o błędach pozycjonowania dla osi X, Y, Z.

Po pomiarze czterech przekątnych przestrzeni roboczej maszyny uzyskuje się dwanaście zestawów danych, z których można wyliczyć trzy błędy przemieszczenia, 6 błędów płaskości i 3 błędy prostopadłości.

Metoda wektorowa pozwala na pięciokrotne skrócenie czasu wyznaczenia błędów współrzędnościowej maszyny pomiarowej [1.36] w stosunku do metody zakładającej indywidualne pomiary poszczególnych błędów maszyny. Dodatkowo jest w pełni zgodna z normami ASME B5.54 oraz PN-ISO 230-2.

Wadą tej metody jest konieczność konstrukcji zakupu odpowiedniego interferometru (bez izolacji geometrycznej wiązki laserowej wychodzącej i powracającej) lub zakup licencji na tę technikę pomiarową i konstrukcja systemu pomiarowego we własnym zakresie.

Odpowiednie oprogramowanie firmy Optodyne umożliwia wykorzystanie układu do pomiaru metodą wektorową do szybkiej oceny stanu technicznego maszyny (oceny błędów) analogicznie do metody z wykorzystaniem „ballbara” [Rozdział 1.2.6].

## 1.2.6. INNE METODY POMIAROWE POMIARU PRZEMIESZCZENIA.

Wszystkie systemy interferometryczne stosowane do weryfikacji błędów maszyny, pomimo, że oferują wystarczającą dokładność, wymagają długiego czasu na ustawienie systemu pomiarowego, kalibrację i wykonanie samego pomiaru. Wtedy, kiedy nie jest wymagany dokładny pomiar błędów maszyny a jedynie sprawdzenie czy błędy nie przekraczają maksymalnych, dopuszczalnych błędów idealnym rozwiązaniem są tzw. „ballbary”

Firma Renishaw skonstruowała przyrząd pomiarowy o nazwie „ballbar”, który jest przetwornikiem elektromechanicznym, obudowanym w ten sposób, że umożliwia pomiar w

przestrzeni błędów odwzorowania okręgu. Odpowiednie oprogramowanie wyznacza błędy odwzorowania w odniesieniu do figury idealnej.

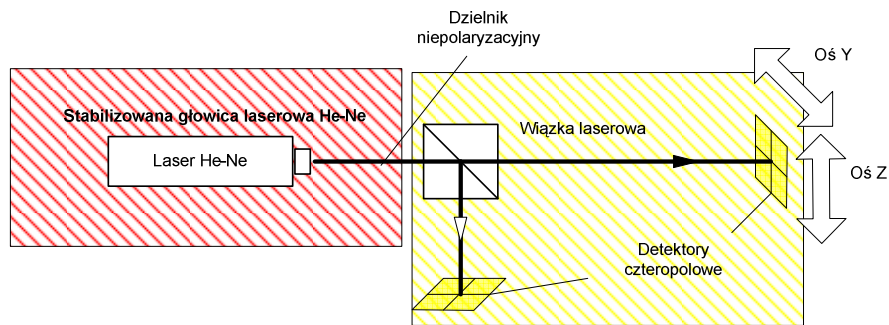


*Rys.1.2.35. System pomiarowy „ballbar” firmy Renishaw oraz hipotetyczny wykres kołowości maszyny.*

System ten pozwala na weryfikację parametrów maszyny współrzędnościowej lub obrabiarki w ciągu kilkunastu minut, zmniejszając wielokrotnie czas postoju maszyny w porównaniu do czasu pomiaru wymaganego przez systemy interferometryczne. Niestety, aby uzyskać dokładne wyniki konieczny jest pomiar standardowymi metodami. Typowa dokładność wynosi  $\pm 20 \cdot 10^{-6}$  cala [1.46].

Analogiczny układ z wykorzystaniem interferometru laserowego zaproponowała firma Optodyne zastępując przetwornik elektromechaniczny lustrem płaskim montowanym na wrzecionie maszyny, o takich wymiarach, które zapewniają ciągłość wiązki laserowej z interferometru podczas wykonywania ruchu po okręgu o promieniu nawet kilkunastu centymetrów. Konieczność zapewnienia powrotu wiązki laserowej do interferometru (detektorów), czyli zapewnienie równoległego prowadzenia zwierciadła podczas całego pomiaru, powoduje, że rozwiązanie to wymaga znacznie więcej czasu w porównaniu do rozwiązania firmy Renishaw. Dodatkowo pomimo zwiększenia rozdzielczości i dokładności pomiaru, ponieważ nie otrzymujemy informacji o wszystkich błędach maszyny, pomiar taki jest również tylko pomiarem weryfikującym przydatność współrzędnościowej maszyny pomiarowej w procesie pomiarowym.

Do mniej dokładnych pomiarów przemieszczenia można wykorzystać wiązkę światła laserowego lub wiązkę z interferometru laserowego oraz elementy półprzewodnikowe, takie jak: detektor czteropolowy (detektor kwadrantowy, ang.: *Quadrant Detektor*) lub detektor PSD (ang.: *Position Sensing Detektor*). Różnice we wskazaniach na obu detektorach będą określać przemieszczenie w osiach: Y oraz Z [Rys.1.2.36].



**Rys.1.2.36. Schemat układu pomiarowego przemieszczenia w osiach Y, Z z wykorzystaniem detektorów kwadrantowych.**

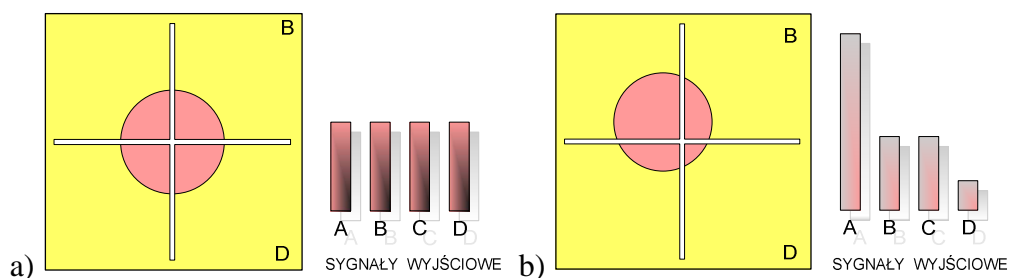
Tego typu metoda pomiarowa z wykorzystaniem detektorów kwadrantowych (lub z większą ilością pól) jest, również, stosowana, między innymi, w pozycjonowaniu wiązki laserowej w odtwarzaczach CD, DVD, MD, HDDVD, Bluray, itp., gdzie pozycjonowanie odbywa się z dokładnością do setnych części  $\mu\text{m}$ .

W kontrolowanych warunkach możliwe jest uzyskanie dokładności odczytu pozycji rzędu dziesiątek nm.

W warunkach ciężkich (przemysłowych; maszyna obróbcza) dokładność odczytu będzie się zawierać pomiędzy pojedynczymi  $\mu\text{m}$  a setkami mikrometrów na mierzony metr, w zależności od układu pomiarowego i czynników środowiskowych.

Podstawowym elementem pomiarowym, w powyższym rozwiązaniu, jest detektor kwadrantowy.

Detektor kwadrantowy składa się z czterech fotodiod krzemowych ułożonych w macierz 2x2, fizycznie odseparowanych od siebie niewielką przerwą wynoszącą od kilku do kilkudziesięciu  $\mu\text{m}$ . Każde pole detektora kwadrantowego posiada osobną wyjściową elektrodę sygnałową. Wiązka światła padając na segment powoduje generację fotoprądu. Kiedy wiązka laserowa pada dokładnie w środek detektora kwadrantowego i na każdy detektor pada taka sama ilość energii (może zależeć od kształtu wiązki), na każdy segment przypada taka sama wartość natężenia światła.



**Rys.1.2.36. Ilustracja zależności wartości sygnałów wyjściowych od pozycji padającej wiązki: a) wiązka pada w środek detektora, b) wiązka przesunięta względem środka detektora [3.12].**

Wyznaczenie pozycji wiązki światła padającej na detektor kwadrantowy wymaga przeprowadzenia obliczeń zgodnie z poniższymi zależnościami:

$$x = \frac{(A + D) - (B + C)}{A + B + C + D} \quad (1.2.25)$$

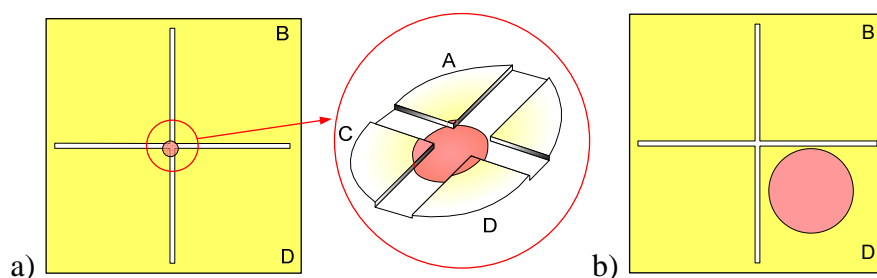


$$y = \frac{(A + B) - (D + C)}{A + B + C + D}, \quad (1.2.26)$$

gdzie:  $x, y$  – pozycja wiązki światła,  $A, B, C, D$  – wartości sygnałów wyjściowych z każdego segmentu detektora kwadrantowego.

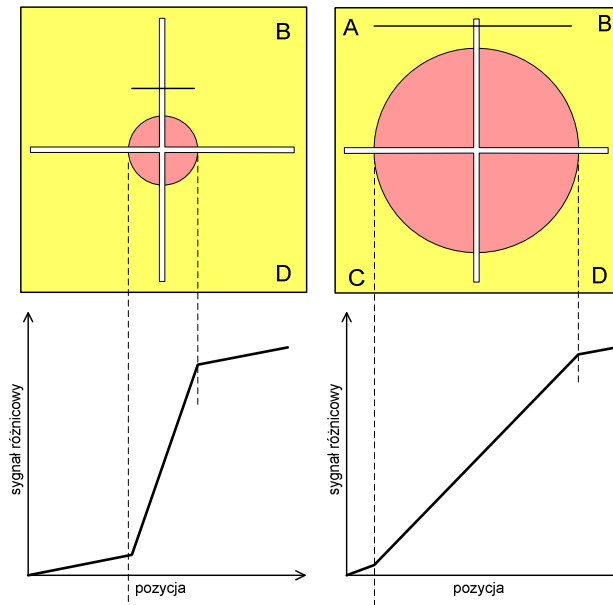
Odpowiedź detektora kwadrantowego na przesunięcie wiązki światła jest nieliniowa. Tak długo, jak wiązka usytuowana jest blisko środka detektora, energie promieniowania padającego na każdy segment są prawie równe i małe przesunięcie wiązki w rezultacie daje małe zmiany sygnału wyjściowego. Gdy wiązka przesuwa się blisko krawędzi detektora, wówczas na jeden lub dwa segmenty (zależnie od położenia wiązki) pada bardzo małe natężenie promieniowania światła i niewielkie przesunięcie w rezultacie powoduje duże zmiany sygnału wyjściowego dla wspomnianych segmentów.

Kolejnym problemem przy stosowaniu detektorów kwadrantowych jest skończona szerokość przerwy pomiędzy segmentami. Jeżeli wiązka laserowa zostanie silnie skupiona, tworząc na powierzchni detektora plamkę bardzo małych rozmiarów, błędna informacja o położeniu będzie rezultatem sytuacji, w której skupiona plamka światła laserowego pada na granicę między segmentami [*Rysunek 1.2.37a*]. Dodatkowo należy zwrócić uwagę na przypadek, w którym informacja o pozycji jest tracona, gdy wiązka pada tylko na jeden segment detektora [*Rysunek 1.2.37b*].



**Rys.1.2.37. Błędy w informacji o położeniu wiązki: a) za małą średnicą wiązki i wpływ szerokości przerw między segmentami, b) oświetlenie tylko jednego segmentu (brak informacji o położeniu)[3.12].**

Dlatego należy pamiętać, że detektor kwadrantowy dostarcza informację o pozycji tylko w przypadku oświetlenia wiązką padającego światła wszystkich czterech segmentów detektora. Zazwyczaj unika się tego typu problemów przez formowanie wiązki laserowej o stosunkowo dużej średnicy przekroju poprzecznego (zależnej od rozmiaru stosowanego detektora) w celu uzyskania maksymalnego zakresu detekcji pozycji. Niestety przy takim rozwiązaniu ograniczana jest bardzo rozdzielczość pomiarowa (mały punkt generuje bardzo duży sygnał różnicowy i odwrotnie) i zakres pomiarowy (maksymalne przesunięcie w obu osiach).



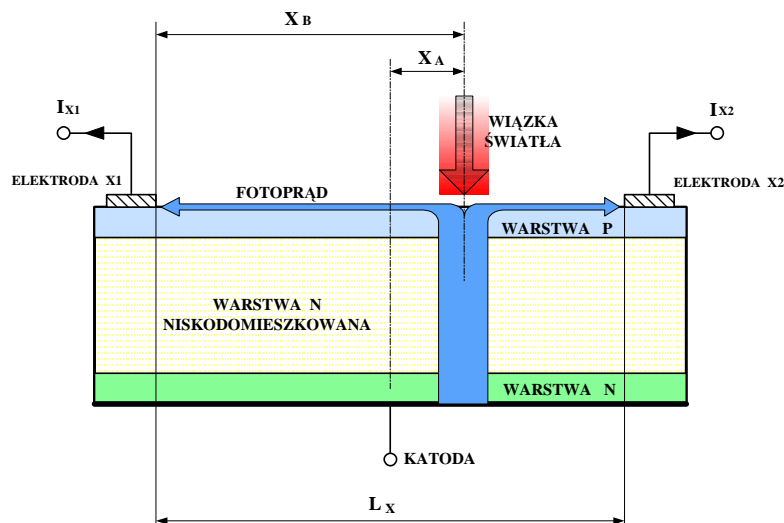
**Rys.1.2.38. Odpowiedź detektora kwadrantowego w zależności od wielkości sygnału pomiarowego [1.05].**

Bardzo podobnym rozwiązaniem do detektorów kwadrantowych są detektory PSD (ang.: *Position Sensing Detektor*).

Detektory pozycji PSD są krzemowymi fotodiodami, które dostarczają wyjściowe sygnały analogowe bezpośrednio proporcjonalne do pozycji wiązki światła padającej na obszar aktywny detektora. Można stwierdzić, iż PSD są analogowymi sensorami pozycji działającymi w trybie pracy ciągłej.

Rozdzielczość i dokładność pomiaru pozycji detektorami PSD jest niestety od dwóch do 10 razy gorsza (rzędu  $0,6 \div 3 \mu\text{m}$ ) w porównaniu do pomiaru detektorem kwadrantowym. Zaletą jest znikoma zależność od rozkładu mocy na powierzchni padającej wiązki, ponieważ zazwyczaj wiązka jest skupiona do punktu.

Zasadę działania oraz schematyczną budowę jednowymiarowego (jednoosiowego) detektora PSD przedstawiono na rysunku **Rys.1.2.39**.



**Rys. 1.2.39. Detektor PSD jednowymiarowy. Budowa i zasada działania [1.40], [1.42], [3.12].**

Kiedy wiązka światła pada na powierzchnię PSD, ładunek elektryczny proporcjonalny do natężenia światła generowany jest w miejscu padania wiązki światła. Ładunek elektryczny płynie poprzez warstwę rezystywną typu p i zbierany jest przez elektrody  $X_1$  i  $X_2$  jako fotoprąd, którego podział jest odwrotnie proporcjonalny do odległości pomiędzy pozycją padania wiązki światła a każdą z elektrod.

Gdy środek detektora PSD jest punktem zerowym pomiaru położenia wiązki światła, związek pomiędzy pozycją padania wiązki światła a wartością fotoprądu na elektrodach  $X_1$  oraz  $X_2$  dany jest następującymi zależnościami [1.05], [1.40], [1.42], [1.43], [3.12] :

$$I_{X1} = \frac{L_x - X_A}{L_x} \cdot I_0 \quad (1.2.27)$$

$$I_{X2} = \frac{L_x - X_A}{L_x} \cdot I_0 \quad (1.2.28)$$

$$\frac{I_{X2} - I_{X1}}{I_{X1} + I_{X2}} = \frac{2 \cdot X_A}{L_x} \quad (1.2.29)$$

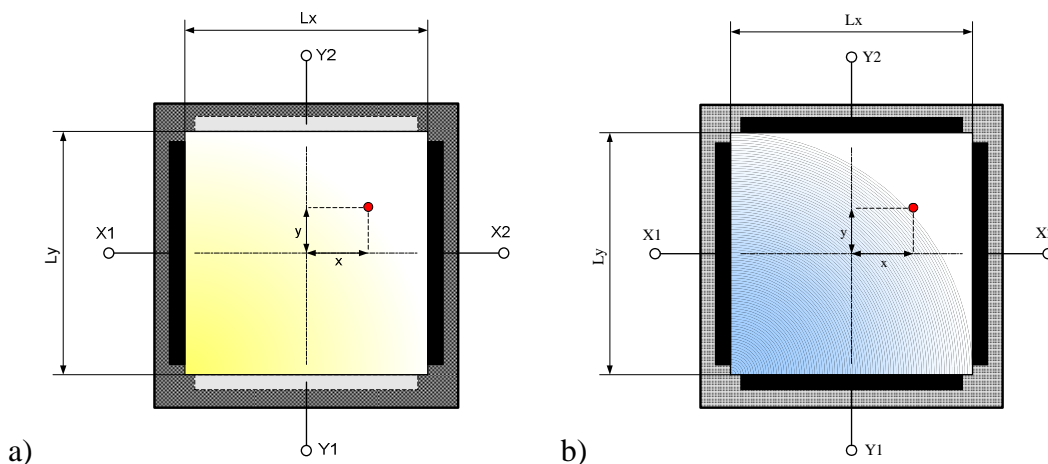
$$\frac{I_{X1}}{I_{X2}} = \frac{L_x - 2 \cdot X_A}{L_x + 2 \cdot X_A} \quad (1.2.30)$$

Zgodnie z zależnościami [1.2.27], [1.2.28], ponieważ wartość całkowita fotoprądu  $I_0$  jest stała, prąd informujący o przesunięciu zależy tylko od wartości tego przesunięcia.

W autorskiej konstrukcji układu interferometru zostały wykorzystane detektory dwuwymiarowe PSD (zamiennie z detektorami kwadranowymi).

Detektory PSD dwuwymiarowe stanowią grupę elementów optoelektronicznych występujących w dwóch podstawowych rodzajach: duolateralnym (dwubocznym) i tetralateralnym (czterobocznym), posiadające dwie pary elektrod  $X_1$   $X_2$  oraz  $Y_1$   $Y_2$ .

Duolateralny typ detektora PSD charakteryzuje się dwoma parami elektrod X i Y znajdujących się po obu stronach detektora PSD (Rys.1.2.40a) usytuowanych ortogonalnie względem siebie.



**Rys.1.2.39. Rysunek przedstawiający budowę detektora: a) PSD duo-lateralnego (katody:  $Y1$ ,  $Y2$ ; anody:  $X1$ ,  $X2$ ), b) PSD tetra-lateralnego (katoda: podłoże; anody:  $X1$ ,  $X2$ ,  $Y1$ ,  $Y2$ ) [1.39], [1.40], [1.42], [3.12].**

Sygnal pozycji  $x$  jest zbierany przez elektrody  $X_1$   $X_2$  z górnej powierzchni warstwy rezystywnej (półprzewodnik typu p) detektora, podczas gdy sygnał pozycji  $y$  zbierany jest przez elektrody  $Y_1$   $Y_2$  z dolnej powierzchni warstwy rezystywnej (półprzewodnik typu n). Sygnały prądowe pozycji  $X$  i  $Y$  mają przeciwną biegunowość, co utrudnia budowę wstępnych układów obróbki wyników pomiaru.

Detektor PSD tetra-lateralny posiada wszystkie cztery elektrody rozmieszczone na krawędziach górnej powierzchni warstwy rezystywnej, ograniczając wielkość obszaru aktywnego [Rys.1.2.40b].

Uzyskany w skutek oświetlenia wiązką światła fotoprąd  $I_0$  jest dzielony na cztery części, ponieważ płynie przez tę samą warstwę rezystywną i zbierany jest jako sygnał pomiarowy z czterech elektrod.

Porównując oba typy detektorów warto zauważyć, że sygnały prądowe w detektorach PSD duolateralnych są dwukrotnie większe, detektor ten charakteryzuje się również większą rozdzielczością detekcji pozycji, mniejszą wartością błędu detekcji pozycji i bardzo dobrymi charakterystykami detekcji, ponieważ elektrody  $X$  i  $Y$  nie znajdują się blisko siebie, lecz na powierzchniach po przeciwnych stronach detektora.

W detektorach PSD tetralateralnych, oddziaływanie pomiędzy elektrodami występuje silnie blisko naroży obszaru aktywnego, powodując większe błędy w wyznaczaniu pozycji wiązki światła przez PSD. Zaletą tetra-lateralnego PSD jest łatwość adaptacji detektora do układu pomiarowego, mały prąd ciemny oraz duża szybkość reakcji.

Schemat układu z detektorem kwadrantowym oraz detektorem PSD został przedstawiony w rozdziale czwartym, natomiast analiza błędów zaprojektowanego rozwiązania w rozdziale piątym pracy.

## Literatura

- [1.01] I.W.Sawielew, „*Wykłady z fizyki 2. Elektryczność i magnetyzm. Fale. Optyka*”, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1994
- [1.02] „*Sonda Tp20 z wymiennym modułem trzpienia*”, materiały reklamowe firmy Renishaw, [www.renishaw.pl](http://www.renishaw.pl)
- [1.03] „*TP20 system. Instalation and user's guide*”, materiały katalogowe firmy Renishaw, 2007, [www.renishaw.pl](http://www.renishaw.pl)
- [1.04] norma VDI/VDE 2617 „*Genauigekait von Koordinatenmessgaräten*”, 1986-1997
- [1.05] R.Jahanson, C.Lantz, “*2-D Optical Position Sensor*”, “Circuit Cellar” nr.152, marzec 2003,
- [1.06] Katalog generalny firmy HEDENHAIN, <http://www.heidenhain.com/>, <http://www.apserwis.com.pl/>, wrzesień 2005,
- [1.07] A.Tyka, A.Góralczyk „*Próba wykorzystania dwuwymiarowego wzorca płytowego z stożkowymi elementami pomiarowymi do kontroli dokładności ramion pomiarowych*”, Konferencja „*Budowa i eksploatacja maszyn*”, Bielsko-Biała, 2006, Zeszyt 22, strony: 1345-360
- [1.08] J.Gawlik, K.Karbowski „*Faults of reproduction of freeform surfaces In reverse engineering system*”, Konferencja „*Budowa i eksploatacja maszyn*”, Bielsko-Biała, 2006, Zeszyt 22, strony: 113-122
- [1.09] J.Hoffmann, A.Weckenmann „*Coordinate measurement with nanometr resolution*”, Konferencja „*Budowa i eksploatacja maszyn*”, Bielsko-Biała, 2006, Zeszyt 22, strony: 113-122
- [1.10] E.Ratajczyk „*Współrzędnościowa technika pomiarowa*”, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2005
- [1.11] Z.Humienny, „*Normalizacja we współrzędnościowej technice pomiarowej*”, Konferencja „*Budowa i eksploatacja maszyn*”, Bielsko-Biała, 2006, Zeszyt 2, strony: 92-98
- [1.12] norma CMM „*Accuracy specification for coordinate measuring machines.*”, London 1989
- [1.13] Materiały reklamowe firmy FARO. Materiały katalogowe FARO Arm „*Titanium and Platinum*”, 2004, [WWW.FARO.COM](http://WWW.FARO.COM)
- [1.14] [http://pl.wikipedia.org/wiki/Do%C5%9Bwiadczenie\\_Michelsona-Morleya](http://pl.wikipedia.org/wiki/Do%C5%9Bwiadczenie_Michelsona-Morleya), 1.10.2007
- [1.15] „*Interferometr LSP30 – podręcznik użytkownika*”, [www.lasertex.eu](http://www.lasertex.eu)
- [1.16] H.Pawotka, „*Metody dyskryminacji i kontroli częstotliwości Zemana w nanointerferometrii laserowej*”, praca doktorska, Politechnika Wrocławska, wydział I-28, 1999
- [1.17] Mueller R., Glas P., „*Bistability, regular self-pulsing and chaos in lasers with external feedback*”, *Journal of the Optical Society of America B*, zeszyt. 2, nr. 1, strony 184-192, styczeń 1985
- [1.18] Jones D.J., Bandy D.K., „*Attractors and chaos in the laser with injected signal*”, *Journal of the Optical Society of America B*, zeszyt 7, nr 10, strony 2119-2126, październik 1990
- [1.19] Abraham N.B., Lugiato L.A., Narducci L.M., „*Overview of instabilities in laser systems*”, *Journal of the Optical Society of America B*, zeszyt 2, nr. 1, strony 7-14, styczeń 1985
- [1.20] J.Jezierski, M.Olszaniecki, E.Stepnowski, P.Sieczka, „*Pomiary na centrach obróbkowych i na współrzędnościowych maszynach pomiarowych (WMP) z układami sterowania CNC*”, „*Materiały Akademii Techniczno-Humanistycznej*”, Bielsko-Biała, 2002,
- [1.21] M.Kowalski, R.Rakoczy, „*Wpływ temperatury otoczenia na charakter pola błędów identyfikowanego płytami kontrolnymi*”, V Międzynarodowa Konferencja Naukowa „*Współrzędnościowa technika pomiarowa*”, Bielsko-Biała - Ustroń, 25-27.04.2002
- [1.22] Z.Humienny, „*Specyfikacje geometrii wyrobów*”, WNT, Warszawa 2004,
- [1.23] Renishaw, materiały katalogowe i reklamowe, [www.renishaw.pl](http://www.renishaw.pl), 2007
- [1.24] <http://www.mellesgriot.com/glossary/wordlist/glossarydetails.asp?wid=69>, MellesGriot, materiały informacyjne, ZERODUR, wrzesień 2007
- [1.25] Halliday D., Resnick R., „*Fizyka 2*” tom 2, PWN, Warszawa 1994
- [1.26] Buczek C.J., Freiberg R.J., Skolnick M.L., „*Laser injection locking*”, *Proceedings of the IEEE*, strony 1411-1431, październik 1973
- [1.27] Dokumentacja techniczna sytemu laserowego LSP30. Dzięki uprzejmości firmy Lasertex, [www.lasertex.eu](http://www.lasertex.eu)
- [1.28] Smith R.G., „*Use of the acoustooptic light deflector as an optical isolator*”, *IEEE Journal of Quantum Electronics*, pp. 545- 546, May 1973

- [1.29] [www.sios.de/INDEXENG.HTM](http://www.sios.de/INDEXENG.HTM), Materiały katalogowe firmy SIOS Meßtechnik, Niemcy, 2005
- [1.30] M.Dobosz, „*Interferometr ze stabilizowaną interferencyjnie diodą laserową do pomiaru przemieszczeń liniowych*”, „Pomiary, Automatyka i Robotyka”, 9/2007, <http://www.pak.info.pl/index.php?menu=artykulSzczegol&idArtykul=710>
- [1.31] G.Budzyń, „*Laserowy system pomiaru przemieszczenia dla maszyn sterowanych numerycznie*”, praca magisterska, Politechnika Wrocławska, instytut I-28, 2002
- [1.32] Röser H., „*Interferometry laserowe – funkcjonowanie i zastosowanie*”, firma Spindler & Hoyer, Göttingen, Niemcy, [www.linos.de](http://www.linos.de)
- [1.33] Sprawozdanie z prac badawczych, „*Projekt KBN 8 T19c 02613*“, [janusz.rzepka@pwr.wroc.pl](mailto:janusz.rzepka@pwr.wroc.pl)
- [1.34] “*The benefits of laser systems that use remote interferometer optics for linear, angular and straightness measurements*”, [www.renishaw.com](http://www.renishaw.com), 2001
- [1.35] “*About laser interferometry*”, <http://www.americanmachinist.com>, 1981
- [1.36] <http://www.optodyne.com/opnew4/ap1110.html>, 20.11.2007
- [1.37] Projekt celowy 8T10C01497C/3546, Umowa nr 2047/C-T10-8/98 z dnia 25.02.98 „*Stanowisko pomiarowe do badania dokładności geometrycznej tokarek sterowanych numerycznie*”, [janusz.rzepka@pwr.wroc.pl](mailto:janusz.rzepka@pwr.wroc.pl)
- [1.38] J.Pieńkowski, J.Rzepka, S.Sambor, „*Interferometryczny układ pomiarowy dla maszyn współrzędnościowych*”, firma Lasertex, Wrocław, 1998
- [1.39] PSD (Position Sensitive Detector) – materiały katalogowe i informacyjne firmy Hamamatsu, <http://sales.hamamatsu.com/assets/pdf/catsandguides/Psd.pdf>, 2007.11.08.
- [1.40] “*Position Sensing Detectors Theory Of Operation*” – materiały katalogowe i informacyjne firmy ON TRAK, <http://www.on-trak.com/pdfs/PSDTO.pdf>, 2007.11.08.
- [1.41] Gray J., Thomas P, “*Laser pointing stability measured by an oblique-incidence optical transmittance difference technique*”, „Review of scientific instruments”, zeszyt 72, nr.9, 09.2001, Department of Physics University of California, [http://www.physics.ucdavis.edu/xdzhu/publication%20in%20pdf/Laser\\_Pointing\\_Stability.pdf](http://www.physics.ucdavis.edu/xdzhu/publication%20in%20pdf/Laser_Pointing_Stability.pdf), 2007.11.22
- [1.42] Johnson R., Lentz Ch., “*2-D Optical Position Sensor*”, CIRCUIT CELLAR® Issue 152 March 2003, <http://www.circuitcellar.com/library/print/0303/6.htm>, 2007.11.26.
- [1.43] “*Non-contact Position Sensing Using Optical Detectors*” – materiały firmy UDT Instruments, <http://www.udtinstruments.com/pdf/Position-Tutorial.pdf>, 2007.11.26
- [1.44] J.Masajada, B.Dubik, “Optical vortex generation by three plane wave interference”, *Opt. Comm.* **198**, 21-27, 2001
- [1.45] “*Abbe error correction system and metod*”, [www.freepatentsonline.com](http://www.freepatentsonline.com), patent 6430465,
- [1.46] Dokumentacja firmy Renishaw, „*Szybka ocena diagnostyczna stanu technicznego obrabiarek*”, 09.2006, [www.renishaw.pl](http://www.renishaw.pl)
- [1.47] S.M.Khanna, J.F.Willemin, R.Dandiker, „*Heterodyne Interferometer*”, US Patent 4834111, 30.05.1989, <http://www.freepatentsonline.com/>

# 2

## Analiza metod stabilizacji częstotliwości i mocy laserów He-Ne

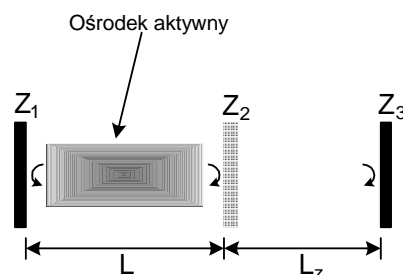
### 2.1. WPROWADZENIE.

Kilkudziesięcioletnia historia laserów He-Ne to pasmo zarówno zwycięstw jak i porażek na rzecz innych typów laserów. Po jego wynalezieniu, masowa produkcja sprawiła, że była to konstrukcja prosta i tania, a znakomite parametry zachęcały naukowców do studiów nad laserem tego typu (np. prace Lamba [2.06], Smitha [2.07], Spencera [2.08] i Greensteina [2.09] oraz [2.01-2.05], [2.22], [2.25-2.27], itd.) i inżynierów do zastosowań w różnych konstrukcjach, również komercyjnych (odtwarzacze CD, czytniki kodów kreskowych, kserokopiarki laserowe, drukarki laserowe).

Wkrótce po prezentacji pierwszego lasera, zbudowanego przez Javana w Bell Laboratories w roku 1960 (był to laser neonowy emitujący wiązkę promieniowania o długości fali 632,8 nm), rozpoczęto również rozważania na temat stałości częstotliwości generowanej wiązki laserowej [2.04, 2.14, 3.09] oraz na temat metod jej poprawy [2.13], [2.27], [2.30]. Był to temat bardzo istotny, gdyż skonstruowanie lasera o względnej stałości częstotliwości wiązki laserowej rzędu  $10^{-8}$  pozwalało na wykorzystanie go w bardzo wielu zastosowaniach, od spektroskopii, przez metrologię (definicja metra [2.11]) po telekomunikację.

Słowo „laser” to nazwa utworzona jako akronim od ang.: „*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*”, czyli wzmocnienie światła poprzez wymuszoną emisję promieniowania. Laser jest więc generatorem światła, wykorzystującym zjawisko emisji wymuszonej. Otrzymywane światło ma charakterystyczne właściwości, trudne do osiągnięcia za pomocą innych źródeł światła: bardzo małą szerokość linii emisyjnej (bardzo duża moc w wybranym obszarze widma) [2.23], monochromatyczność, wysoką koherencję.

Zasadniczymi częściami lasera są: ośrodek czynny, rezonator optyczny, układ pompujący (wzbudzania ośrodka). Układ pompujący dostarcza energii do ośrodka czynnego, w ośrodku czynnym w odpowiednich warunkach zachodzi kwantowe wzmacnianie (powielanie) wiązki fotonów, a układ optyczny (z zwierciadła) umożliwia wybranie odpowiednich fotonów.



**Rys. 2.1.1. Schemat konstrukcji lasera He-Ne, złożonego z ośrodka aktywnego umieszczonego w rezonatorze optycznym (tj. między Zwierciadłami  $Z_1$  i  $Z_2$ ). Odbicia od zewnętrznych układów lub elementów optycznych można zastąpić układem zastępczym w postaci trzeciego zwierciadła  $Z_3$  oddległego od lasera o  $L_z$ . [3.09]**

Rezonator lasera zbudowany jest z dwóch płaskich lub sferycznych zwierciadeł, ustawionych w odległości  $L$  (**Rys.2.1.1**) tak, że ich osie optyczne idealnie się pokrywają. Pomiedzy zwierciadłami  $Z_1$  i  $Z_2$  znajduje się wzmacniający ośrodek aktywny.

Wiązka promieniowania elektromagnetycznego po przejściu przez ośrodek, wzmocnieniu i dwukrotnym odbiciu od zwierciadeł, powraca do ośrodka aktywnego lasera bez zmiany fazy (rezonator optyczny realizuje dodatnie sprzężenie zwrotne).

W technice laserowej wykorzystywane są najczęściej dwa rodzaje rezonatorów optycznych (z jednym zwierciadłem płaskim, drugim sferycznym):

- półkonfokalny - dla odległości między zwierciadłami  $L < R_2$ , gdzie,  $R_2$  – promień zwierciadła sferycznego wklęsłego (promień zwierciadła płaskiego  $R_1 = \infty$ ),
- półkoncentryczny - dla  $L = R_2$ .

Zwierciadło płaskie jest zwierciadłem całkowicie odbijającym  $T=0$  (w praktyce przechodzi kilka procent mocy wiązki właściwej), zwierciadło sferyczne jest zwierciadłem transmisyjnym  $T \neq 0$ . Wiązka promieniowania laserowego wyprowadzana jest na zewnątrz rezonatora lasera poprzez zwierciadło transmisyjne.

Jeżeli ośrodek aktywny generatora emituje falę elektromagnetyczną o jednakowej gęstości widmowej w całym zakresie częstości, to taka fala nie jest falą monochromatyczną. Jeżeli jednak tego typu ośrodek umieścimy wewnątrz rezonatora optycznego, to cała energia zgromadzona w ośrodku aktywnym zostanie zawarta w szeregu wąskich krzywych rezonansowych zwanych modami podłużnymi promieniowania laserowego. Dzięki zamknięciu ośrodka w rezonatorze optycznym wychodząca fala będzie falą monochromatyczną.

Odległość pomiędzy częstotliwościami środkowymi dwóch sąsiednich modów podłużnych lasera zależy od odległości między zwierciadłami rezonatora optycznego  $L$ , opisuje to zależność:

$$\delta_\nu = \nu_{mq1} - \nu_{mq2} = c/2nL, \quad (2.1.1)$$

gdzie:  $\delta_\nu$  - odległość między częstotliwościami środkowymi sąsiednich modów podłużnych,  $\nu_{mq}$  – częstotliwość środkowa jednego z modów podłużnych,  $n$  – współczynnik załamania światła ośrodka pomiędzy zwierciadłami lasera [2.22].

Dla lasera He-Ne emitującego fale o długości 632,8 nm, rezonatorze o długości  $L=1$  m oraz szerokości krzywej emisyjnej ośrodka aktywnego lasera równej 900MHz, odległość między modami podłużnymi wynosi około 150 MHz. Wynika z tego, że w ramach krzywej emisyjnej mieści się 6 modów podłużnych lasera (odstęp pomiędzy modami jest mniejszy niż szerokość linii emisyjnej). Laser He-Ne emituje wiązkę promieniowania składającą się z sześciu dyskretnych częstotliwości. Im mniej jest modów podłużnych w wiązce promieniowania tym lepsza jest monochromatyczność i koherencja wiązki. Najlepszą monochromatyczność wiązki uzyskuje się, gdy laser pracuje w jednym modzie podłużnym (praca jednomodowa lub jednoczęstotliwościowa).

Uzyskanie pracy jednomodowej można uzyskać poprzez:

- selekcję modów podłużnych,
- podniesienie progu generacji (wprowadzenie dodatkowych strat lub obniżenie wzmocnienia),



- takie dobranie długości rezonatora, aby szerokość linii emisyjnej była mniejsza od odstepu pomiędzy sąsiednimi modami).

Najłatwiej pracę jednomodową można wymusić przez zmianę długości rezonatora. Maksymalna długość rezonatora jest określona przez warunek [2.22]:

$$L \leq c / (2 * n * V_D) \quad (2.1.2)$$

gdzie:  $c$  – prędkość światła,  $n$  – współczynnik załamania światła ośrodka pomiędzy zwierciadłami lasera,  $V_D$  – szerokość linii emisyjnej.

W takim przypadku odległość między sąsiednimi modami podłużnymi jest na tyle duża, że w ramach krzywej emisyjnej ośrodka mieści się tylko jeden mod podłużny. Praca jednomodowa lasera związana jest jednak ze znacznym zmniejszeniem mocy wyjściowej lasera, ponieważ wewnątrz krótkiego rezonatora optycznego można zmieścić krótki ośrodek wzmacniający.

Dla lasera He-Ne o długości fali 632,8nm maksymalna długość rezonatora, pozwalająca na pracę jednomodową, wynosi około 15cm.

Drugim rodzajem modów są mody poprzeczne promieniowania lasera, związane z poprzecznym rozkładem pola elektromagnetycznego na powierzchni zwierciadeł rezonatora.

Różnego rodzaju rozkłady pola mają różne częstotliwości własne. Różnica pomiędzy tymi częstotliwościami jest znacznie mniejsza niż w przypadku modów podłużnych. Może się okazać, że, mimo iż laser pracuje w jednym modzie podłużnym, to wiązka promieniowania ma kilka różnych częstotliwości (modów poprzecznych), co powoduje pogorszenie monochromatyczności wiązki. W celu wyeliminowania pracy w wielu modach poprzecznych stosuje się wewnątrz rezonatorów optycznych przysłony wymuszające pracę w jednym podstawowym modzie poprzecznym. Związane jest to jednak ze zmniejszeniem mocy wyjściowej wiązki promieniowania.

## 2.2. CZYNNIKI WPLYWAJĄCE NA STAŁOŚĆ CZĘSTOTLIWOŚCI WIĄZKI LASEROWEJ LASERA He-Ne.

Stałość częstotliwości wiązki laserowej lasera można zdefiniować jako [3.09]:

$$S_v(\tau) = \frac{\Delta v_L(\tau)}{v_L} \quad (2.2.2)$$

gdzie:  $v_L$  - średnia częstotliwość generowana przez laser,  $\Delta v_L(\tau)$ - fluktuacja częstotliwości zaobserwowana w okresie obserwacji albo w czasie uśrednienia  $\tau$ .

Fluktuacja  $\Delta v_L$  związana jest z bardzo dużą zależnością generowanej częstotliwości od czynników zewnętrznych takich, jak parametry środowiskowe (temperatura, ciśnienie, wilgotność) [3.09], [2.05], (równania 1.2.20-1.2.22), drgania mechaniczne (w tym akustyczne, np.: hałas), zewnętrzne pola elektromagnetyczne, fluktuacje prądu wyładowania [3.09],

[2.05], itp., oraz efektem kwantowego poszerzenia widma promieniowania lasera [2.06], [2.16], [2.17].

Ponieważ, jak to wynika z prac Javana [2.03] i Jaseja [2.04] fluktuacje częstotliwości  $\Delta\nu_L$  wynikające z efektów kwantowych mają wielkość w zakresie od ułamków do kilkudziesięciu herców, (czyli stałość częstotliwości  $S_\nu(t)$  jest, przy zaniedbaniu wpływów otoczenia, na poziomie  $10^{-14} - 10^{-17}$  [3.09]). Ich wpływ, z punktu widzenia zastosowań praktycznych, jest nieistotny w porównaniu do wpływu opisanych poniżej efektów środowiskowych.

W laserach gazowych ośrodek aktywny znajduje się między zwierciadłami rezonatora, czyli między dwoma zwierciadłami  $Z_1$  i  $Z_2$  jak na rysunku 2.1.1. W ogólnym przypadku wiązka wyjściowa jest mieszanką modów poprzecznych i podłużnych, oznaczanych  $TEM_{pq}$  [2.15], [2.16]. Przy odpowiedniej konstrukcji geometrycznej rezonatora w laserze (wspomniane przesłony) zostaną wzbudzone tylko mody podłużne  $TEM_{00q}$  o częstotliwościach własnych określonych zależnością [3.09], [2.15-2.16], [2.22]:

$$\nu_q = \frac{cq}{2nL} \quad (2.2.3)$$

gdzie:  $c$  - prędkość światła,  $q$  - numer modu (jest to liczba naturalna),  $L$  - długość rezonatora (**Rys. 2.1.1**),  $n$  - średnia wartość współczynnika załamania światła w rezonatorze.

Różniczkując równanie (2.2.3) i dokonując odpowiednich przekształceń, uzyskuje się ogólną zależność na wielkość fluktuacji częstotliwości lasera  $\Delta\nu_L(\tau)$  [3.09], [2.15-2.16], [2.22]:

$$\Delta\nu_L(\tau) = -\frac{\nu_L}{nL} [n\Delta L(\tau) + \Delta n(\tau)L] \quad (2.2.4)$$

Z powyższego wzoru wynika, że na zmiany częstotliwości promieniowania wyjściowego lasera wpływają zaburzenia współczynnika załamania ośrodka aktywnego  $\Delta n(t)$  (powstałe np. w skutek oddziaływań pola elektrycznego czy magnetycznego), jak i również zmiany długości geometrycznej rezonatora  $\Delta L(t)$  (zmiany temperatury, ciśnienia, wibracje mechaniczne, akustyczne).

Dodatkowa przyczyna niestabilności związana jest z możliwością powrotu wiązki do rezonatora w wyniku odbicia od trzeciego zwierciadła (**Rys. 1.2.18**), (**Rys.2.1.1**), [3.09].

Współczynnik załamania ośrodka czynnego zmienia się w funkcji wielu czynników, z których najważniejsze to: zewnętrzne i wewnętrzne (międzyelektrodowe) pole elektryczne, zewnętrzne pole magnetyczne, temperatura mieszaniny helowo-neonowej oraz, dla laserów z zewnętrznymi zwierciadłami, temperatura, ciśnienie i wilgotność powietrza [2.24], [3.09]

W zastosowaniach przemysłowych wykorzystuje się lasery ze zintegrowanymi, wewnętrznymi zwierciadłami (nie ma, zatem problemu zmian współczynnika załamania w powietrzu).

Ze względu na efekty rozszczepienia linii (tzw. efekt Zeemana) [2.15, 2.16] występujący w laserach He-Ne stosowane są ekrany magnetyczne lub w najprostszym przypadku oddala się laser od źródeł silnych pól magnetycznych.

Ze względu na obniżone ciśnienie, stosunkowo niewielki jest również wpływ fluktuacji temperatury mieszaniny helowo-neonowej (jest on w każdym razie znacznie mniejszy od zmian długości rezonatora powodowanych zmianą temperatury lasera).

Czynnikiem, który najsilniej modyfikuje współczynnik załamania ośrodka aktywnego jest zmiana międzyelektrodowego pola elektrycznego powodowana przez fluktuacje prądu zasilającego laser. Wrażliwość ta zależy głównie od trybu pracy lasera, konstrukcji mechanicznej rezonatora laserowego oraz od wartości prądu zasilającego. Jak wynika z pracy [3.09] wrażliwość  $\Delta f/\Delta I$  lasera He-Ne o długości emitowanej fali 632.8nm, zasilanego prądem 3mA przekracza 2MHz na każdy 1 mA fluktuacji tego prądu. Dodatkowym efektem szumów prądu zasilania jest fluktuacja mocy wyjściowej lasera.

W układach generatorów laserowych drgania zarówno mechaniczne jak i akustyczne zmieniają częstotliwość generacji lasera poprzez zmianę długości rezonatora jak i zmianę położenia okienek Brewstera, co z kolei zmienia długość drogi optycznej.

W typowych warunkach wielkomijskich zmiany długości rezonatora pozwalają na uzyskanie stałości częstotliwości generatora laserowego na poziomie kilka\* $10^{-7}$ . Jest to wartość wciąż akceptowalna na potrzeby interferometrii przemysłowej, ale już dyskwalifikująca przy budowie wzorców długości.

Problem dotyczy głównie laserów z zewnętrznymi zwierciadłami. W przypadku lasera z wewnętrznymi zwierciadłami wpływ drgań mechanicznych i akustycznych jest znacząco mniejszy jednak wciąż istotny. Przykładowo, przekształcając zależność 2.2.3. do postaci

$$\Delta L = -\frac{2nL^2}{cq} \Delta v_L \quad (2.2.4)$$

i podstawiając dane:  $L=0.15$  m,  $n=1$ ,  $c=3*10^8$  m/s i  $q=474000$  (dla długości generowanej fali 632.8nm), do uzyskania zmiany częstotliwości  $\Delta v_L = 1$ MHz wystarczy zmiana odległości zwierciadeł o wartość 0.316 nm.

Jeżeli materiałem użytym do konstrukcji lasera jest inwar, powstaje możliwość zmian długości rezonatora wywołanych zmianą pola magnetycznego otoczenia. Dla pola magnetycznego ziemskiego, zmiany tego pola mogą wywołać niestaość rzędu kilka\* $10^{-10}$ . Przy budowie wysokostabilnych laserów należy się więc liczyć również z wpływem rozproszonego pola magnetycznego pochodzącego od lokalnej aparatury elektronicznej oraz w układach napędowych mocy i transformatorów.

Wykorzystując tę właściwość, możliwe jest, zatem, stabilizowanie częstotliwości fali poprzez wprowadzanie niewielkich naprężeń mechanicznych na jedno lub oba zwierciadła wewnętrzne za pomocą przetworników piezoceramicznych lub elektromagnetycznych.

## 2.3. PRZEGLĄD I PORÓWNANIE METOD STABILIZACJI CZĘSTOTLIWOŚCI I MOCY LASERÓW HE-NE

### 2.3.1. BIERNA STABILIZACJA LASERÓW He-Ne.

Jak wynika ze wzoru **2.2.3**, zmiany długości rezonatora  $\Delta L(t)$  wpływają w bezpośredni sposób na częstotliwość wiązki laserowej. Zmiany te powstają poprzez zmianę temperatury konstrukcji mechanicznej podtrzymującej zwierciadła  $Z_1$  i  $Z_2$  lub poprzez drgania mechaniczne (w tym również akustyczne) rezonatora.

Aby zminimalizować zmiany długości rezonatora, w pierwszej kolejności do budowy generatora dobiera się materiały o bardzo małych współczynnikach rozszerzalności termicznej, np. inwar ( $\alpha \approx 1.26 \cdot 10^{-6}$  [m/°C]), topiony kwarc ( $\alpha \approx 0.55 \cdot 10^{-6}$  [m/°C]), zerodur ( $\alpha \approx 5 \cdot 10^{-8}$  [m/°C]).

Dodatkowo, aby uzyskać stałość częstotliwości lasera  $S_v$  na poziomie  $10^{-8}$  (wartość wymagana dla większości zastosowań pomiarowych), przy pominięciu wpływu innych czynników, konieczna jest stabilizacja temperatury rezonatora z dokładnością lepszą niż  $0.01^\circ\text{C}$ , co nakłada z kolei wysokie wymagania na jakość układu stabilizacji temperatury [3.09].

Termiczne przestrajanie rezonatora o typowych rozmiarach, wykonanego z inwaru wynosi około  $500\text{MHz}/^\circ\text{C}$ , a przy stabilizacji biernej na poziomie  $0,01^\circ\text{C}$  około  $5\text{MHz}$ . Takie zmiany temperatury wpływają głównie na stałość częstotliwości długoterminową.

W celu uniezależnienia rezonatorów od pola magnetycznego oraz wpływu drgań z pasma akustycznego ekranuje się je za pomocą blach stalowych oraz materiałów pochłaniających wibracje. Najlepszym sposobem jest umiejscowienie lasera z dala od silnych źródeł pól magnetycznych i akustycznych.

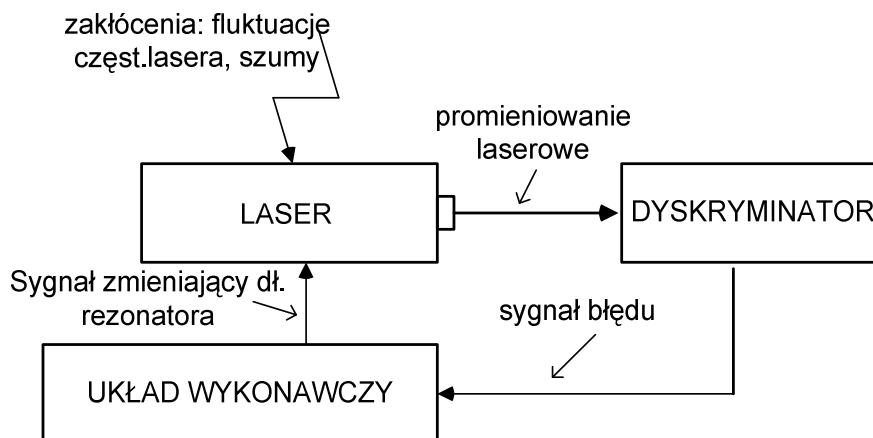
Typowe krótkoterminowe stabilności częstotliwości laserów stabilizowanych biernie wynoszą  $10^{-8}$  -  $10^{-10}$  [3.09], [2.16-2.17]. Stałość ta nie może być jednak utrzymana przez dłuższy okres czasu bez dodatkowych zewnętrznych układów kontroli częstotliwości (stabilizacja aktywna).

Oprócz stałości częstotliwości wiązki laserowej czasem jest wymagana stabilność wiązki w przestrzeni („pointing stability”) [5.01]. Na pozycję wiązki w przestrzeni mają wpływ zarówno szumy plazmy [2.17] (również wywołane szumami układu zasilania; [2.05]) jak i drgania mechaniczne przenoszone na rezonator. Typowa wartość „pointing stability” niestabilizowanego lasera He-Ne 1mW o długości generowanej fali 633nm wynosi  $20 \cdot 10^{-3}$  radianów.

### 2.3.2. AKTYWNA STABILIZACJA CZĘSTOTLIWOŚCI.

Aktywna stabilizacja częstotliwości polega na zastosowaniu zewnętrznej pętli sprzężenia zwrotnego w układzie sterowania zasilaniem, temperaturą lub wymiarami lasera.

Podstawowym elementem takiej pętli jest dyskryminator częstotliwości promieniowania lasera, którego zadaniem jest przetworzenie wartości odstrojenia częstotliwości na sygnał błędu z odpowiednim znakiem. Otrzymany w ten sposób sygnał błędu poprzez układ wykonawczy reguluje długością optyczną rezonatora, tak, aby odstrojenie częstotliwości było jak najmniejsze, czyli częstotliwość generacji lasera pokrywała się z częstotliwością wzorca (dyskryminatora). Zmiana długości optycznej rezonatora dokonywana jest najczęściej poprzez zmianę odległości między zwierciadłami (piezo-ceramika, cewki). Możliwa jest też zmiana długości optycznej poprzez zmianę współczynnika załamania ośrodka (efekt elektrooptyczny) lub zmianę temperatury pracy lasera.



**Rys. 2.3.1. Schemat blokowy aktywnej stabilizacji częstotliwości promieniowania lasera.**

Szerokość pasma układu aktywnej stabilizacji częstotliwości promieniowania lasera oraz wzmocnienie samej pętli stabilizacji, charakteryzuje odpowiedź tego układu na odstrojenie od częstotliwości. Układ o małej szerokości pasma (duża stała czasowa) ma ograniczoną szybkość działania i dobrze stabilizuje jedynie wpływy zaburzeń wolnozmiennych (głównie termiczne). Szybkie fluktuacje, jak wibracje, są minimalizowane przez układy o szerokim paśmie (krótkie stałe czasowe).

Najczęściej wykorzystywane w technice laserowej dyskryminatory to (**Rys.2.3.1**), [2.15-2.16], [3.09]:

a) dyskryminatory oparte na rezonansie atomowym:

- centra w linii wzmocnienia [2.16, 2.22]

- odwrócone zagłębienie Lamba w linii absorpcyjnej [2.15-2.16, 2.22]

- linia spektralna chłodzonego gazu (najczęściej par jodu  $^{127}\text{I}_2$ ; stosowane we wzorcach metra [2.16])

- komórka absorpcyjna z wykorzystaniem efektu Zeemana

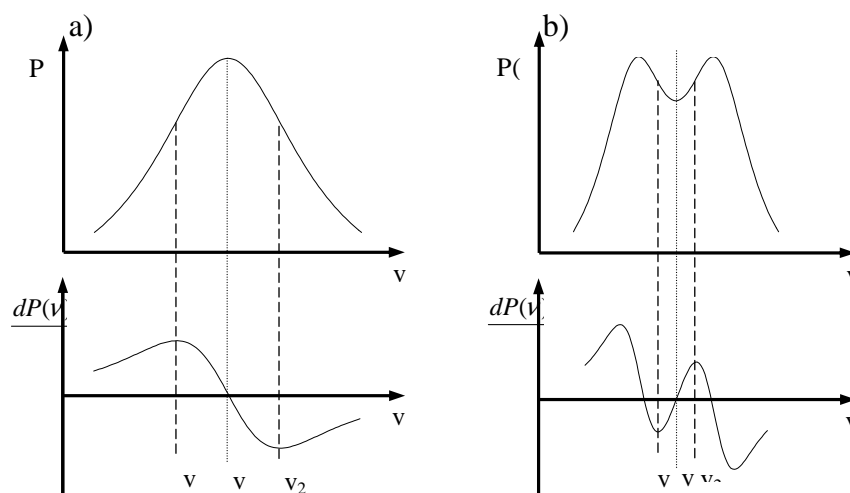
b) dyskryminatory interferencyjne

- linia rezonansowa stabilnej wnęki rezonansowej,

c) dyskryminatory amplitudy [3.09, 2.15-2.16, 2.22]

- stabilizacja częstotliwości lasera w oparciu o równowagę mocy dwu składowych (lasery dwudomowe i z rozszczepieniem linii emisyjnej).

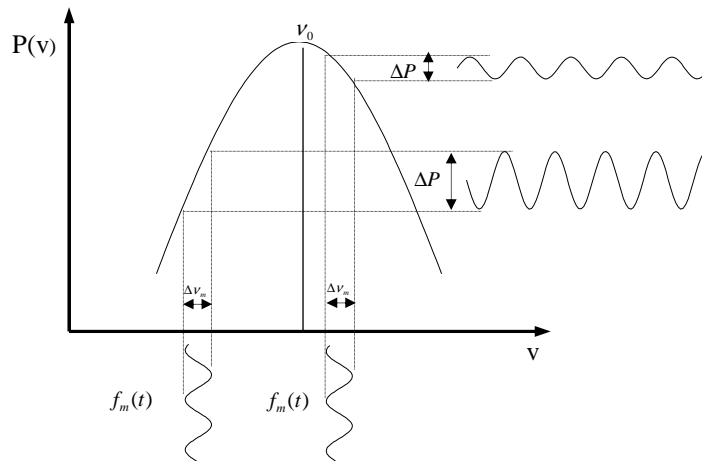
**Stabilizacja na centrum krzywej wzmocnienia** jest klasyczną metodą stabilizacji częstotliwości lasera. Przy tej metodzie stabilizacji odniesieniem jest linia maksimum mocy lasera (stabilizacja na maksimum) lub zagłębienie Lamba w linii wzmocnienia.



**Rys. 2.3.2. Zależność mocy wyjściowej lasera od częstotliwości oraz jej pierwsza pochodna. (a - krzywa mocy o kształcie gaussowskim, b - krzywa z zagłębieniem Lamba,  $\nu_0$  - częstotliwość centrum linii emisyjnej,  $\nu_2 - \nu_1$  - zakres trzymywania pętli stabilizacji) [2.15-2.16].**

Zagłębienie Lamba powstaje, gdy krzywa zależności wzmocnienia lasera od częstotliwości jest poszerzona niejednorodnie. Przy takim poszerzeniu dla centralnych częstotliwości obie fale elektromagnetyczne biegnące w przeciwnych kierunkach tworząc falę stojącą oddziałują z tą samą grupą atomów. Ponieważ takich atomów jest skończona, ograniczona ilość, więc przy dużym poziomie mocy następuje nasycenie i spadek wzmocnienia. Dla laserów He-Ne głębokość zagłębienia osiąga od 5 do 10% całej krzywej, a jego szerokość wynosi około 200 MHz. Przy stabilizacji na maksimum mocy szerokość pasma trzymywania pętli jest o rząd większa, dlatego stałość częstotliwości lasera uzyskiwana dla tego dyskryminatora wynosi  $10^{-8}$  [2.16-2.17, 2.19], [3.09], [2.22], podczas gdy przy stabilizacji na zagłębienie Lamba stałość częstotliwości wiązki laserowej wynosi  $10^{-9}$  [2.16-2.17, 2.19], [3.09].

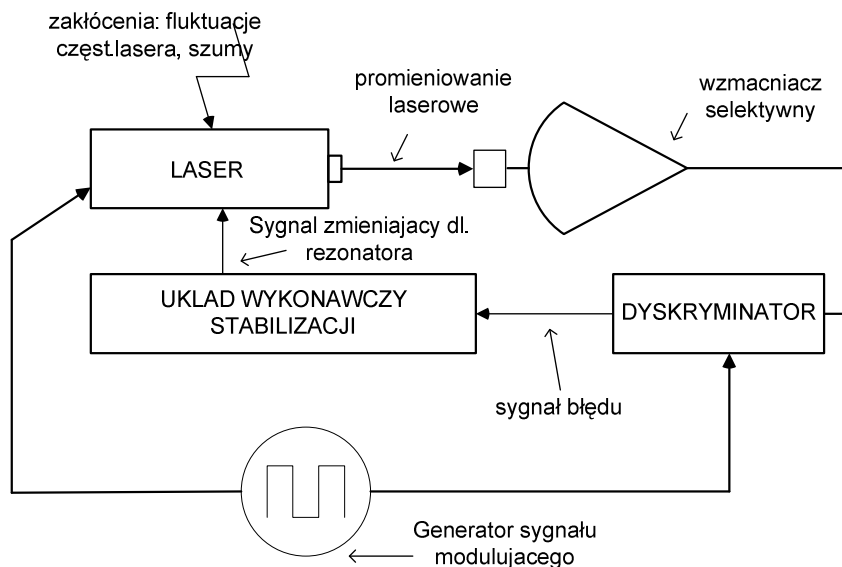
Sygnal błędny w obu ww. układach uzyskuje się w identyczny sposób, poprzez detekcję synchroniczną pierwszej harmonicznej zależności wzmocnienia lasera od częstotliwości wiązki. Długość optyczna rezonatora modulowana jest przebiegiem harmonicznym o niewielkiej amplitudzie (piezo-ceramika, cewki). Sygnal ten jest jednocześnie odniesieniem dla detektora fazo-czułego (układ „lock-in”). Modułacja długości optycznej rezonatora powoduje modulację natężenia promieniowania lasera. W sygnale pomiarowym odczytywanym z fotodetektora pojawia się składowa o częstotliwości równej częstotliwości sygnału modulującego. Amplituda tej składowej niesie informację o wielkości odstrojenia częstotliwości generacji lasera od częstotliwości centrum. Faza natomiast informuje o kierunku odstrojenia.



**Rys. 2.3.3. Idea detekcji synchronicznej pierwszej harmonicznej.  $f_m(t)$  – harmoniczny sygnał modulujący długość optyczną rezonatora,  $\Delta v_m$  – dewiacja częstotliwości lasera,  $\Delta P$  – dewiacja mocy wyjściowej lasera.**

Na rysunku 2.3.4. przedstawiono schemat blokowy układu stabilizacji częstotliwości na centrum krzywej wzmocnienia lasera. Sygnał z generatora podawany jest na układ, który moduluje długość optyczną rezonatora (np.: przesuwnik piezoelektryczny PZT1). Sygnał dyskryminacyjny z detektora synchronicznego po wzmocnieniu steruje układ wykonawczy (np.: przesuwnik PZT2), utrzymując częstotliwość generacji lasera w pobliżu centrum krzywej wzmocnienia.

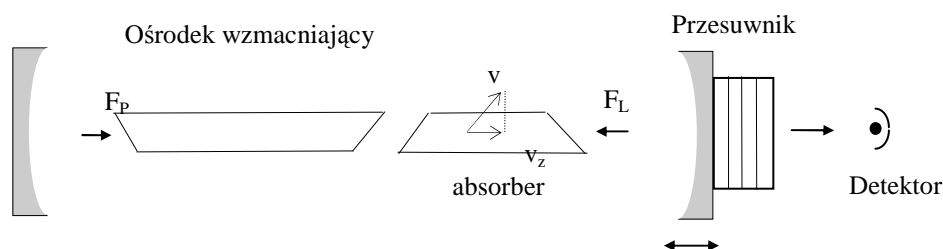
Do modulacji długości optycznej rezonatora, oprócz szybkich przesuwników piezoelektrycznych stosuje się też elementy wykorzystujące efekt magnetostrykcji lub inne zjawiska [3.09], natomiast do kompensacji odstrojeń często stosuje się różnej konstrukcji grzejniki. [3.09, 2.16]. Najlepsze rezultaty daje zastosowanie zarówno przesuwnika piezoelektrycznego (lub cewki) do kompensacji szybkich zmian częstotliwości oraz grzejnika do kompensacji zmian długoterminowych.



**Rys.2.3.4. Schemat blokowy układu stabilizacji częstotliwości wiązki laserowej lasera wykorzystujący ekstremum krzywej zależności optycznej mocy wyjściowej lasera od częstotliwości promieniowania.**

Realizacja układu stabilizacji z **rezonatorem biernym jako dyskryminatorem częstotliwości** polega na zastosowaniu zewnętrznego, dodatkowego rezonatora (na osi rezonatora głównego), który stanowi filtr pasmowy promieniowania o częstotliwości środkowej zależnej od odległości pomiędzy zwierciadłami. Przy odpowiednio stabilnej temperaturowo (i na inne czynniki zewnętrzne) konstrukcji filtra (np.: z topionego kwarcu), można uzyskać krótkoterminową stałość częstotliwości rzędu  $kilka \cdot 10^{-10}$  [2.22].

Odkrycie w roku 1967 nasycalnej absorpcji w neonie i gazach molekularnych pozwoliło na osiągnięcie bardzo dużych stałości częstotliwości generatorów laserowych. Praktyczne realizacje takich wzorców umożliwiły zatwierdzenie generatorów laserowych stabilizowanych tą metodą jako wzorców długości (metra) [2.11].



Rys. 2.0.5 Ilustracja powstawania efektu nasycalnej absorpcji [2.16].

W przypadku laserów He-Ne 632,8nm (również 543nm) najczęściej stosowane są **komórki z jodem J<sub>2</sub>**.

Komórka z absorberem ( w tym przypadku jod) znajduje się w rezonatorze głównym i powoduje dodatkowe zmniejszenie wzmocnienia. Jeśli częstotliwość generacji lasera pokryje się dokładnie z centrum linii absorpcyjnej użytego absorbera, obie fale ( $F_p$ ,  $F_L$ , Rys.2.3.5) oddziaływać będą z tą samą grupą cząstek, dla których rzut prędkości na kierunek propagacji wynosi zero ( $v_z = 0$ ). W wyniku takiego oddziaływania występuje wyraźne nasycenie absorpcji, co ujawnia się zwiększeniem wzmocnienia dla częstotliwości  $\nu_0$ . Na krzywej wzmocnienia lasera pojawia się charakterystyczny pik mocy [2.22], [2.16]. Dla lasera He-Ne 633 nm oraz par jodu  $^{127}\text{I}_2$ , przejście 11-5, R(127) występuje 14 pików mocy o charakterystycznych częstotliwościach.

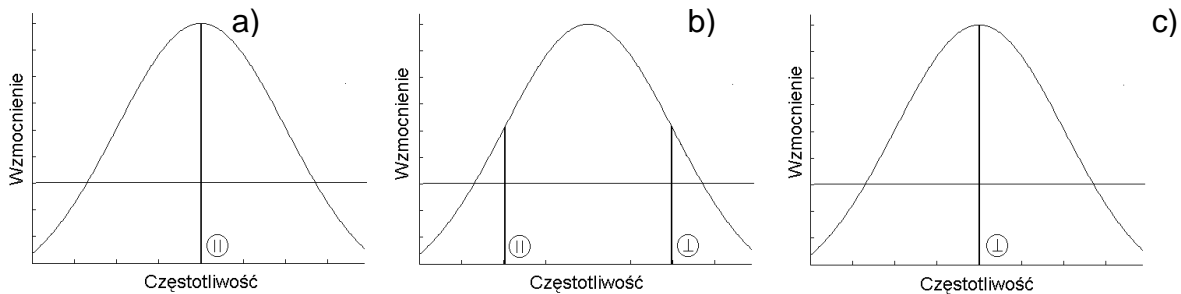
Bardzo wysoka stałość krótkoterminowa i długoterminowa częstotliwości wiązki laserowej laserów stabilizowanych w ten sposób ( $10^{-11} - 10^{-13}$ ) wiąże się jednak z dużą wrażliwością na zmienne środowiskowe i wysoką ceną kompletnego lasera. Z powyższych powodów lasery z komórką jodową są używane głównie w laboratoriach, jako wzorce częstotliwości i długości.

**Stabilizacja częstotliwości lasera w oparciu o równowagę mocy dwu składowych** jest, ze względu na prostą realizację aplikacyjną oraz akceptowalną długoterminową stałość częstotliwości (w zakresie od  $10^{-8}$  do  $10^{-9}$  [2.16], [3.09]) idealnym rozwiązaniem w zastosowaniach metrologicznych dla przemysłu.

Metodę tę można stosować w laserach generujących jednocześnie na dwóch modach (lasery dwumodowe), lub w laserze jednomodowym przy zastosowaniu pewnych technik



powodujących rozszczepienie linii emisyjnej i powstanie dwóch składowych promieniowania (efekt Zeemana w polu poprzecznym i podłużnym, modulacja elektrooptyczna) [2.16-2.17], [3.09], [2.20]. Zasada pracy takiego układu polega na rozdzieleniu składowych promieniowania i takiej regulacji długości optycznej rezonatora, aby natężenia obu składowych były równe (Rys.2.3.6.b). Wykorzystywany jest fakt, że w obu przypadkach (laser dwu modowy, laser z rozszczepioną linią) amplitudy są wzajemnie zależne tzn.: kiedy jedna rośnie to druga maleje.



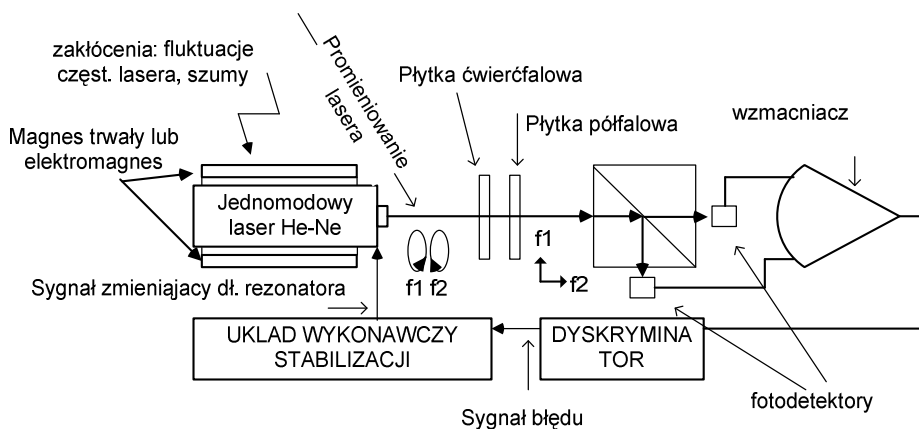
**Rys. 2.3.6. Zasada stabilizacji lasera He-Ne w oparciu o równowagę dwóch składowych promieniowania: a) praca jednomodowa na polaryzacji równoległej b) praca dwumodowa, c) praca jednomodowa na polaryzacji prostopadłej [3.09].**

Rozszczepienie linii widmowych w polu magnetycznym zaobserwował po raz pierwszy Zeeman w roku 1896.

Zjawisko Zemana świadczy o rozszczepieniu poziomów energetycznych atomu w obecności pola magnetycznego i uwidacznia się rozszczepieniem linii widmowych w składowe.

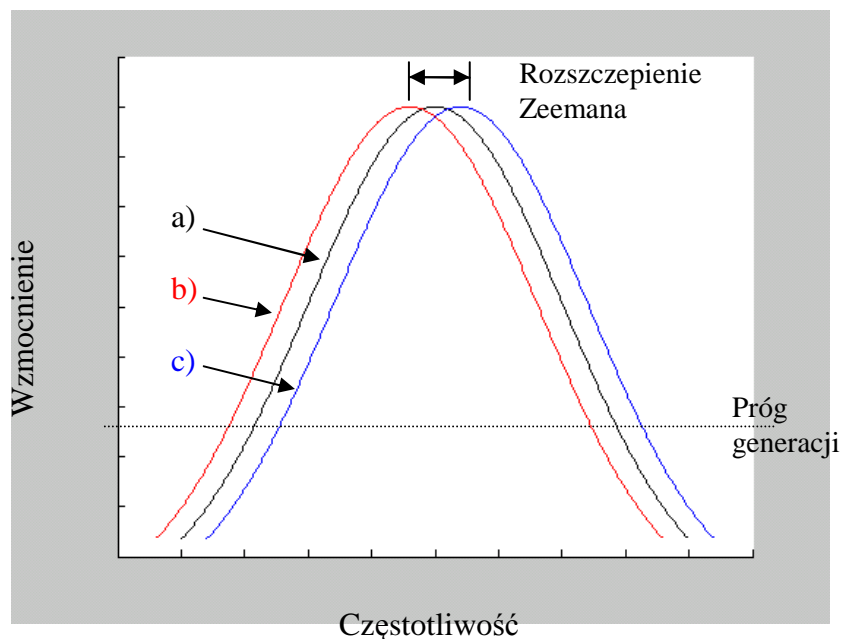
Badaniom zjawiska Zemana poświęcono wiele prac od początku lat 60-tych XX wieku. Dotyczyły one, zarówno, teoretycznego opisu efektu, różnych doświadczeń powiązanych z efektem Zeemana oraz praktycznym aplikacjom wykorzystującym ten efekt do stabilizacji częstotliwości laserów He-Ne [2.16-2.17, 3.09, 2.22, 2.27].

Przykładowy układ stabilizacji częstotliwości promieniowania lasera zemanowskiego z przestrzennym rozdziałem składowych promieniowania przedstawiono na Rys.2.3.7.



**Rys.2.3.7. Schemat blokowy układu stabilizacji częstotliwości zemanowskiego lasera He-Ne. Realizacja układu powyższego schematu została przedstawiona w rozdziale czwartym.**

Laser jednomodowy umieszczono we wzdłużnym polu magnetycznym. W wyniku zjawiska Zeemana krzywa wzmocnienia ośrodka laserującego ulega rozszczepieniu na dwie składowe, zwane składowymi zeemanowskimi, przesunięte symetrycznie względem nierozszczepionej linii wzmocnienia (**Rys.2.3.8**).



**Rys.2.3.8. Rozszczepienie krzywej wzmocnienia ośrodka laserującego pod wpływem osiowego pola magnetycznego. a) krzywa wzmocnienia bez pola magnetycznego (nierozszczepiona); b) krzywa wzmocnienia dla polaryzacji kołowej lewoskrętnej; c) krzywa wzmocnienia dla polaryzacji kołowej prawoskrętnej [3.09], [2.15-2.18]**

Umieszczony w polu magnetycznym laser generuje dwie częstotliwości. Obie składowe promieniowania mają kołową polaryzację i przeciwne skrętności. Kołowe polaryzacje obu fal zmienia się na polaryzacje liniowe, wzajemnie prostopadłe za pomocą płytki  $\lambda/4$ . Następnie ustawia się je w przestrzeni płytką  $\lambda/2$  i rozdziela na dwie wiązki w dzielniku (kostce) polaryzacyjnej. Każda z wiązek, zawierająca jedną składową polaryzacji pada na detektor. Natężenia obu składowych promieniowania zmieniają się w taki sposób, że gdy jedna składowa maleje – druga rośnie. Kiedy obie składowe promieniowania są sobie równe wówczas laser generuje na centrum nierozszczepionej linii. Taki punkt pracy jest w tym przypadku częstotliwością odniesienia dla układu stabilizacji.

Analogiczny układ stabilizacji można zbudować wykorzystując dwumodowy laser He-Ne.

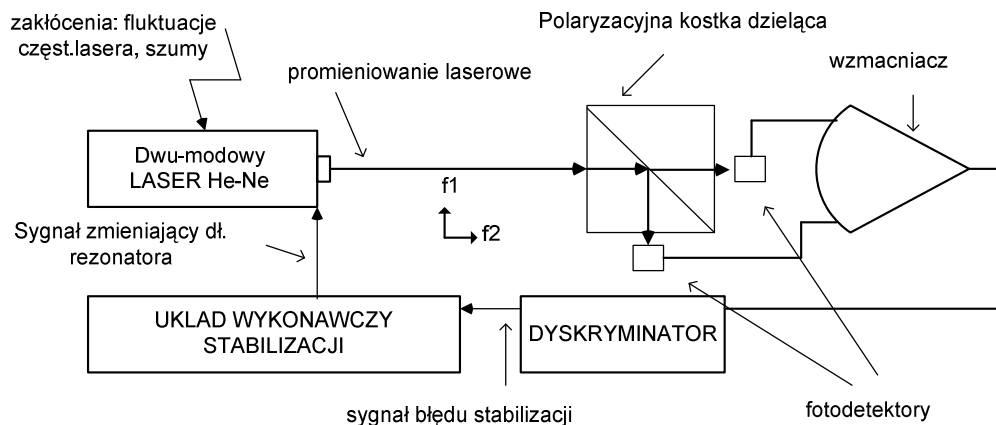
Metoda dwumodowa została po raz pierwszy zaproponowana przez Balhorna. Znalazła szerokie zastosowanie w stabilizacji nie tylko laserów He-Ne pracujących na długości fali 632.8 nm, ale także pracujących na 543,5 nm<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Lasery o długości generowanej fali 543,5nm ze względu na uzyskiwaną bardzo niską częstotliwość Zeemana oraz ze względu duże wymiary geometryczne samego lasera He-Ne są rzadko stabilizowane z wykorzystaniem efektu Zeemana.

Metoda dwumodowa charakteryzuje się prostotą, a uzyskiwana stałość częstotliwości (zarówno krótko-, jak i długoterminowa) jest porównywalna do stabilności laserów wykorzystujących zagłębienie Lamba [3.09], [2.15-2.16].

Metoda dwumodowa ma zastosowanie w laserach, w których, podczas zmiany długości rezonatora (przestrajanie lasera), istnieją na przemian jeden lub dwa tryby (**Rys.2.3.8**). Moment występowania dwóch trybów na krzywej wzmocnienia można wykorzystać do stabilizacji częstotliwości lasera, ponieważ ich amplitudy są ze sobą związane podobnie jak w przypadku rozszczepienia Zeemana – jeśli amplituda jednego z nich rośnie to drugiego maleje [3.09], [2.15-2.16].

Każdy tryb, w takim laserze, jest spolaryzowany liniowo oraz, polaryzacje sąsiednich trybów są względem siebie prostopadłe. W niektórych konstrukcjach laserów polaryzacja trybów, w wyniku efektów termicznych, zmienia się w czasie. Dodatkowo może również wystąpić efekt „przeskoku” trybów (ang. *mode flipping*), czyli nagłego przekazania energii z jednego trybu do drugiego [2.15]. Liczne doświadczenia przeprowadzone przez autora podczas konstrukcji kilkunastu prototypów układów stabilizacji pokazują, że aby usunąć oba wymienione efekty, wystarczy „włączyć” pętlę stabilizacji lasera, gdy ten występuje w stanie równości mocy obu trybów [3.09].



**Rys.2.3.9 Schemat blokowy lasera stabilizowanego pracującego w oparciu o metodę dwumodową.**

Na rysunku **Rys.2.3.9** przedstawiono schemat blokowy układu stabilizacji lasera wykorzystującego metodę dwumodową. Jak widać, w porównaniu do układów pracujących w oparciu o efekt Zeemana, w układzie nie ma ani płytki ćwierćfalowej, ani magnesów. Pozwala to na zbudowanie urządzenia prostszego, o bardziej zwartej konstrukcji [3.09].

Wadą klasycznej realizacji układu stabilizacji (**Rys.2.3.7** oraz **Rys.2.3.9**) jest stosowanie dwóch torów prowadzenia sygnałów optycznych i elektronicznych. Takie rozwiązanie powoduje, że układ jest wrażliwy na fluktuacje mocy źródła promieniowania, zmiany charakterystyk zastosowanych elementów optycznych i elektronicznych w każdym torze.

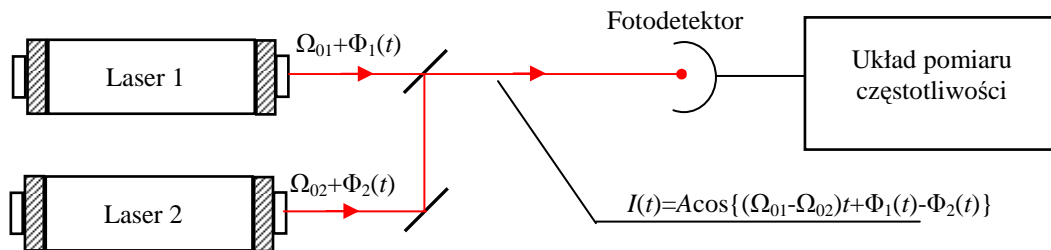
W rozdziale czwartym przedstawiono konstrukcje takiego układu stabilizacji oraz zaproponowano rozwiązanie ze stabilizowaną powierzchniowo komórką ciekłokrystaliczną, pozbawione powyższej wady.

Pewnym połączeniem stabilizacji z komórką absorpcyjną i rozszczepieniem linii jest stabilizacja wykorzystująca komórkę z wzbudzonym neonem. Jeżeli do takiej komórki przyłożone zostanie współosiowe (poosiowe) pole magnetyczne, zgodnie z efektem Zemana, linia absorpcyjna neonu ulegnie symetrycznemu rozszczepieniu na dwie częściowo pokrywające się linie (analogicznie do **Rys.2.3.8**). Absorpcja neonu wskazuje wówczas różny współczynnik dla fal o przeciwnej polaryzacji kołowej (tej samej częstotliwości). Jedynie dla częstotliwości dla nierozszczepionej linii współczynniki te są równe dla oby polaryzacji linii rozszczepionych. Metoda ta pozwala na budowę wysokostabilnego wzorca o długoterminowej stałości częstotliwości rzędu  $10^{-9}$ .

Możliwe jest również rozszczepienie linii emisyjnej z zagłębieniem Lamba [2.22]. Uzyskane stałości częstotliwości są rzędu  $10^{-12}$ , czyli porównywalne z układem stabilizacji z komórką jodową, przy jednocześnie tańszej i prostszej konstrukcji.

## 2.4. OCENA STAŁOŚCI I POWTARZALNOŚCI CZĘSTOTLIWOŚCI WIĄZKI LASEROWEJ LASERÓW He-Ne W RÓŻNYCH UKŁADACH STABILIZACJI.

Ocena stabilności częstotliwości laserów przez bezpośredni pomiar fluktuacji częstotliwości nie jest możliwy ze względu na bardzo wysoką częstotliwość nominalną sygnału generatora laserowego. Najczęściej stosowaną metodą pomiaru jest technika zdudniania (częstotliwości różnicowej) [2.16, 3.09, 2.05].



**Rys.2.4.1.** Układ do pomiaru stabilności częstotliwości laserów metodą zdudniania.

Na fotodetektorze (**Rys.2.4.1**) defekowany jest sygnał dwóch interferujących ze sobą wiązek laserowych o częstotliwościach kolejno:  $\Omega_{01}$  i  $\Omega_{02}$ , które poddane są fluktuacjom  $\dot{\Phi}_1(t)$  i  $\dot{\Phi}_2(t)$ :

$$I(t) = A \cos\{(\Omega_{01} - \Omega_{02})t + \Phi_1(t) - \Phi_2(t)\} \quad (2.4.5)$$

Mierzona jest częstotliwość różnicowa i na jej podstawie wyznaczana jest wariancja fluktuacji częstotliwości  $\sigma^2(N, T, \tau)$ . Jeżeli założymy, że oba lasery fluktuują niezależnie oraz posiadają identyczne gęstości mocy  $G_{\Omega_1}(\omega) = G_{\Omega_2}(\omega)$  (w praktyce wystarczy, że są zbliżone), wówczas można przyjąć, że wariancja częstotliwości różnicowej jest równa pomnożonej przez dwa wariancji fluktuacji częstotliwości pojedynczego generatora [2.16]:

$$\sigma^2[\dot{\Phi}_1(t) - \dot{\Phi}_2(t)] = 2\sigma^2[\dot{\Phi}(t)] \quad (2.4.6)$$

Biorąc pod uwagę równanie definiujące stałość częstotliwości w dziedzinie czasowej (stosunek odchylenia standardowego  $\sigma(N, T, \tau)$  do średniej częstotliwości generatora  $\Omega_0$ ) [216]:

$$S_i(\tau) = \frac{\sqrt{\sigma^2(N, T, \tau)}}{\Omega_0} \quad (2.4.7)$$

otrzymamy:

$$S_i(\tau) = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{\sqrt{\sigma^2(N, T, \tau)}}{\Omega_0} \quad (2.4.8)$$

Dla pomiarów stabilności laserów znacznie się różniących (np.: laser HeNe/I<sub>2</sub> i laser HeNe stabilizowany na maksimum mocy) to do obliczenia stabilności stosuje się wzór (2.4.7).

Posiadając odpowiednią ilość pomiarów fluktuacji częstotliwości sygnału różnicowego wynikającego z zdudnienia dwóch laserów za pomocą wariancji opisanej wzorem (2.4.9), zwanej wariancją Allana, wyznaczyć stałość częstotliwości różnicowej.

$$\sigma^2(2, T = \tau) = \left\langle \frac{(y_{2k} - y_{2k-1})^2}{2} \right\rangle \quad (2.4.9)$$

Zakładając, że jeden z laserów posiada stałość częstotliwości, o co najmniej rząd lepszą, można wyznaczyć stałość częstotliwości badanego lasera z odpowiednią, wymaganą dokładnością.

Zgodnie ze schematem układu pomiarowego [rysunek **Rys.2.4.1**] była mierzona stałość częstotliwości lasera wykorzystanego w prototypie opracowanego układu. Stałość częstotliwości była mierzona przez zdudnienie z wzorcem częstotliwości stabilizowanym w oparciu o nasyconą absorpcję w jodzie, zbudowanym przez dr.S.Sambora w Katedrze Teorii Pola i Elektroniki Kwantowej Politechniki Wrocławskiej [2.16]. Wyniki pomiaru stabilności dla zbudowanego prototypu głowicy pomiarowej zostały przedstawione w **Rozdziale 5**.

## Literatura

- [2.01] Maiman T.H., “*Simulated optical radiation in ruby*”, *Nature*, zeszyt 187, nr. 4736, strony 493-494, 1960
- [2.02] Javan A., Bennett W.R., Herriott D.R., “*Population inversion and continuous maser oscillation in a gas discharge containing a He-Ne mixture*” *Physical Review Letters*, zeszyt 6, strony 106-110, luty 1961
- [2.03] Javan A., Ballik E.A., Bond W.L., “*Frequency characteristics of continuous-wave He-Ne optical maser*”, *Journal of Optical Society of America*, zeszyt 52, strony 96-98, styczeń 1962
- [2.04] Jaseja T.S., Javan A., Townes C.H., “*Frequency stability of He-Ne masers and measurements of length*”, *Physical Review Letters*, zeszyt 10, strony 165-167, marzec 1963
- [2.05] K.M.Abramski, “*Miary stabilności laserów*”, Rozprawy elektrotechniczne, 1981, Politechnika Wrocławska
- [2.06] Lamb W.E., “*Theory of an optical maser*”, *Physical Review*, zeszyt 134, nr. 6A, strony A1429-A1450, Jun 1964
- [2.07] Smith P.W., “*The output power of a 6328-A He-Ne gas laser*”, *IEEE Journal of Quantum Electronics*, zeszyt QE-2, nr. 3, strony 62-68, Mar. 1966
- [2.08] Spencer M.B., Lamb W.E., “*Laser with a transmitting window*”, *Physical Review A*, zeszyt 5, nr. 2, strony 884-892, luty 1972
- [2.09] Greenstein H., “*Theory of a single-mode gas laser*”, *Physical Review*, zeszyt 175, nr. 2, strony 438-452, listopad 1968
- [2.10] M.J.Downs, H.Down, K.W.Raine, “*Interferometer system*”, US Patent 4360271, 23.11.1982, <http://www.freepatentsonline.com/>
- [2.11] T. J. Quinn „*Mise en Pratique of the Definition of the Metre*”, *Metrologia*, zeszyt 30 nr. 5, Bureau International des Poids et Metre, Sevres, 1993/94, 523-541
- [2.12] J.Rzepka, P. Maltese, “*Układ stabilizacji częstotliwości lasera*” Patent P 307642/1995
- [2.13] White A.D., “*Frequency stabilization of gas lasers*”, *IEEE Journal of Quantum Electronics*, zeszyt QE-1, nr. 8, strony 349-357, listopad 1965
- [2.14] Birnbaum G., “*Frequency stabilization of gas lasers*”, *Proceedings of the IEEE*, zeszyt 55, nr. 6, strony 1015-1026, czerwiec 1967

- [2.15] Rzepka J., Maltese P., “*Frequency stabilization of Zeeman He-Ne laser using a surface stabilized ferroelectric liquid crystal*”, SPIE, zeszyt 3186, strony 162-166, 1997
- [2.16] S.Sambor, “*Laserowy wzorzec częstotliwości*” rozprawa doktorska I28/P-027/01, Politechnika Wroclawska, 2001
- [2.17] H.Pawołka, “*Metody dyskryminacji i kontroli częstotliwości Zeemana w nanointerferometrii laserowej*”, rozprawa doktorska, Politechnika Wroclawska, 1999
- [2.18] J.Rzepka „*Badania lasera dwumodowego jako źródła promieniowania dla interferometrii laserowej*”, Raport merytoryczny projektu badawczego finansowane przez MNiSW, nr.: 8T10C 010 21, janusz.rzepka@pwr.wroc.pl
- [2.19] M.J.Downs, H.Down, K.W.Raine, “*Interferometer system*”, US Patent 4360271, 23.11.1982, <http://www.freepatentsonline.com/>
- [2.20] S.M.Khanna, N.J.Somerset, J.F.Willemin, “*Heterodyne interferometer*”, US Patent 4834111, 30 maj 1989, <http://www.freepatentsonline.com/>
- [2.21] „*Laser Interferometer HP5529*”, dokumentacja techniczna systemu pomiarowego firmy Hewlett-Packard HP5529, 1999, [www.agilent.com](http://www.agilent.com), <http://www.n4mw.com/hp5526/hple.htm> - 06.08.2008
- [2.22] E.Matras, „*Wpływ parametrów układu lasera na stałość częstotliwości generatora laserowego He-Ne stabilizowanego za pomocą nasyconej komórki z parami jodu*”, rozprawa doktorska I28/K-169/78, Politechnika Wroclawska, 1978
- [2.23] Z.Płochocki, “*Co to jest laser*”, Wiedza Powszechna 1984, ISBN 83-21403-57-3
- [2.24] Röser H., „*Interferometry laserowe – funkcjonowanie i zastosowanie*”, firma Spindler & Hoyer, Göttingen, Niemcy, materiały katalogowe oraz szkoleniowe, [www.linos.de](http://www.linos.de)
- [2.25] J.Rzepka, P.Maltese, „*Frequency stabilization of Zeman He-Ne laser Rusing a surface-stabilized ferroelectric liquid crystal*”, SPIE vol 3186, [http://spie.org/x648.html?product\\_id=280486](http://spie.org/x648.html?product_id=280486)
- [2.26] H.Pawołka, S.Sambor, J.Pieńkowski, J.Rzepka, “*Optimization of discrimantion charecterictics of two-frequency He-Ne lasers used in nanointerferometry*”, SPIE zeszyt 3186, [http://spie.org/x648.html?product\\_id=280496](http://spie.org/x648.html?product_id=280496)
- [2.27] J.Pieńkowski, J.Rzepka, S.Sambor, H.Pawołka, “*Laser system for the angle and straightness measurements*”, SPIE zeszyt 3186, [http://spie.org/x648.html?product\\_id=280495](http://spie.org/x648.html?product_id=280495)

- [2.28] S.Steinlechner, “*Triggering for heterodyne interferometer*”, US Patent 20070153290, 1987, <http://www.freepatentsonline.com/>
- [2.29] G.E.Sommargren, M.Schaham, W.Hartford, “*Heterodyne interferometer system*”, US Patent 4688940, 1987, <http://www.freepatentsonline.com/>
- [2.30] W.R.C.Rowley, “*Zeeman-beat stabilized He-Ne reference laser*”, Physical Laboratory, 1987



# 3

## Ciekłe kryształy

### 3.1 WPROWADZENIE

Tradycyjna definicja skupienia materii: ciało stałe, ciecz, gaz zostały zdefiniowane około XVII wieku. Podział taki wynika z podstawowych własności substancji w danym stanie:

- stały - trudno zmienić objętość i kształt,
- ciekły - trudno zmienić objętość, a kształt łatwo,
- gazowy - łatwo zmienić objętość i kształt, ciało zajmuje całą dostępną mu przestrzeń.

Obecnie lista ta jest rozszerzona o kilka dodatkowych stanów:

- plazma (gaz zjonizowany)
- kondensat Bosego-Einsteina
- kondensat fermionów

Występowanie substancji w określonym stanie skupienia zależy od panujących w niej warunków termodynamicznych, czyli od ciśnienia i temperatury. Najlepszym, najczęściej obserwowalnym przykładem jest woda, która pod normalnym ciśnieniem atmosferycznym, w temperaturze poniżej 0°C jest ciałem stałym, w temperaturach od 0 do 100°C jest cieczą, a powyżej 100°C staje się gazem. Niektóre substancje w identycznych warunkach mogą występować w różnych stanach skupienia w zależności od wcześniejszych warunków, jakie w nich panowały, lecz zazwyczaj jeden ze stanów jest uprzywilejowany i substancja może samorzutnie przejść do tego stanu.

Niektóre krystaliczne ciała stałe charakteryzujące się trójwymiarowym uporządkowaniem dalekiego zasięgu, podgrzewane do temperatury bliskiej temperaturze topnienia ulegają przemianie fazowej w ciecz izotropową, w której uwolnione molekuly mogą wykonywać ruchy rotacyjne oraz translacyjne. ale posiadającą anizotropowe własności fizyczne, jakie można zaobserwować w krystalicznych ciałach stałych. Tę fazę pośrednią nazwano mezofazą, fazą ciekłokrystaliczną lub stanem ciekłokrystalicznym. Ponieważ, jak potwierdziły liczne eksperymenty, ciecz w stanie ciekłokrystalicznym jest optycznie ośrodkiem anizotropowym charakteryzującym się dwójłomnością, zaproponowano dla tej grupy materiałów nazwę ciekłe kryształy (LC – Liquid Crystal; **Rys.3.1.1**). Ciekły kryształ nie jest uznany za stan skupienia materii lecz za fazę przejściową pomiędzy dwoma istniejącymi [3.11],[3.01].

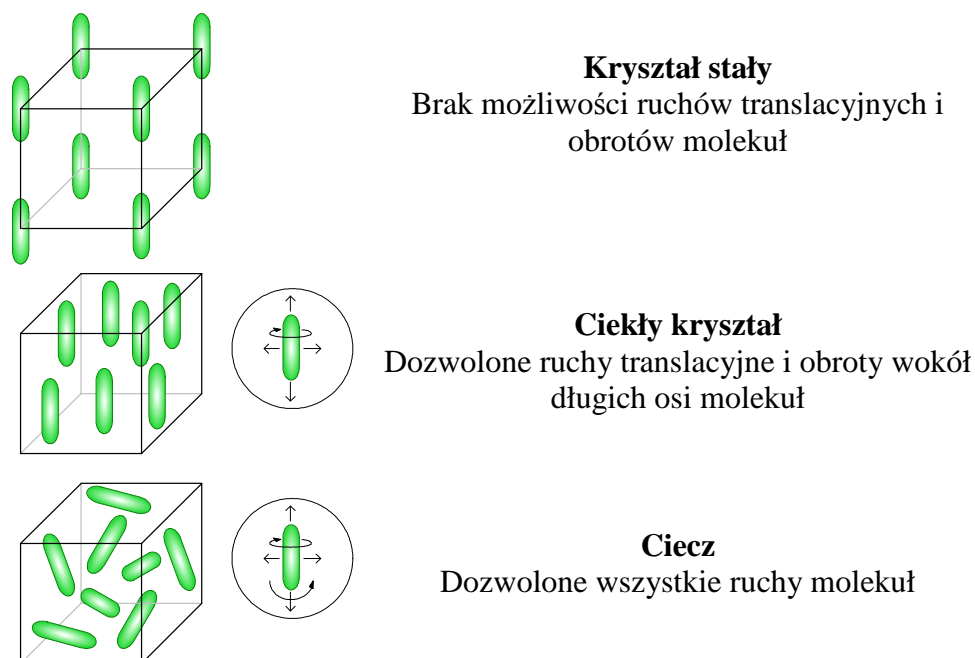
Istnienie stanu ciekłokrystalicznego zostało wykryte ponad 100 lat temu, w roku 1888 przez austriackiego botanika F.Reinitzera [3.03], który obserwował zachowanie się zsyntetyzowanego przez siebie benzoesu cholesterolu – estru cholesterolu czyli organicznego związku chemicznego będącego produktem kondensacji kwasu benzoesowego oraz alkoholu (cholesterolu). Stwierdził on, że substancja ta topiąc się przechodzi najpierw w mętną ciecz, która dopiero po dalszym podgrzewaniu przechodzi w ciecz izotropową. Dalsze badania nad tym stanem pośrednim prowadził niemiecki fizyk O.Lehmann [3.04], który

dodatkowo odkrył, że ta mętna ciecz jest ośrodkiem optycznie anizotropowym. Ponieważ dwójłomność była cechą charakterystyczną dla kryształów, nazwał tę ciecz ciekłym kryształem. Lehmann odkrył również inny typ ciekłych kryształów, które powstają przez rozpuszczenie pewnych substancji organicznych (na przykład oleinianu potasu w wodzie i alkoholu). Nazwano je później liotropowymi (LLC – Liotropic Liquid Crystals). Natomiast te ciekłe kryształy, które powstają na drodze ogrzewania nazwano *termotropowymi* (TLC – Termotropic Liquid Crystals).

Kolejne lata przyniosły kolejne odkrycia na temat nowych typów ciekłych kryształów, nowych związków chemicznych, które można wykorzystać do ich budowy [3.05-3.08],[3.10].

Dalszy znaczący postęp w badaniach nad ciekłymi kryształami nastąpił w drugiej połowie XX wieku, co zaowocowało powstaniem nowych elementów elektrooptycznych.

W 1962 Richard Williams z firmy RCA odkrył, że cienkie warstwy ciekłych kryształów pod wpływem przyłożonego napięcia modyfikują światło w interesujący aplikacyjnie sposób. Eksperymenty te przyniosły efekty w roku 1964, kiedy to George H. Heilmeyer, również w firmie RCA zbudował pierwszy wyświetlacz ciekłokrystaliczny.



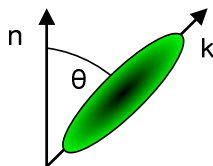
**Rys.3.1.1. Przemiany fazowe: kryształ (ciało stałe), ciekły kryształ, ciecz [3.08], [3.11], [3.26].**

Bardzo ważnym parametrem opisującym materię, a w szczególności ciekłe kryształy jest średni kierunek uporządkowania molekuł (**Rys. 3.1.1**). Określa go wektor **n** zwany direktorem. Anizotropia fizyczna molekuł LC - związana z ich wydłużonym, prętopodobnym kształtem. Jest on przyczyną występowania tendencji do równoległego ustawiania się molekuł względem siebie. Wynika ona z istnienia słabych oddziaływań między-molekularnych van der Waalsa. Direktor **n** opisuje położenie długich osi molekuł i nie określa takich właściwości, jak położenie momentów dipolowych w molekułach czy obecność bocznych grup w ich strukturach. Stopień ułożenia (uporządkowania) molekuł, warstw został więc zdefiniowany przez kolejny parametr: miarę liczbową stopnia dalekiego uporządkowania (parametr **S**) określoną zależnością [3.11]:

$$S = \frac{1}{2} \langle 3 \cdot \cos^2 \theta - 1 \rangle \dots\dots\dots (3.1.1)$$

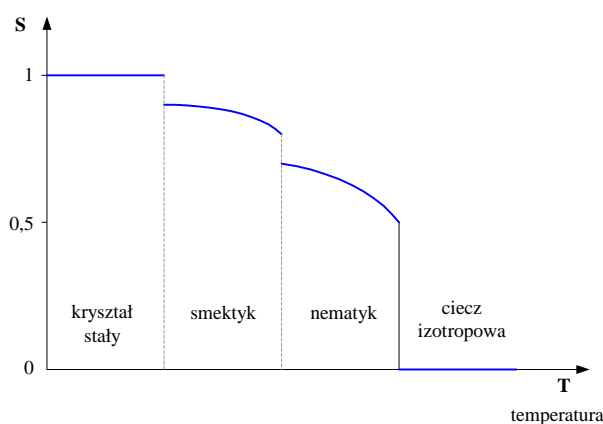
gdzie  $\theta$  - kąt zawarty między długą osią molekuły a direktorem (**Rys.3.1.2**).

Nawias trójkątny oznacza uśrednianie wartości po wszystkich molekułach. Dla cieczy, ze względu na przypadkowość rozmieszczenia molekuł, wartość parametru  $S$  jest równa 0, natomiast dla ciała stałego wynosi 1. Stopień uporządkowania  $S$  dla ciekłych kryształów mieści się w przedziale (0;1). [3.01], [3.11].



**Rys. 3.1.2. Definicja kąta  $\theta$  między wektorem normalnym warstwy  $n$ , a osią długą kryształu (wektorem kierunku  $k$ ).**

Parametr uporządkowania  $S$  zmienia swą wartość z temperaturą (**Rys. 3.1.3**) i zależy od fazy materiału. W wyniku ruchów termicznych kąt  $\theta$  molekuł podlega fluktuacjom wynoszącym nawet  $40^\circ$ . Należy zwrócić uwagę, że uporządkowanie molekuł w ciekłym kryształach jest mniejsze niż w ciele stałym, ale większe niż w cieczy. W ciekłym kryształach możliwość poruszania się molekuł jest mniejsza niż w cieczy. W zależności od stopnia uporządkowania molekuł w ciekłym kryształach rozróżnia się podział TLC na dwie podstawowe grupy: smektyczne (smektyki), nematyczne (nematyki).



**Rys.3.1.3. Poglądowa zależność parametru uporządkowania  $S$  od temperatury [3.01], [3.12].**

W ciekłych kryształach nematycznych uporządkowanie molekuł wynosi typowo  $S = 0,4 \div 0,7$  i jest znacznie mniejsze niż w smektykach ( $S \approx 0,9$ ).

Zarówno smektyki jak i nematyki mogą dodatkowo występować w fazie chiralnej, tj. takiej, w której występuje skręcenie wektora kierunku  $k$  pomiędzy poszczególnymi warstwami kryształu. Faza chiralna kryształu nematycznego zwana jest również fazą cholesteryczną (ang. *cholesteric phase*) (**Rozdział 3.2.2**).

## 3.2. FAZY CIEKŁYCH KRYSZTAŁÓW

### 3.2.1. FAZA SMEKTYKYZNA CIEKŁEGO KRYSZTAŁU

Smektyczne ciekłe kryształy (SLC – Smectic Liquid Crystal) charakteryzują się największym stopniem uporządkowania molekuł. Molekuły ułożone są obok siebie w warstwach (*Rys.3.2.1, Rys.3.2.2*).

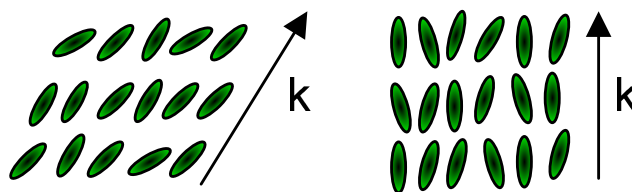
SLC (fazy smektyczne ciekłych kryształów) można podzielić dalej na dwa sposoby. Względem stopnia uporządkowania cząstek:

- smektyki cieczipodobne – brak uporządkowania molekuł w warstwach (poza uporządkowaniem środków ciężkości) np.: SmA, SmC
- smektyki kryształopodobne – wykazujące pozycyjne ułożenie molekuł w warstwie np.: SmB (ułożenie heksagonalne), SmH, SmG, SmE.

Podział ten jednak jest nieco sztuczny, gdyż w istocie stopień uporządkowania molekuł w fazach smektycznych (których jest łącznie kilkadziesiąt) zmienia się płynnie od układów bardziej cieczipodobnych do bardziej kryształopodobnych. Właściwości ciekłego kryształu różnią się znacznie w zależności od stopnia uporządkowania.

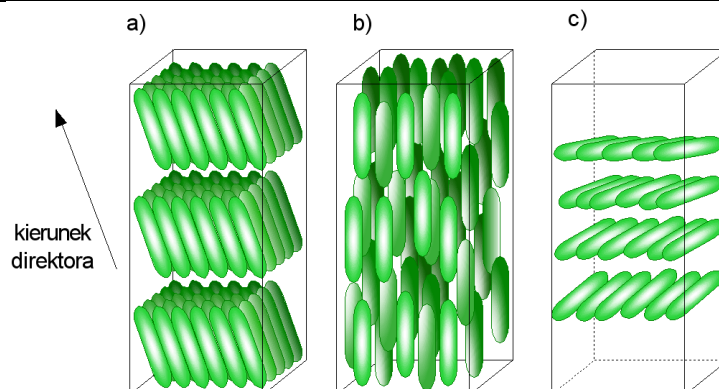
Drugi podział, wynika z orientacji warstw smektycznych, względem wektora  $k$ :

- smektyki ortogonalne - wektor  $k$  jest prostopadły do powierzchni warstw (**SmA, SmB, SmE**).
- smektyki pochylone (nieortogonalne) - wektor  $k$  przecina powierzchnie warstw pod kątem innym niż  $90^\circ$  (**SmC, SmG, SmH**). Czasem opisywane jako smektyki chiralne w fazie C, oznaczane jako SmC\*.



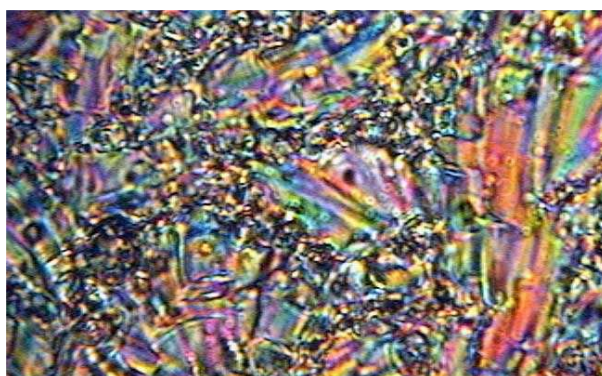
*Rys. 3.2.1. Ułożenie molekuł w mezofazach A (po lewej) i C (po prawej). Strzałki oznaczają wektory kierunkowe [3.11].*

W smektykach molekuły ustawione są względem siebie równolegle tworząc warstwy o grubości  $d$  (tzw. odległość między-płaszczyznowa) zależnej od budowy molekuł, temperatury oraz kąta ich nachylenia względem prostej prostopadłej do powierzchni warstwy. Molekuły między warstwami w płaszczyźnie prostopadłej do direktora  $n$  są oddalone od siebie o odległość  $D$  zwaną odległością między-molekularną. Ze względu na dużą lepkość i sztywną strukturę, SLC długo nie znajdowały zastosowania do budowy wyświetlaczy. Obecnie prowadzone są wzmożone prace nad możliwością zastosowania smektyków ferroelektrycznych do budowy kolorowych przetworników obrazu.



**Rys.3.2.2. Struktura termotropowych ciekłych kryształów: a) smektyk, b) nematyk, c) cholesteryn [3.11].**

Materiały generujące fazy ciekłokrystaliczne posiadają unikalną cechę tworzenia bardzo charakterystycznych wzorów w świetle spolaryzowanym. Tekstury te, jakkolwiek tłumaczyć ich powstawanie, są bardzo charakterystyczne dla określonego typu mezofazy co pozwala na szybkie rozpoznanie fazy kryształu.



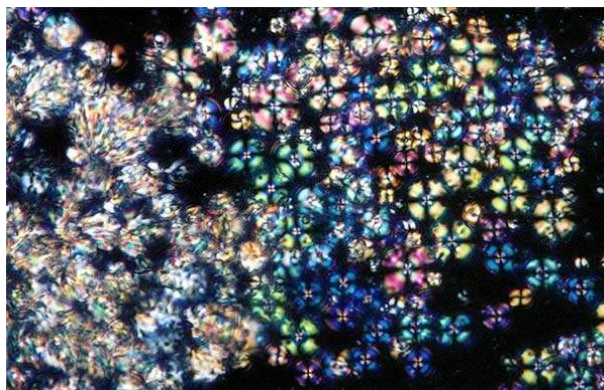
**Rys.3.2.3. Zdjęcie struktury „marmurkowej” ciekłego kryształu typu SmC [3.26].**



**Rys.3.2.4. Zdjęcie struktury "konfokalnej" ciekłego kryształu typu SmA (smektyczna faza A ciekłego kryształu) [3.26].**

Tylko niektóre mieszaniny związków, przy ściśle określonej ich proporcji, posiadają cechy eutektyków, tzn. pozostają w jednej mezofazie w znacznie szerszym zakresie temperatur, niż każdy z nich z osobna. Tego rodzaju mieszaniny są powszechnie stosowane w kolorowych wyświetlaczach (szczególnie SmC\*) i elementach elektrooptycznych (wykorzystuje się tzw. zjawiska nieliniowe – ciekłe kryształy są wykorzystywane jako bramki logiczne oraz generatory i analizatory wyższych harmonicznych światła (SHG), które wielokrotnie zwiększają przepustowość informacyjną światłowodów).

Część substancji posiada fazę ciekłokrystaliczną w bardzo wąskim zakresie zmian temperatury. Można wtedy zaobserwować różne fazy w jednej próbce kryształu. Szybka zmiana faz nie jest odpowiednia do budowy elementów elektrooptycznych. Obserwacja przejść pozwala więc wyeliminować niewłaściwa mieszaninę kryształów.



Rys.3.2.5. Zdjęcie przejścia z fazy A do N smektyka [342].

### 3.2.2. FAZA CHOLESTERYCZNA

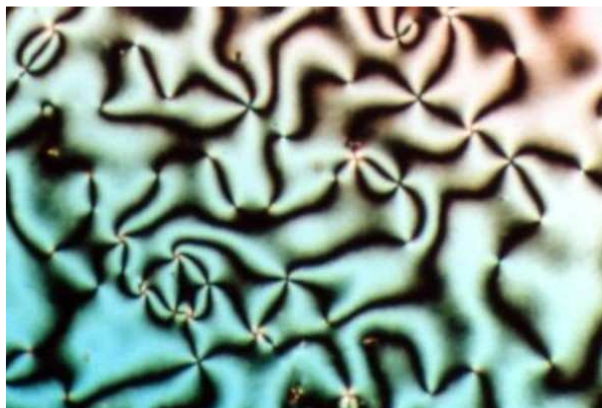
Cholesteryczne ciekłe kryształy (ChLC – Cholesteric Liquid Crystals; lub inaczej nematyki chiralne – ang. *chiral Nematic* [3.01]) zawdzięczają swoją nazwę związkom cholesterolu, w których po raz pierwszy wykryto tę fazę. Charakterystyczną strukturę cholesteryków (Rys. 3.2.2) tworzą warstwy z równoległe ułożonych względem siebie molekuł, przy czym direktory w sąsiednich warstwach są skręcone o niewielki kąt o stałej wartości, co powoduje, że grupa molekuł tworzy w pewnej odległości obraz śruby opisany jako *skok helikoidy cholesterycznej p*. Ciekłe kryształy z fazą nematyczną skręconą nie mają środka symetrii. Skok śrubowy  $p$  definiuje się jako odległość pomiędzy warstwami, na której direktor wykona obrót o kąt  $360^\circ$ . Struktura śrubowa ChLC jest przyczyną występowania pewnych zjawisk optycznych, jak rozkład fali świetlnej na dwie składowe spolaryzowane kołowo w przeciwnych kierunkach, przy czym jedna ze składowych ulega odbiciu a druga przechodzi przez warstwę ChLC. Ponadto cholesteryki wykorzystuje się do analiz chemicznych, pomiarów i wizualizacji promieniowania nadfioletowego, rentgenowskiego, gamma, pomiarów ciśnienia hydrostatycznego, wizualizacji pól elektrycznych i magnetycznych. Ponieważ skok śruby zależy od temperatury [3.19],[3.20], kryształy cholesteryczne mogą być również wykorzystane jako czujniki temperatury.

### 3.2.3. FAZA NEMATYCZNA CIEKŁEGO KRYSZTAŁU

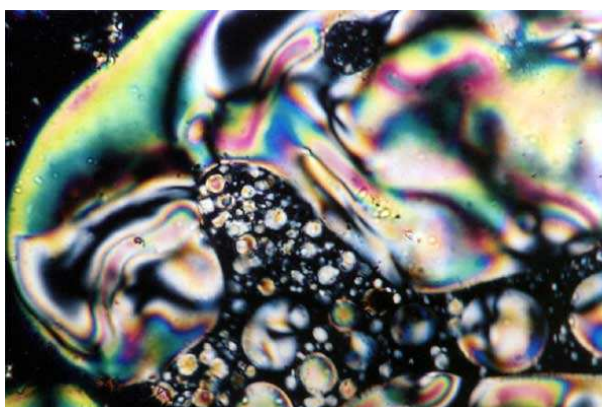
Nematyczne ciekłe kryształy (NLC – Nematic Liquid Crystals) charakteryzują się uporządkowaniem orientacyjnym związanym z ograniczoną możliwością ruchu molekuł, które muszą zachować pewną równoległość względem siebie. Inaczej, w fazie nematycznej jedyną formą uporządkowania jest układanie się osi molekuł wzdłuż wektora  $\mathbf{k}$ . Faza nematyczna jest oznaczana zwykle symbolem **N**. W fazie N nie obserwuje się tworzenia warstw przez molekule, ich środki ciężkości są rozmieszczone chaotycznie, pogarszając stopień uporządkowania struktury molekularnej S.

Odmianą fazy nematycznej jest faza cholesterolowa ( $N^*$ ), w której złożenie w przestrzeni grupy wektorów nie tworzy prostej, lecz helisę (spirale; nematyki chiralne).

Wyświetlacze oparte na fazie nematycznej są monochromatyczne .



*Rys.3.2.6. Zdjęcie fazy N ciekłego kryształu [3.26].*



*Rys.3.2.7. Zdjęcie struktury Shilren w fazie N ciekłego kryształu [3.26].*

### 3.2.4. ZASADY PRZEJŚĆ FAZOWYCH W CIEKŁYCH KRYSZTAŁACH

W większości substancji ciekłokrystalicznych, wraz ze zmianą temperatury, różne fazy pojawiają się w ściśle określonym porządku. Przykładowo, wraz ze zmniejszaniem wartości temperatury po ciekłej fazie izotropowej nastąpi faza nematyczna, nieuporządkowane fazy smektyczne (np. A lub C), fazy smektyczne uporządkowane i ostatecznie pełna krystalizacja.

Można je zapisać w niżej podany sposób [3.22], [3.05b,c],[3.09]:

**Kryształ – H – K – E – G – J – F – B(cryst.) – I – B(hex.) – C – A – N – Ciecz**

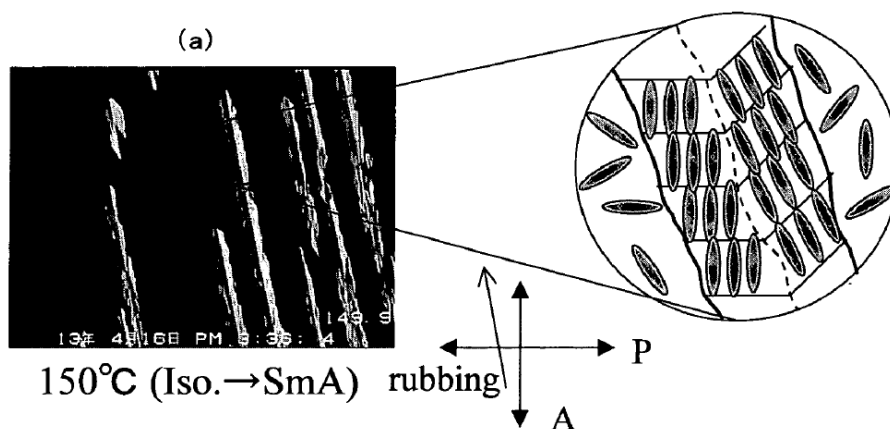
Czasami, podaje się temperatury przejść fazowych.

**Kryształ – 60 – F – 64 – C\* – 78 – A – 135 – Ciecz**

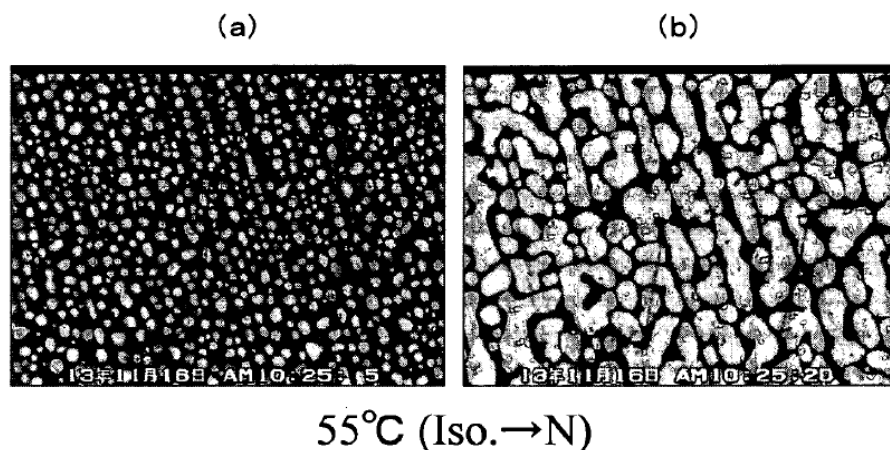
Z powyższego zapisu wynika, że wyżej opisana, substancja HOBACPC będąc ogrzewana ze stanu stałego do ciekłego przechodzi przez trzy fazy pośrednie: w zakresie temperatur 60-64 °C jest w fazie F, w zakresie 64-78 °C w fazie C\*, a w zakresie 78-135 °C w fazie A [3.09].

Do tej pory nie odkryto substancji posiadającej wszystkie fazy. Używane substancje przechodzą zazwyczaj tylko kilka faz, jak np. HOBACPC [3.23],[3.09].

Ze względu na różne zastosowania ciekłych kryształów, poszukiwane są związki i mieszaniny o wymaganych cechach tzn.: posiadających odpowiednio szerokie fazy przejścia przy jak największej zmianie temperatury.

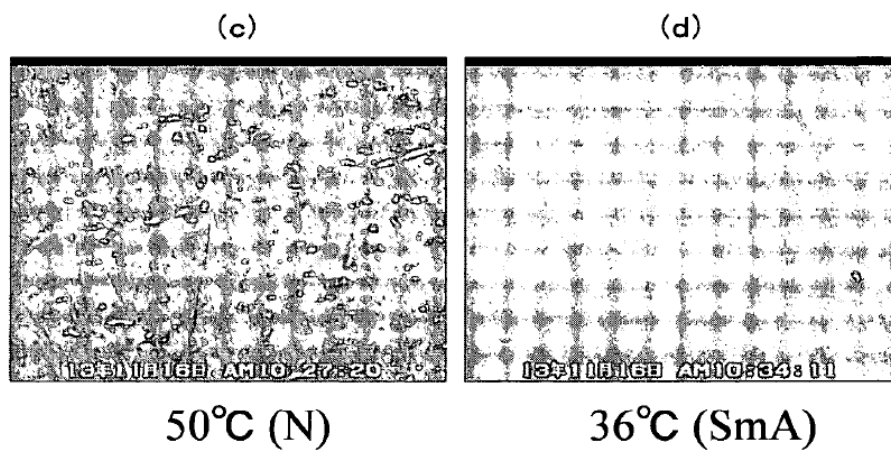


**Rys.3.2.7.1.** Zdjęcie mikroskopowe struktury kryształu UCL-001 w momencie przejścia z w fazy ISO bezpośrednio do fazy SmA [3.16]. Przejście bezpośrednio do fazy SmA powoduje utwalenie chaotycznego ułożenia molekuł.



**Rys.3.2.7.2.** Zdjęcie mikroskopowe struktury kryształu UCL-001 w momencie przejścia z w fazy ISO do fazy nematycznej [3.16]. Rubbing powoduje wstępne pozycjonowanie molekuł kryształu.





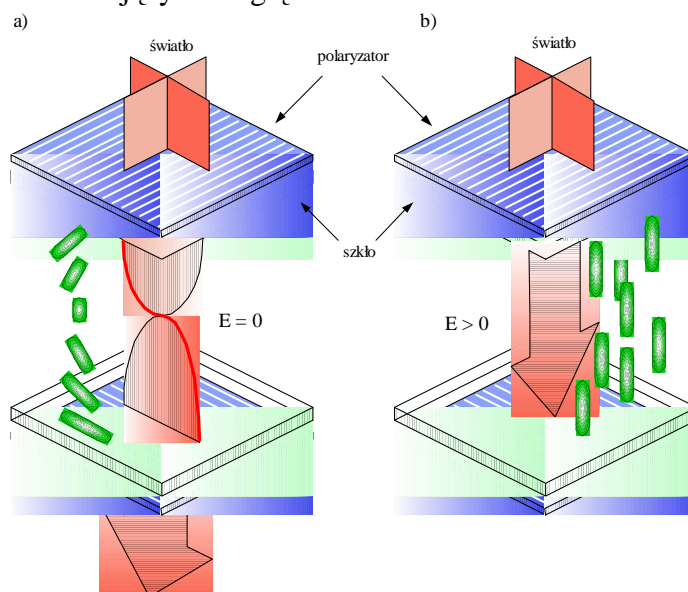
**Rys.3.2.7.3. Zdjęcia mikroskopowe struktur (wzorów) kryształu UCL-001 w fazach: nematycznej i SmA [3.16]. Warstwy orientujące molekuly (ang.: „Rabbing”) oraz powolne schładzanie powoduje powstanie jednorodnej struktury z molekuł kryształu.**

### 3.2.5. EFEKT SKRĘCONEGO NEMATYKA. BUDOWA KOMÓRKI Z KRYSZTAŁEM TN.

Wśród kilkudziesięciu różnych efektów występujących w ciekłych kryształach, najbardziej rozpowszechnionym i wykorzystywanym na skalę przemysłową jest *efekt skręconego nematyka* (TN – Twisted Nematic). Ciekłe kryształy pracujące w tej fazie są stosowane głównie jako monochromatyczne wyświetlacze ciekłokrystaliczne w zegarach, przyrządach pomiarowych, itp.

Typowa komórka ciekłokrystaliczna wykorzystująca ten efekt, składa się z równolegle ułożonych płytek szklanych z naniesionymi elektrodami, warstwy orientującej molekuły ciekłego kryształu („rubbing”) przy powierzchni płytek oraz polaryzatorów. Warstwy orientujące wykonuje się bezpośrednio na płytkach szklanych poprzez kierunkowe polerowanie ich powierzchni aksamitem lub bombardowanie wiązką jonową, tworząc tym samym teksturę rowkową. Ze względu na dużą twardość szkła spotyka się rozwiązania, polegające na pokryciu powierzchni płytek szklanych silanem. Ponieważ twardość silanu jest mniejsza niż szkła, wykonanie warstwy orientującej jest bardziej ekonomiczne ze względu na zużycie materiałów polerskich [3.06], [3.01].

Molekuły NLC znajdujące się przy powierzchni warstw orientujących przylegają do rowków na zasadzie adhezji, wymuszając teksturę homogeniczną, w której dla TN kierunek długich osi molekuł zmienia się w kolejnych warstwach tak, że przy elektrodach kierunki te są prostopadłe. Powoduje to skręcenie struktury NLC o kąt  $90^\circ$  oraz skręcanie płaszczyzny polaryzacji światła o kąt takiej samej wartości. Skręcenie struktury NLC determinuje kątowe ustawienie powierzchni orientujących względem siebie.



**Rys. 3.2.8. Idea działania komórki LC wykorzystująca efekt TN: a) stan wyłączony, b) stan włączony [3.08], [3.12].**

Zasadę działania komórki ciekłokrystalicznej opartej o efekt TN obrazuje **Rysunek 3.2.8.** Światło padające na komórkę LC, po przejściu przez polaryzator, trafia na mieszaninę ciekłokrystaliczną skręconą o kąt  $90^\circ$ . Przy zerowym polu elektrycznym struktura TN skręca płaszczyznę polaryzacji o  $90^\circ$ . Światło ze zmienioną polaryzacją bez przeszkód opuści komórkę LC i drugi polaryzator. Przyłożenie pola elektrycznego powoduje orientację długich osi molekuł wzdłuż linii sił pola (orientacja homeotropowa). Taka struktura NLC nie skręca płaszczyzny polaryzacji światła. Ponieważ płaszczyzny polaryzacji polaryzatorów są względem siebie prostopadłe, światło przechodzące bez zmiany polaryzacji przez NLC

zostanie wytlumione na jednym z polaryzatorów. Komórka NLC na obszarze elektrod tworzy wówczas ciemną powierzchnię na jasnym tle. Możliwa jest również praca negatywna, czyli taka, gdy polaryzatory są ustawione w ten sposób, że domyślnie (bez przyłożonego napięcia) komórka tłumi światło, a w stanie włączenia przepuszcza. Taka konfiguracja może być rozwinięta o dodatkowe kolorowe filtry tworząc prosty wyświetlacz kolorowy.

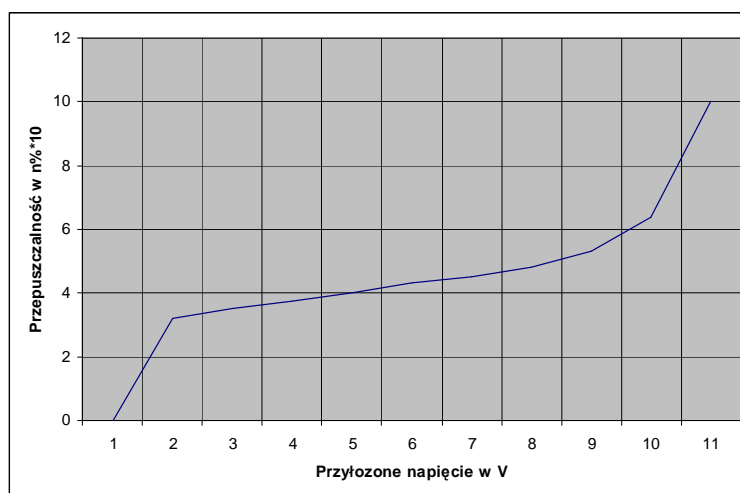
Możliwość obserwacji efektu TN jest ściśle związana z określoną anizotropią optyczną materiału ciekłokrystalicznego oraz grubością warstwy LC. Aby reorientacja molekuł kryształu nadążała za szybkością zmian napięcia sterującego musi być spełniony warunek:

$$\Delta n \cdot d \gg \lambda / 4 \quad (3.2.1)$$

Gdzie:  $\Delta n = n_o - n_e$   $\Delta n$  - dwójłomność,  $n_o$  - współczynnik załamania promienia zwyczajnego,  $n_e$  - współczynnik załamania promienia nadzwyczajnego,  $d$  – grubość warstwy ciekłokrystalicznej,  $\lambda$  - długość fali światła przechodzącego przez warstwę ciekłego kryształu. Typowe grubości warstw LC komórek TN mieszczą się w przedziale 5 ÷ 15  $\mu\text{m}$  [3.06],[3.01].

Bardzo istotnym parametrem każdej komórki ciekłokrystalicznej, opartej o efekt TN, jest charakterystyka elektrooptyczna oraz dynamiczna komórki LC.

Charakterystyka elektrooptyczna przedstawia zależność współczynnika transmisji światła przez warstwę LC od wartości napięcia sterującego. Na **Rys.3.2.9** przedstawiono przykładową charakterystykę elektrooptyczną komórki LC wyświetlacza.



**Rys.3.2.9. Typowa charakterystyka elektrooptyczna dla efektu TN.**

Kształt charakterystyki zależy od właściwości materiału ciekłokrystalicznego, częstotliwości napięcia sterującego, temperatury oraz od kąta nachylenia wiązki światła względem prostej prostopadłej do powierzchni komórki LC [3.18]. Pomiary powinien zostać wykonany w warunkach najbardziej zbliżonych do warunków rzeczywistej pracy.

Charakterystyki dynamiczne, czyli czasy przełączania rozumiane jako odpowiedź warstwy LC na pobudzenie impulsowe, określają dwa ważne parametry LC takie jak: czas narastania  $\tau_{on}$  oraz opadania  $\tau_{off}$ . Wartości tych czasów opisują szybkość przełączania napięcia sterującego, w konsekwencji wpływając na ograniczoną częstotliwość przełączania komórki ciekłokrystalicznej i wynikającą z tego faktu maksymalną częstotliwość zmian.. Czasy narastania i opadania określone są zależnościami

$$\tau_{on} = \eta \cdot d^2 \cdot ((\Delta \epsilon / 4\pi) \cdot V^2 - K \cdot \pi^2)^{-1} \quad (3.2.2)$$

$$\tau_{off} = \eta \cdot d^2 / K \cdot \pi^2, \quad (3.2.3)$$

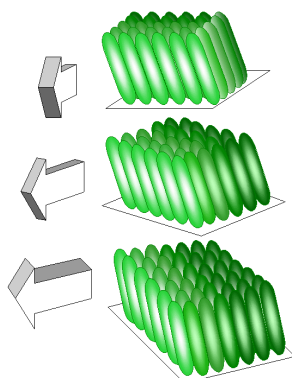
gdzie  $K$  – współczynnik charakteryzujący stałe sprężystości,  $\eta$  - współczynnik lepkości,  $d$  - grubość warstwy ciekłego kryształu,  $V$  – napięcie przyłożone,  $\Delta\varepsilon = \varepsilon_{\parallel} - \varepsilon_{\perp}$  - anizotropia przenikalności elektrycznej.

Z zależności (3.2.2) i (3.2.3) wynika, iż o szybkości działania komórki LC decydują parametry materiałowe kryształu (głównie lepkość), grubość warstwy LC oraz wartość przyłożonego napięcia. Najprostszym sposobem skrócenia czasu przełączania jest zmniejszanie grubości warstwy LC oraz zwiększanie wartości napięcia sterującego. Typowe czasy włączania wynoszą kilkadziesiąt, a wyłączenia – kilkaset milisekund. Należy zwrócić uwagę, iż są to czasy dla komórek LC w temperaturze pokojowej. W temperaturach niższych od pokojowej obserwuje się znaczny wzrost czasów przełączania, co jest związane ze wzrostem lepkości mieszaniny LC w niższych temperaturach [3.01],[3.06].

### 3.3. SMEKTYKI FERROELEKTRYCZNE

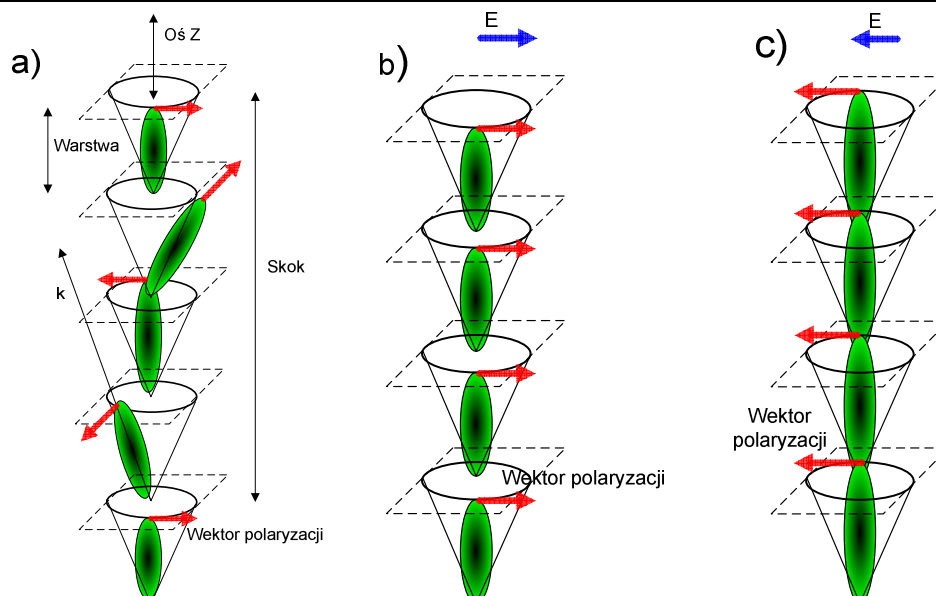
#### 3.3.1. WPROWADZENIE

W roku 1974 R.B.Mayer przewidział, że skośna faza  $SmC^*$  (również:  $SmL^*$ ,  $SmF$ ) utworzona z chiralnych molekuł powinna wykazywać własności ferroelektryczne. W 1975 roku w wyniku dodania do smektycznego ciekłego kryształu  $SmC$  niewielkiej ilości molekuł chiralnych został utworzony pierwszy materiał do budowy komórek ferroelektrycznych.. Obecność molekuł chiralnych powoduje skrócenie warstw smektyka, które jest kombinacją skręceń poszczególnych warstw smektycznych. Również kierunek pochylenia molekuł w warstwach ulega skręceniu wokół osi prostopadłej do warstw molekularnych (*Rys.3.3.1*, *Rys.3.3.2.a*).



*Rys.3.3.1. Budowa molekularna smektyka ferroelektrycznego ( $SmC^*$ ) [3.21].*

Taka kombinacja skręceń poszczególnych warstw molekularnych powoduje istnienie lokalnej polaryzacji spontanicznej, zaznaczonej za pomocą strzałek na *Rys.3.3.2.a*.



**Rys. 3.3.2. a) Budowa molekularna smektyka ferroelektrycznego (źródło [3.11]). Strzałki oznaczają kierunki lokalnej polaryzacji molekuly kryształu –brak zewnętrznego pola E, b) oraz c) rozwinięcie spirali w wyniku zewnętrznego pola E [3.26].**

Dzięki występującej polaryzacji spontanicznej  $P_s$ , możliwe jest sterowanie właściwościami optycznymi warstwy za pomocą zewnętrznego pola elektrycznego. (**Rys.3.3.2.a**)

### 3.3.2. DIELEKTRYKI FERROELEKTRYCZNE. KRYSZTAŁY FERROELEKTRYCZNE.

Materiały ferroelektryczne są podzbiorem materiałów dielektrycznych. Oprócz bardzo szerokiej pętli histerezy wektora polaryzacji  $\mathbf{P}$  (przy zmianie wektora natężenia pola), dużej wartości podatności elektrycznej  $\chi$  (wynikającej z lepkości ośrodka i bezwładności ładunków elektrycznych) materiały ferroelektryczne charakteryzują się niezerową wartością polaryzacji przy braku zewnętrznego pola elektrycznego  $\mathbf{E}$ . Jest to tzw. polaryzacja spontaniczna  $P_s$ . Jej wartość i znak zależy od historii zmian wartości i kierunku zewnętrznego pola elektrycznego  $\mathbf{E}$ .

Molekuła, która posiada elektryczny moment dipolowy przy braku zewnętrznego pola elektrycznego jest nazywana molekułą polarną. Tego typu molekuła ustawia się w zależności od zewnętrznego pola elektrycznego  $\mathbf{E}$ . Wartość wektora polaryzacji  $\mathbf{P}$  w zależności od przyłożonego pola jest znacznie większa dla materiałów zawierających molekuły polarne (tzw. dielektryków polarnych), niż dla materiałów takich molekuł nie zawierających [3.09], [3.23].

Zależność wektora indukcji elektrycznej  $\mathbf{D}$ , natężenia pola elektrycznego  $\mathbf{E}$  i wektora polaryzacji (dla ośrodków liniowych) można zapisać wzorem:

$$\mathbf{D} = \varepsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P} = \varepsilon_w \varepsilon_0 \mathbf{E} \quad (3.3.1)$$

i dalej

$$\mathbf{P} = (\varepsilon_w - 1) \varepsilon_0 \mathbf{E} = \eta \varepsilon_0 \mathbf{E} \quad (3.3.2)$$

gdzie  $\epsilon_w$  oznacza względną przenikalność elektryczną dielektryka,  $\epsilon_0$  przenikalność elektryczną próżni, a  $\eta$  bezwymiarową podatność elektryczną dielektryka [3.24].

Polaryzacja (bezwzględna wartość wektora polaryzacji) ma wymiar:  $[P]=C/m^2$

Wartość podatności dla większości materiałów jest w przedziale 0 – 10, natomiast dla materiałów ferroelektrycznych może przekraczać nawet 10000. Zgodnie z Demus [3.05c] podatność  $\eta$  jest odwrotnie proporcjonalna do temperatury i jest opisana prostą zależnością [3.28]:

$$\eta=c/T \quad (3.3.3)$$

gdzie T oznacza temperaturę, a „c” jest stałą. Powyższa zależność jest szczególnie istotna dla dielektryków polarnych, posiadających dużą wartość podatności  $\eta$  oraz dużą zależność tej podatności od temperatury.

Małe zmiany temperatury mogą być widoczne w wiązce spolaryzowanego światła laserowego w postaci niekontrolowanych zmian polaryzacji. Dodatkowo przy dużej zmianie temperatury kryształ może przejść do kolejnej fazy o zupełnie innych właściwościach optycznych.

Struktura każdej fazy SSFLC jest charakteryzowana przez trzy parametry: odległość między warstwami  $d_A$ , polaryzację spontaniczną molekuł  $P_s$  oraz kąt nachylenia molekuł  $\theta$ . Wszystkie te parametry zależą od użytego materiału [3.33] i od temperatury.

Zależność od temperatury może zostać wyrażona poprzez zależność:

$$P_s(T) \sim (T_c - T)^\alpha \quad (3.3.4)$$

gdzie  $T_c$  jest temperaturą przejścia między fazami SmC\* i SmA\* natomiast wykładnik potęgowy  $\alpha$  jest stałą zależną od materiału. Zazwyczaj wartość wykładnika  $\alpha \approx 0.5$ .

Pozostałe dwa parametry, tj.  $P_s$  i  $\theta$ , są związane zależnością [3.32]:

$$P_s = \mu\theta \quad (3.3.5)$$

gdzie  $\mu$  jest parametrem zależnym od struktury kryształu.

Ciekłe kryształy ferroelektryczne oraz anty-ferroelektryczne ze względu na bardzo różnorodne właściwości optyczne są obecnie chętnie badane przez naukowców z całego świata. Efektem tych prac są tysiące zsyntezowanych ciekłych kryształów. Niestety nadal trwają poszukiwania nad stabilnymi strukturami to wykorzystania, głównie, w wyświetlaczach. Wykorzystanie ferroelektrycznych kryształów jest znacznie trudniejsze ze względu na problemy z uzyskaniem jednorodnej orientacji molekuł w ich warstwowej budowie [3.16], [Rys.3.2.7.1]. W tym celu stosuje się różne procedury uwzględniające mieszanie różnych ciekłych kryształów, utrwalanie ultrafioletem, dubbing [3.16], [3.17].

Ujawnienie efektu ferroelektrycznego wymaga rozwinięcia skręconej struktury SmC\*, ponieważ w stanie swobodnym mieszaniny FLC, uśredniony efekt ferroelektryczny jest równy zero. Można to osiągnąć czterema sposobami:

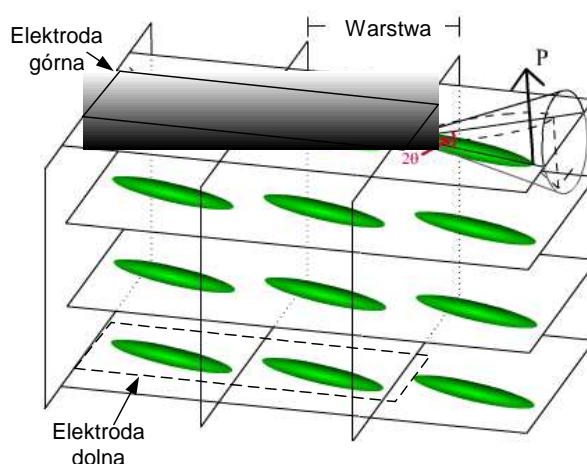
- likwidowanie aktywności na drodze domieszkowania mieszaniny SmC\*,
- przyłożenie drgań równoległych do płaszczyzn molekularnych (trudna w realizacji praktycznej),

- zewnętrznym polem elektrycznym (**Rys.3.3.2.a**),
- uformowaniem powierzchni elektrod i rozwinięcie spirali na skutek oddziaływań powierzchniowych.

Nie wszystkie z wymienionych sposobów pozwalają na uzyskanie dobrych rezultatów. Dla przykładu, jeśli spirala zostanie rozwinięta poprzez działanie zewnętrznego pola, jak zostało to zaprezentowane na **Rys. 3.3.2.**, to szerokość pętli histerezy będzie bardzo mała, a więc i efekt ferroelektryczny będzie znikomy [3.05c]. Ostatni z wymienionych sposobów, pierwotnie przedstawiony w pracy Clarka i Lagerwalla [3.27] został nazwany efektem *powierzchniowej stabilizacji ferroelektryka* (**SSFLC** – Surface Stabilized Ferroelectric Liquid Crystal).

### 3.3.3. BUDOWA KOMÓRKI Z KRYSZTAŁEM SSFLC

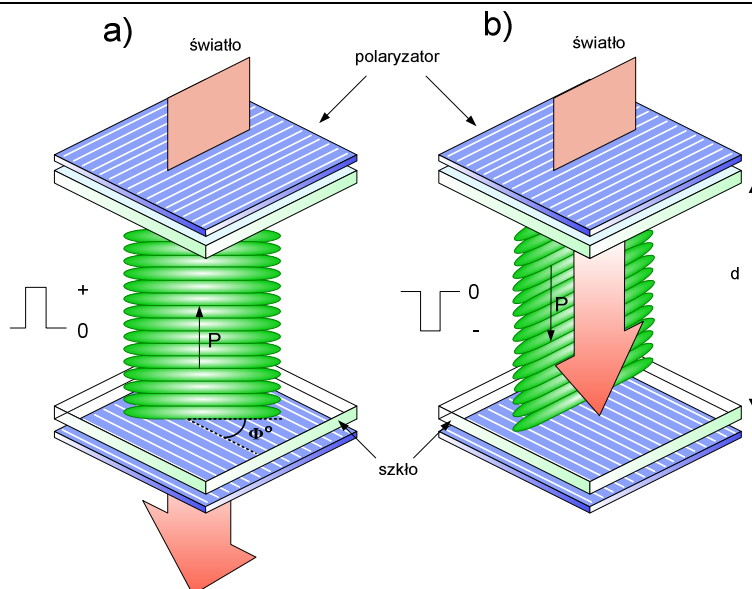
Komórka ciekłokrystaliczna SSFLC zbudowana jest z dwóch płytek szklanych z napyłnionymi na powierzchniach wewnętrznych elektrodami. Pomędzy warstwami umieszczony jest ciekły kryształ (**Rys.3.3.3**, **Rys.3.3.4**).



**Rys.3.3.3. Budowa komórki z kryształem SSFLC. Polaryzacja molekuł w zewnętrznym polu elektrycznym  $E$ .**

Konstrukcja komórki wymaga stosowania bardzo cienkich warstw (grubość warstwy mniejsza od skoku spirali  $p$ ) ciekłego kryształu, około  $2 \div 3 \mu\text{m}$ , ponieważ dopiero wtedy siły adhezji są wystarczające do rozwinięcia skręconej struktury  $\text{SmC}^*$ .

Należy zauważyć, że wymuszenie równoległego ustawienia molekuł do powierzchni elektrod wymusza kierunek wektora polaryzacji  $P$  od elektrody górnej do dolnej, lub odwrotnie, w zależności od pozycji molekuły (**Rys.3.3.3**, **Rys.3.3.4**). Ważne jest również, iż oba stany istnieją bez obecności zewnętrznego pola. Pole elektryczne jest potrzebne tylko do przełączania kąta  $\theta$ , czyli stanu kryształu.



**Rys.3.3.4. Zasada działania komórki SSFLC. Komórka zachowuje się tak jak płytko opóźniająca o przełączanej dwójłomności.  $P$  oznacza wektor polaryzacji,  $d$  – grubość kryształu, a  $\Psi$  kąt między polaryzacją padającego na komórkę światła i osią optyczną kryształu. a) – polaryzacja przechodzącego światła jest skręcana – światło przechodzi przez polaryzator analizujący; b) – polaryzacja przechodzącego światła nie jest skręcana – światło nie przechodzi przez polaryzator analizujący [3.02], [3.06], [3.13-3.15], [3.17].**

Siły oddziaływań powierzchniowych wymuszają równoległe ułożenie molekuł ciekłego kryształu do powierzchni nośnych komórki SSFLC. Podanie na elektrody ujemnego impulsu elektrycznego (Rys.3.3.3) spowoduje, iż powstałe pole elektryczne zorientuje molekuly kryształu w taki sposób, że wektor spontanicznej polaryzacji będzie skierowany w dół. Osie molekuł stają się równoległe do kierunku polaryzacji światła. Wówczas światło przechodzi bez zmian przez warstwę LC. Ponieważ płaszczyzna polaryzacji drugiego polaryzatora jest skręcona o kąt  $90^\circ$  względem pierwszego, światło przechodzące przez LC zostaje na nim wytłumione. Oddziaływanie powierzchniowe powoduje również to, iż taki stan struktury molekularnej  $SmC^*$  trwa nawet po wyłączeniu impulsu napięcia sterującego. Zmianę uzyskuje się poprzez podanie dodatniego impulsu elektrycznego. Wówczas molekuly ustawiają się w taki sposób, w którym wektor polaryzacji jest skierowany w górę. Oś molekuł tworzy kąt  $\theta=45^\circ$  względem kierunku polaryzacji światła. Jeżeli grubość warstwy będzie tak dobrana, aby spełniony został warunek:

$$\Delta n \cdot d = 0,28 \mu m, \quad (3.3.6)$$

to taka warstwa LC będzie wykazywać własności półfalowe (działa jak płytko półfalowa), powodując skręcenie płaszczyzny polaryzacji światła o kąt  $90^\circ$ . Ponieważ w tym przypadku płaszczyzna polaryzacji światła i polaryzatora są zgodne, światło opuści komórkę FLC.

Czas przełączania  $\tau$  przetwornika FLC określa zależność

$$\tau = \frac{\gamma \cdot \sin \theta}{P \cdot E}, \quad (3.3.7)$$

gdzie  $P$  – polaryzacja spontaniczna,  $E$  – natężenie pola elektrycznego,  $\gamma$  – lepkość rotacyjna,  $\theta$  – kąt pochylecia molekuł w warstwie smektycznej.

W porównaniu z komórkami ciekłokrystalicznymi opartymi o efekt TN, komórki FLC charakteryzują się bardzo stromymi charakterystykami elektrooptycznymi oraz krótkimi



czasami przełączania  $\tau$  wynoszącymi typowo  $2\mu\text{s}$ . Stanowią zatem alternatywę dla przetworników TN, eliminując jedną z ich największych wad, jaką jest długi czas przełączania (kilkaset milisekund). Niestety problemy technologiczne z uzyskaniem odpowiednio małej grubości kryształu związane z powstawaniem w kryształach SSFLC struktur typu Chevron [3.09], [3.29], utrudniają szersze zastosowanie technologii ciekłych kryształów ferroelektrycznych. Z tego też powodu próby wyjaśnienia mechanizmu powstawania tego typu struktur zostały podjęte przez wiele grup badawczych (np. prace Watsona, Kodena . [3.30-3.31]).

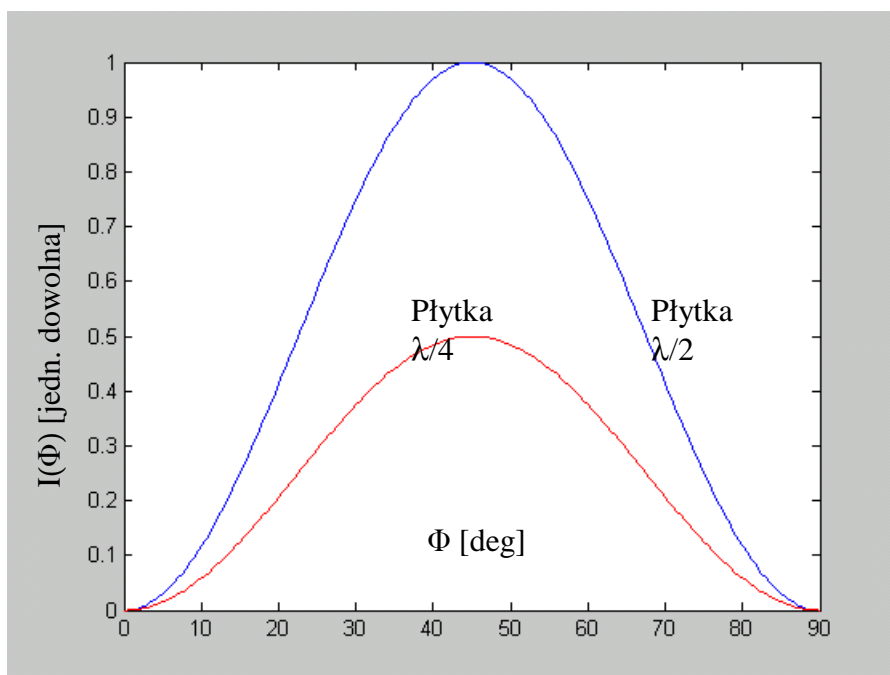
Większość zastosowań komórek SSFLC wynika z ich optycznej anizotropii, którą można szybko zmieniać poprzez zamianę kierunku zewnętrznego pola elektrycznego E.

Zjawisko to można wykorzystać do budowy elementu elektrooptycznego opóźniającego falę elektromagnetyczną o pewien kąt.

Z praktycznego punktu widzenia bardzo istotny jest przypadek, gdy kryształ działa jak płytka ćwierćfalowa oraz półfalowa, czyli gdy zachodzi jedna z równości:

$$d * \Delta n = \frac{\lambda}{2} \quad , \quad d * \Delta n = \frac{\lambda}{4} \quad (3.3.8)$$

Jeśli spełniony jest powyższy warunek, to komórka transmituje światło o maksymalnym natężeniu  $I_0$  (przy dodatkowym wymogu, że kąt  $2\Phi = 90^\circ$  – Rys. 3.3.4). Jeżeli iloczyn grubości kryształu  $d$  i jego dwójłomności  $\Delta n$  będzie inny od połowy długości fali  $\lambda/2$ , to wiązka wyjściowa I będzie miała na wyjściu mniejsze natężenie niż maksymalna  $I_0$  (Rys. 3.3.5) nawet wtedy, gdy kąt  $\Phi$  będzie wynosił  $45^\circ$  [3.09].



**Rys. 3.3.5. Transmitancja komórki SSFLC umieszczonej między dwoma polaryzatorami w zależności od kąta między osią optyczną kryształu a polaryzacją padającego światła  $\Psi$  dla dwóch przypadków: gdy  $d * \Delta n = \lambda/2$  i gdy  $d * \Delta n = \lambda/4$ .**

Jak widać na rysunku Rys.3.3.5 maksimum transmisji jest osiągnięte wtedy, gdy  $\Psi = 45^\circ$ , a minimum, gdy  $\Psi = 0^\circ$ . Jeśli zatem komórka zostanie ustawiona względem polaryzatorów tak, by, dla dodatkowej polaryzacji przyłożonego napięcia, był spełniony pierwszy z warunków (Rys. 3.3.4a), to zmiana znaku zewnętrznego pola spowoduje całkowite wygaszenie

przechodzącej wiązki (**Rys. 3.3.4b**). Wygaszenie będzie całkowite oczywiście wtedy i tylko wtedy, gdy podwojony kąt nachylenia molekuł  $\Phi$  będzie spełniał warunek

$$2 * \Phi = 45^\circ \quad (3.3.9)$$

Jeśli kąt  $\theta$  będzie miał inną wartość od  $22.5^\circ$  to wtedy kontrast przełączania otrzymanej płytki półfalowej będzie stosunkowo niewielki. Ta sama sytuacja dotyczy komórek działających jak płytka ćwierćfalowa. W tym przypadku (dotyczy układu stabilizacji zbudowanego przez autora) niewłaściwy wybór kąta będzie miał wpływ na uzyskany stosunek amplitud obu polaryzacji rozszczepionych modów Zeemanowskich lasera i ostatecznie punkt w jakim laser będzie stabilizował.

Otrzymywane wartości kontrastu płytek pół-falowych opartych na komórkach SSFLC nie przekraczają zazwyczaj 100:1 [**3.09**], [**3.06**].

Tego typu komórki ferroelektryczne zostały wykorzystane do stabilizacji zbudowanego przez autora dwuczęstotliwościowego (heterodynowego) interferometru laserowego oraz przy detekcji położenia wiązki z wykorzystaniem detektora czteropolowego (jak również detektora PSD).

Prace badawcze związane z opracowaniem komórki ciekłokrystalicznej prowadzone były przez międzynarodowy zespół naukowców w ramach współpracy nawiązanej przy realizacji projektu badawczego Unii Europejskiej Copernicus PL 964247.

Komórkę opracował, specjalnie dla potrzeb niniejszej pracy, w Instytucie Fizyki Stosowanej w Mińsku (Białoruś) prof. Anatolii Murawski.

Parametry wykorzystanych do badań kryształów [**3.32**], [**3.25**]:

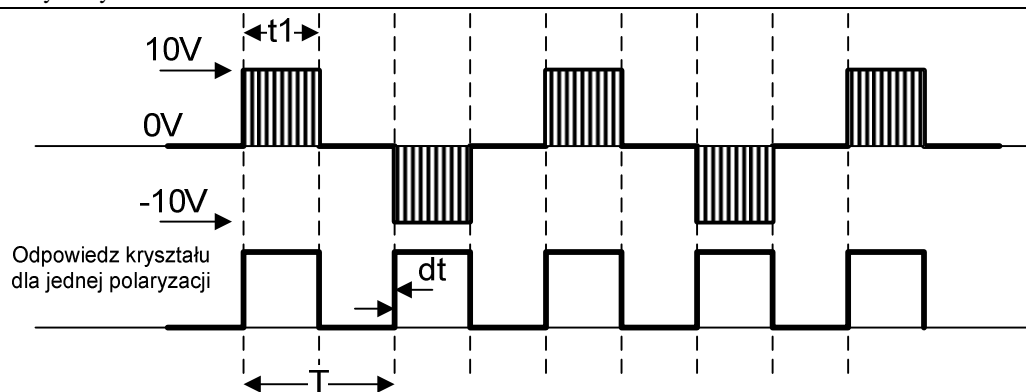
1. **FELIX-015-000** (X -  $-11^\circ\text{C}$  - SmC\* -  $71^\circ\text{C}$  – SmA -  $83^\circ\text{C}$  - N\* -  $86^\circ\text{C}$  – I)
2. **CS-2005**, Chisso Corp. (Cr -  $-19^\circ\text{C}$  – SmC\* -  $65^\circ\text{C}$  - N\* -  $73^\circ\text{C}$  – Iso )

Kryształ CS-2005 posiada znacznie większy temperaturowy zakres pracy jednak maksymalna temperatura jest niższa niż w przypadku kryształu FELIX. Dodatkowo kryształ CS-2005 przechodzi bezpośrednio z fazy nematycznej (N\*) do fazy smektycznej SmC\* z pominięciem, wykorzystywanej procesie ustawiania kryształu zgodnie z osią podkładu fazy SmA\*, co może mieć wpływ na proces ustawiania kryształu w komórce i może prowadzić do niestabilnej pracy pętli stabilizacji częstotliwości lasera

Oprócz typu użytego kryształu (lub mieszaniny kryształów) istotnym parametrem charakteryzującym dany ciekły kryształ są czasy przełączania pod wpływem przyłożonego pola elektrycznego. Wyniki pomiarów parametrów czasowych komórek ciekłokrystalicznych zostały przedstawione w **Rozdziale 4**.

Ciekły kryształ nie może być sterowany stałym polem elektrycznym, ze względu na rozpad cząsteczek kryształu. Częstotliwość sygnału sterującego zawiera się pomiędzy pojedynczymi Hz (dla komórek nematycznych) a pojedynczymi kHz (dla komórek ferroelektrycznych). Kontrast komórek ferroelektrycznych jest nawet kilka razy mniejszy niż komórek nematycznych, jednak duża częstotliwość sygnału taktowania, jakim można je sterować, powoduje, że nadają się one idealnie do układów stabilizacji lasera gdzie porównywana jest amplituda dwóch modów o przeciwnych polaryzacjach (Rozdział 2, Rozdział 4).

Komórki ciekłokrystaliczne nematyczne, ze względu na bardzo duży kontrast, nadają się, natomiast bardzo dobrze do wyboru analizowanej polaryzacji wiązki w proponowanym przez autora układzie detekcji położenia wiązki (**Rozdział 4**).



**Rys.3.3.6. Przykładowy przebieg sterujący komórką z kryształem nematycznym.  $T=10ms$ ,  $dt \approx 0,25ms$ ,  $t1 \approx 5ms$**

Na rysunku **Rys.3.3.6** przedstawiono przykładowy przebieg sterujący dla komórki z kryształem nematycznym. Ponieważ sygnał sterujący ma bardzo niską częstotliwość (rzędu kilkudziesięciu Hz), każdy półokres, w którym kryształ jest włączony (przyłożone jest pole elektryczne) musi być dodatkowo modulowany sygnałem o dużej częstotliwości (rzędu kilku kHz; ze względu na wspomniany rozpad cząsteczek kryształu pod wpływem składowej stałej w sygnale sterującym) w celu zabezpieczenia kryształu przed uszkodzeniem.

Komórki z kryształem ferroelektrycznym, ze względu na częstotliwość sygnału sterującego rzędu 1-1,5kHz, nie wymagają dodatkowego sygnału modulującego.

Sposób doboru komórki ciekłokrystalicznej został przedstawiony w **Rozdziale 4**.

**Literatura**

- [3.01] Żmija, Zieliński, Parka, Nowinowski-Kruszelnicki, „*Displeje ciekłokrystaliczne*”, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1993.
- [3.02] Gayna A., „*Liquid crystal application and physic*”
- [3.03] Reinitzer F., „*Zur Kenntnis des Cholesterins*”, *Monatsh. Chem.* 9, pp. 421, 1888.
- [3.04] Lehmann O., „*Fließende Kristalle*”, *Z. Physik. Chem.* 4, pp. 462, 1889.
- [3.05a] Demus D. et al., „*Handbook of liquid crystals, Vol. 1, Fundamentals*”, Wiley-VCH, Weinheim, 1998
- [3.05b] Demus D. et al., „*Handbook of liquid crystals, Vol. 2A, Low Molecular Weight Liquid Crystals I*”, Wiley-VCH, Weinheim, 1998
- [3.05c] Demus D. et al., „*Handbook of liquid crystals, Vol. 2B, Low Molecular Weight Liquid Crystals II*”, Wiley-VCH, Weinheim, 1998
- [3.06] Bahadur B., „*Liquid Crystals – Applications and Uses*”, World Scientific Publishing, Ontario, 1995.
- [3.07] Pochi Y., „*Optics of liquid crystal displays*”, John Wiley & Sons, New York, 1999
- [3.08] De Gennes P. G., Prost J., „*The Physics of Liquid Crystals*”, Oxford University Press, USA, 1995
- [3.09] G. Budzyń. „*Optokomunikacyjna stabilizacja lasera dwudomowego*”, raport nr I28/06/P-002, Politechnika Wrocławska, 2006.
- [3.10] Gray G. W., Goodby J. W., „*Smectic Liquid Crystals*”, Leonard Hill, London, 1984.
- [3.11] „Introduction to Liquid Crystals”,  
<http://plc.cwru.edu/tutorial/enhanced/files/textbook.htm> , 22.09.2007.
- [3.12] Dudzik G., „*Układ pomiaru położenia wiązki laserowej*”, Praca dyplomowa, Politechnika Wrocławska, Wydział Elektroniki, 2005
- [3.13] A. Murawski, V. Konovalov, S. Yakovenko, T. Matuszczyk, M. Matuszczyk, S. T. Lagerwall, A. D' Alessandro, F. Campoli, P. Maltese, J. Rzepka, J. Pieńkowski, S. Sambor, Y. Machehin, „*SSFLC Polarization Switch for Zeeman Laser Stabilization Loop*”, 1999 OPA,
- [3.14] S.S. Choi, Hanm-shi, „*Ferroelectric liquid crystal display and fabricating method thereof*”, US Patent 6897937, 24.05.2005
- [3.15] L.A. Beresnev, N.I. Chernova, V.G. Chigrinov, D.I. Dargachev, A.V. Ivashchenko, M.V. Loseva, B.I. Ostrovsy, A.Z. Rabinovich, E.P. Pozhidaev, M. Schadt, V.V. Titov, „*Ferroelectric liquid crystal cell*”, US Patent 5770109, 23.06.1998
- [3.16] H. Furue, H. Yokovama, „*Smectic liquid crystal device and proces for producing the same*”, US Patent 2007/0114490 A1, 2007
- [3.17] P. Patel, D. Chu, J.L. West, S. Kumar, „*Bistable Switching in polymer-Dispersed Ferroelectric SmC\* Displays*”, Uniwersytet Stanowy w Kent
- [3.18] G.J. Lee, J.J. Lee, G. Lee, S.J. Kim, U.J. Hwang, „*Liquid Crystal Alignment by Surface Relief Grating-Patterned Silica Glass and Azimuthal Anchoring Energy*”, Journal of the Korean Physical Society, Vol. 45, No. 1, July 2004, pp. 71-74,
- [3.19] Goossens W.J.A., „*A molecular theory of the cholesteric phase and of the twisting power of optically active molecules in a nematic liquid crystal*”, *Molecular Crystals Liquid Crystals*, 12, pp. 237-244, 1971
- [3.20] Wulf A., „*Helical pitch in mixtures of cholesteric liquid crystals*”, *Journal of Chemical Physics*, 60, pp. 3994-3998, 1974
- [3.21] Sackmann H., „*Smectic liquid crystals. A historical review*”, *Liquid Crystals*, No. 5, pp. 43, 1989
- [3.22] Cotter M. A., „*Consistency of mean field theories of nematic liquid crystals*”, *Molecular Crystals Liquid Crystals*, vol. 39, pp. 173-181, 1977
- [3.23] Walba D.M., „*Ferroelectric liquid crystals. A unique state of matter*”, *Advances in the Synthesis and Reactivity of Solids*, JAI Press Ltd., Vol. 1, pp. 173-235, 1991

- [3.24] Nowicki R., Skrypt do wykładu z “Teorii *Pola Elektromagnetycznego*” dla studentów Wydziału Elektroniki Politechniki Wrocławskiej
- [3.25] Karta katalogowa ciekłego kryształu: CS-2005, Chisso Corporation, Tokio
- [3.26] „Ciekły kryształ”, [http://pl.wikipedia.org/wiki/Ciek%C5%82y\\_kryszta%C5%82](http://pl.wikipedia.org/wiki/Ciek%C5%82y_kryszta%C5%82), 22.09.2007
- [3.27] Clark N.A., Lagerwall S.T., “*Sub-millisecond bistable electro-optic switching in liquid crystals*”, *Applied Physics Letters*, Vol. 36, No. 11, June 1980
- [3.28] Toriyama K., Dunmur D.A., Hunt S.E., “*Transverse dipole association and negative dielectric anisotropy of nematic liquid crystals*”, *Liquid Crystals*, vol. 5, pp. 1001 - 1009, 1988
- [3.29] Clark N.A., Rieker T.P., “*Smectic-C `chevron', a planar liquid-crystal defect: implications for the surface-stabilized ferroelectric liquid-crystal geometry*”, *Physical Review A*, vol. 37, pp. 1053 - 1056, Feb. 1988
- [3.30] Watson P., Bos P.J., Pirs J., “*Effects of Surface Topography on Formation of defects in SmC\* devices explained using alternative chevron description*”, *Physical Review E*, vol. 56, p. 4, 1997
- [3.31] M.Koden M, et al, “*Ferroelectric liquid crystal display*”, *Sharp Technical Journal*, vol. 69, pp. 47-50, Dec. 1997
- [3.32] Karta katalogowa ciekłego kryształu: FELIX-015-000, Hoechst Aktiengesellschaft, Frankfurt CS-2005
- [3.33] Roy S.S., Majumder T.P., Roy S.K., “*Effect of spontaneous polarization on SmC\*-SmA\* phase transition temperature and the thickness dependence of the spontaneous polarization of ferroelectric liquid crystal*”, *Liquid Crystals*, vol. 25, no. 1, pp. 59-62, 1998

# 4

## Interferometr z komórką ciekłokrystaliczną do dokładnych pomiarów przestrzennych

### 4.1. WPROWADZENIE

Rosnące potrzeby klientów odnośnie produktu końcowego zwiększają nacisk na jakość produkcji i wymagania stawiane maszynie obróbczej. Jednocześnie zwiększana jest prędkość samej produkcji przez integrację procesów pomiarowych z procesem obróbczym lub modyfikację (przyspieszenie) procedury oceny maszyny obróbczej lub produktu końcowego.

W rozdziale przedstawiono autorski prototyp interferometru laserowego wykorzystujący w swojej budowie laser He-Ne semi-dwumodowy o długości generowanej fali 632,8nm, stabilizowany w oparciu o równowagę dwóch rozszczepionych modów zeemanowskich (*Rozdział.2.3.2*). Interferometr jest przeznaczony do zastosowania w układzie pomiarowym maszyny współrzędnościowej, lub do pomiarów prostoliniowości maszyny pomiarowej lub obróbczej.

Integracja układu pomiaru położenia wiązki laserowej pozwoliła na jednoczesny interferometryczny pomiar przemieszczenia w osi głównej (równoległej do wiązki laserowej) w zakresie do 30 metrów oraz analogowy pomiar przemieszczenia w kolejnych dwóch osiach, prostopadłych do osi wiązki laserowej, w zakresie  $\pm 1\text{mm}$ , co pozwala na kilkunastokrotne skrócenie czasu potrzebnego do wykonania pomiaru błędów maszyny lub błędów elementu (produktu) końcowego.

W rozdziale przedstawiono koncepcję układu pomiarowego zapewniającego podstawową rozdzielczość pomiarową 100nm i dokładność rzędu  $\pm 1,5\mu\text{m}/\text{m}/^\circ\text{C}$  (pomiar interferometryczny w osi X, równoległej do wiązki laserowej z możliwością rozszerzenia rozdzielczości do 10nm) oraz rozdzielczości 1,5 $\mu\text{m}$  i dokładności  $\pm 10\mu\text{m}/\text{m}$  (w zakresie  $\pm 1\text{mm}$ ) dla osi Y, Z (prostopadłych do wiązki laserowej) w pomiarze analogowym z zastosowaniem komórki ciekłokrystalicznej i detektora czteropolowego lub PSD (Position Sensor Detector).

Zastosowanie zespołu czujników temperatury mierzonego obiektu oraz procedury kompensacji długości fali lasera pozwala na pomiary obiektów o temperaturze mieszczącej się w bardzo szerokim zakresie. Umożliwia to zestawienie układu pomiarowego i szybkie rozpoznanie wady maszyny obróbczej, co pozwala na uniknięcie znacznych strat produkcyjnych.

Z prac [3.09, 2.15-2.16] wynika, że dwumowowa metoda stabilizacji częstotliwości lasera He-Ne pozwala uzyskać stabilność częstotliwości wystarczającą do zastosowań przemysłowych, przy nieskomplikowanym układzie stabilizacji. Dodatkowo, stabilizacja mocy spolaryzowanych wiązek laserowych (obu modów) jest istotnym elementem

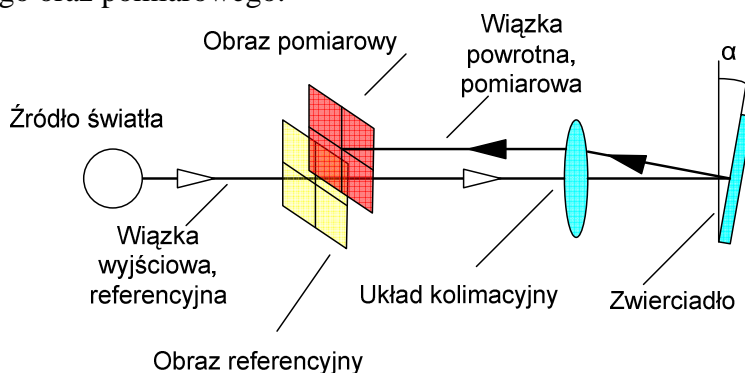
nowatorskiego układu detekcji pozycji wiązki laserowej i pomiaru przestrzennego (**Rozdziały: 4.1, 4.2**).

W autorskim prototypie zastosowano układ z heterodynową detekcją sygnału pomiarowego, ponieważ z w.w. prac wynika, że układ ten jest szczególnie mało wrażliwy na zakłócenia mocy wiązki, nadaje się więc idealnie do zastosowań przemysłowych.

## 4.2. IDEA POMIARU PRZESTRZENNEGO.

Jednym z najprostszych systemów pomiarowych stosowanych w pomiarach błędów maszyn obróbczych są, oprócz przymiarów, różnego typu układy autokolimatorów.

Autokolimator jest to optyczny przyrząd pomiarowy, którego działanie polega na wykorzystaniu zjawiska kolimacji rozbieżnej wiązki światła oraz porównaniu pozycji obrazu referencyjnego oraz pomiarowego.



**Rys.4.1.1. Schemat i zasada działania autokolimatora [4.03].**

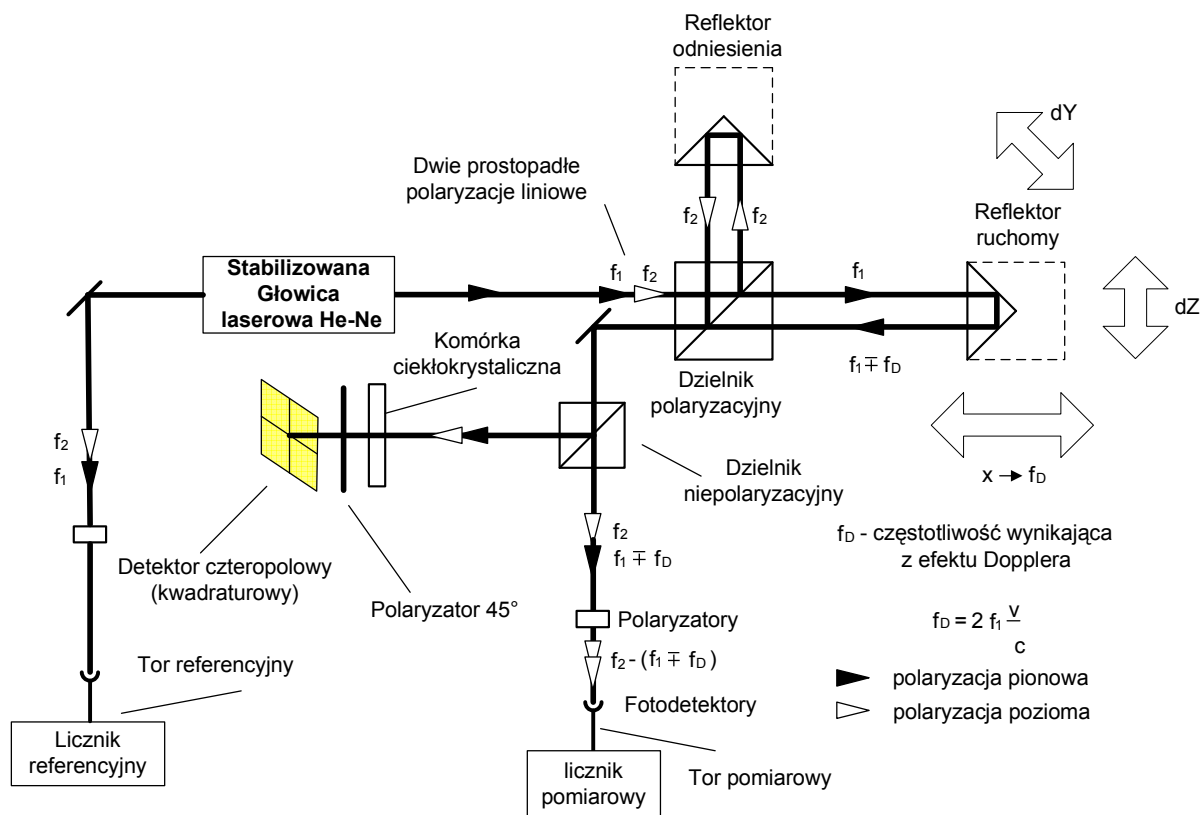
W układzie optycznym autokolimatora obraz przedmiotu powstaje przez odbicie promieni świetlnych od płaszczyzny zwierciadła umieszczonego za układem kolimacyjnym. Odbity od przedmiotu obraz powraca do przyrządu i może być obserwowany przez np.: okular w postaci dwóch krzyży (odniesienia i pomiarowego). Rozbieżność krzyży jest zależna od prostopadłości ściany przedmiotu do osi optycznej autokolimatora (kąta  $\alpha$ , **Rys.4.1.1**).

Autokolimatory nadają się do pomiaru prostopadłości różnych powierzchni, porównywania prostopadłości dwóch powierzchni, pomiarów dokładności wykonania pryzmatów szklanych oraz pomiarów przesunięcia powierzchni lub osi (niewspółosiowość).

Rozdzielczość typowych dobrych autokolimatorów wynosi  $\pm 0.1$  arc-sekundy a zakres pomiarowy:  $\pm 1,200$  arc-sekundy [4.03]. Stosując metodę uchyleń kątowych można za pomocą autokolimatora mierzyć również prostoliniowość i płaskość powierzchni, jednak pomiar taki jest trudniejszy oraz bardziej czasochłonny niż pomiar interferometrem laserowym.

W pracy autor połączył dwie techniki pomiarowe: pomiar autokolimatorem oraz pomiar za pomocą detektorów pozycji [**Rozdział 1.2.6**], tworząc system pomiarowy wykonujący pomiar przemieszczenia jednocześnie w trzech osiach. W proponowanym rozwiązaniu autor mierzy bezpośrednią wartość przesunięcia obrazu referencyjnego oraz obrazu pomiarowego utworzonego na detektorze czteropolowym przez dwie liniowe, wzajemnie prostopadłe polaryzacje liniowe wiązki światła laserowego. Ponieważ uzyskane obrazy: referencyjny i pomiarowy, posiadają prostopadłe do siebie polaryzacje, możliwe jest ich przełączanie i

niezależna detekcja pozycji na detektorze. Różnica wartości uzyskanych z pomiarów pozwala na wyznaczenie względnej wartości przesunięcia [Rys.4.1.3].

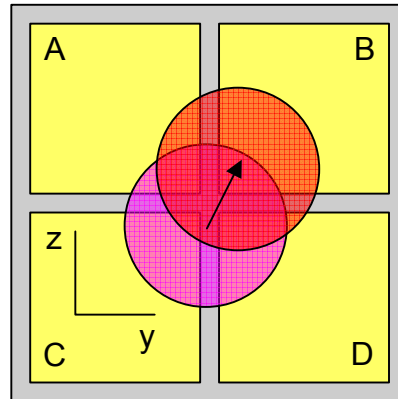


**Rys.4.1.2. Schemat ideowy interferometrycznego układu pomiarowego w trzech osiach z wykorzystaniem heterodynowego interferometru laserowego oraz układu detekcji pozycji wiązki (detektor czteropolowy plus komórka ciekłokrystaliczna).**

Pomiar w osi X jest realizowany w standardowym układzie interferometru heterodynowego [Rozdział 1.2]. Zakres pomiarowy zależy jest, od jakości układu kolimatora i typowo wynosi 20-30 metrów. Dokładność heterodynowego pomiaru interferometrycznego wynosi  $\pm 1,5 \mu\text{m}/\text{m}/^\circ\text{C}$  i jest zależna głównie od czynników środowiskowych i metod jej kompensacji (Rozdział.1.2, Rozdział 5) Istotnym usprawnieniem jest dodanie układu detekcji pozycji wiązki.

Układ detekcji pozycji wiązki składa się z detektora czteropolowego oraz komórki ciekłokrystalicznej, umożliwiającej analizę wiązki laserowej o danej polaryzacji. Obraz referencyjny pozycji tworzy wiązka laserowa o polaryzacji pionowej odbijająca się od retropryzmatu (reflektora) odniesienia. Przesunięcie retropryzmatu pomiarowego w osiach Y lub/i Z powoduje przesunięcie w danej osi wiązki o polaryzacji poziomej i jej obrazu na detektorze czteropolowym. Wybór wiązki o polaryzacji pionowej lub poziomej dokonywany jest za pomocą ferroelektrycznej lub nematycznej komórki ciekłokrystalicznej. Różnica pozycji wiązek o obu polaryzacjach umożliwia określenie względnego przesunięcia w osiach Y i Z.





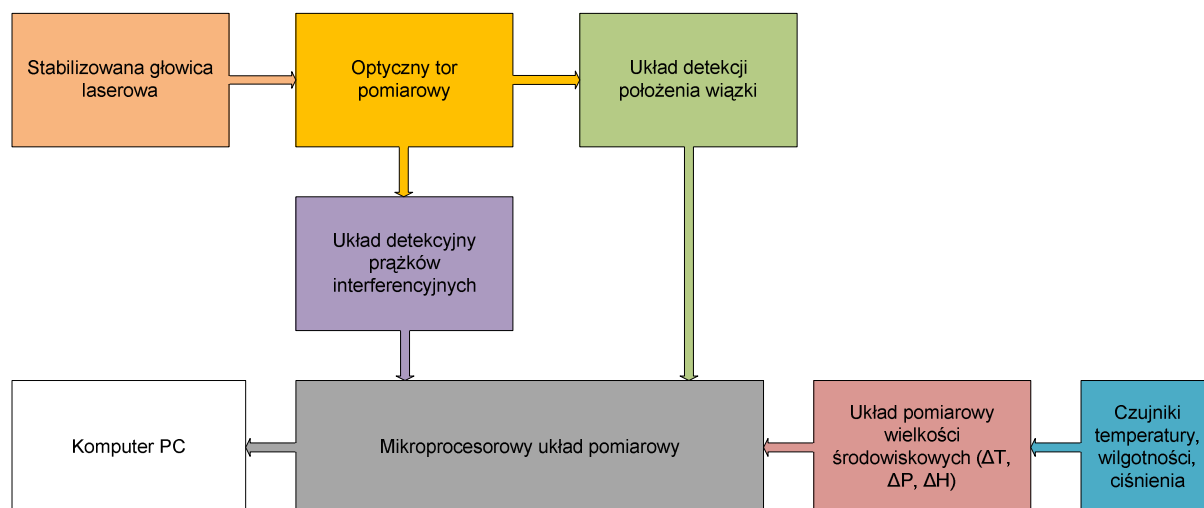
*Rys.4.1.3. Schemat ideowy działania pomiaru przesunięcia wiązki laserowej. Koła reprezentują obrazy dwóch polaryzacji liniowych na detektorze czteropolowym. Strzałka oznacza wektor względnego przesunięcia.*

### **4.3 INTERFEROMETR LASEROWY HE-NE O DŁUGOŚCI FALI 632,8nm Z KOMÓRKĄ CIEKŁOKRYSTALICZNĄ ORAZ DETEKTOREM KWADRANTOWYM DO DOKŁADNYCH POMIARÓW PRZESTRZENNICH.**

Na rysunku *Rys.4.2.1* został przedstawiony schemat blokowy systemu pomiarowego do dokładnych pomiarów przestrzennych. W porównaniu do klasycznego systemu pomiarowego, układ został rozszerzony o nowatorską metodę pomiaru położenia wiązki laserowej. Została wykorzystana ferroelektryczna komórka ciekłokrystaliczna oraz detektor czteropolowy i zmodyfikowany układ stabilizacji lasera He-Ne [3.09] zawierający ferroelektryczną komórkę ze stabilizowanym powierzchniowo kryształem ferroelektrycznym SSFLC o charakterze przełączanej płytki ćwierćfalowej.

Dane pomiarowe zbierane przez system mikroprocesorowy przesyłane są do komputera PC, gdzie możliwa jest ich analiza, wyliczenie błędów pomiarowych i generacja raportów z pomiaru.

System mikroprocesorowy mierzy również wielkości środowiskowe, takie jak: temperatura, wilgotność oraz ciśnienie powietrza oraz temperaturę maszyny pomiarowej lub temperaturę wykonanego przedmiotu. Zebrane w ten sposób dane umożliwiają kompensację tych wielkości i zwiększenie dokładności pomiaru.



**Rys.4.2.1. Schemat blokowy prototypowego systemu pomiarowego z interferometrem laserowym He-Ne o długości fali 632,8nm, z komórką ciekłokrystaliczną oraz detektorem czteropolowym do dokładnych pomiarów przestrzennych.**

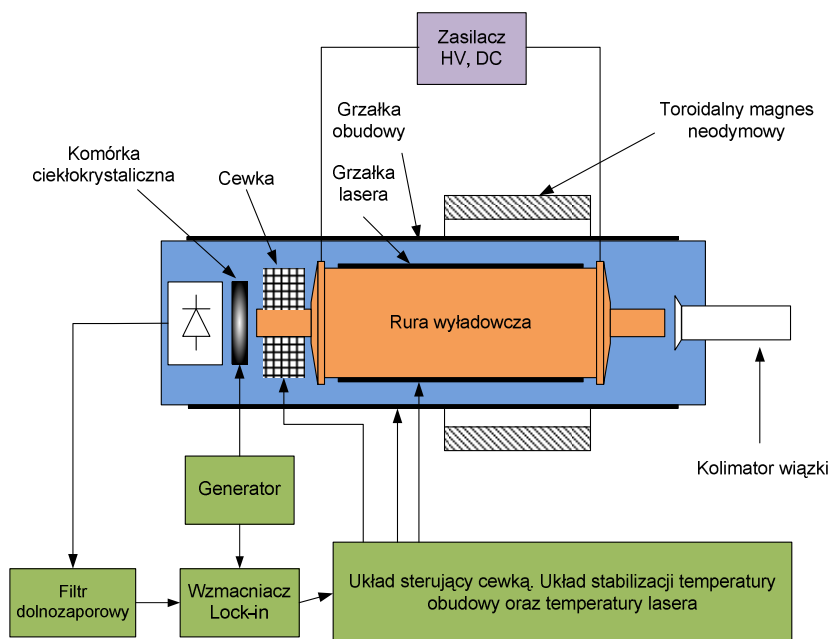
Stabilizowaną głowicę laserową zbudowano wykorzystując komercyjnie dostępny laser He-Ne o symbolu LGR7655S produkcji firmy Lasos GmbH (Niemcy), generujący falę o długości 632,8nm.

Laser LGR7655S generuje na przemian jeden lub dwa, wzajemnie prostopadłe spolaryzowane mody (Rys.2.3.6). W pracy wykorzystano pracę jednomodową lasera oraz rozszczenie tego modu w polu magnetycznym [2.15-2.16, 2.22], (Rys.2.3.8).

Zdjęcie rury laserowej LGR7655S zostało przedstawione na rysunku Rys.4.2.2, a jej podstawowe parametry w tabeli Tab.4.2.1.



**Rys.4.2.2. Zdjęcie lasera He-Ne LGR7655S produkcji firmy Lasos GmbH (Niemcy). Anoda lasera zaizolowana taśmą izolacyjną wysokonapięciową oraz teflonowym „kubkiem”. Przy anodzie widoczne rezystory balastowe.**



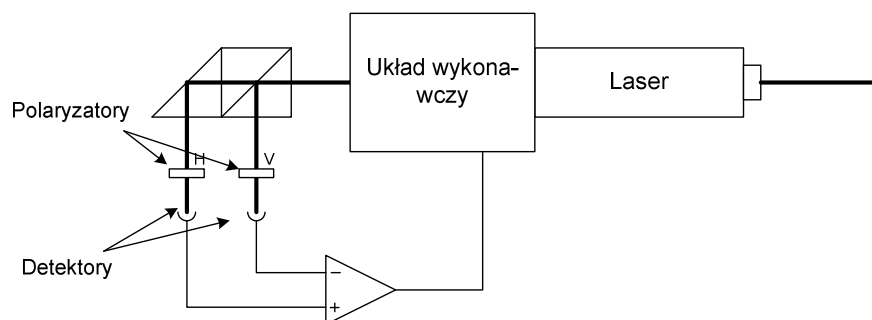
**Rys. 4.2.3 Schemat blokowy stabilizowanego lasera z rozszczepieniem zeemanowskim, stabilizowanym na równowagę mocy dwóch składowych wiązki laserowej.**

Parametr	Wartość	Jednostka
Długość fali	632.8	nm
Moc wyjściowa	$\approx 1.0$	mW
Długoterminowy dryft mocy	$\leq \pm 10$	%
Czystość modu TEM <sub>00</sub>	$> 95$	%
Średnica wiązki ( $1/e^2$ )	$0.49 \pm 0.05$	mm
Rozbieżność wiązki	$\leq 2.0$	mrad
Polaryzacja	przypadkowa <sup>1</sup>	
Szum, rms, 30Hz ... 10MHz	$\leq 1$	%
Odstęp międzymodowy $c/2L$	1085	MHz
Napięcie pracy	$1050 \pm 100$	V
Prąd pracy	3.5 (do 4,1 przyp. autora)	mA
Zakres temperatur pracy	0...80	°C
Długość lasera pomiędzy zwierciadłami	$\sim 140,3$	mm

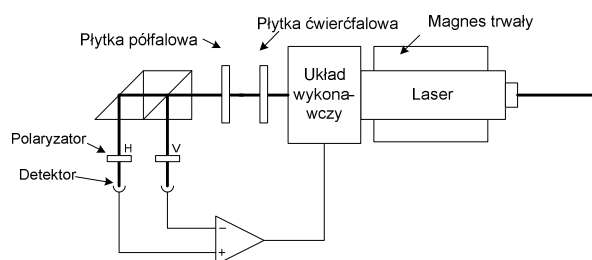
**Tab.4.2.1. Podstawowe parametry rury laserowej LGR7655S [401].**

W typowym układzie stabilizacji na równowagę dwóch składowych promieniowania lasera, wykorzystywana jest polaryzacyjna kostka światłdzieląca (lub niepolaryzacyjna z dwoma dodatkowymi polaryzatorami; *Rysunek 4.2.4.*)

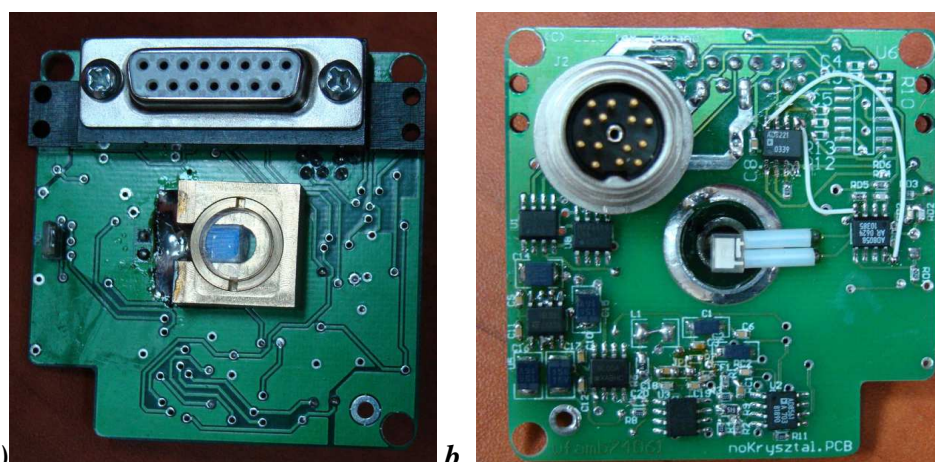
<sup>1</sup> Podczas konstrukcji kilku wersji głowic pomiarowych z wykorzystaniem różnych egzemplarzy laserów typu LGR7655S, zauważono, że laser posiada wymuszoną polaryzację liniową, mimo, iż nie posiada okienek Brewstera [309]. Wynika to prawdopodobnie z charakterystycznej konstrukcji rury wyładowczej lasera.



**Rys. 4.2.4. Schemat blokowy stabilizowanego lasera dwumodowego, pracującego w oparciu o równowagę dwóch składowych promieniowania.**



**Rys. 4.2.5.1. Schemat blokowy stabilizowanego lasera jednodomowego, pracującego w oparciu o równowagę dwóch składowych promieniowania rozszczepionego Zeemanowsko modu.**



**Rys. 4.2.5.2. Zdjęcia układu porównywania dwóch składowych promieniowania rozszczepionego Zeemanowsko modu dla układu stabilizacji pracującego w oparciu o równowagę mocy. Realizacja części układu ze schematu blokowego Rys.4.2.5.1.**

Do uzyskania sygnału błędów stabilizacji wykorzystywane są dwa detektory i wzmacniacz pomiarowy (Rys.4.2.5.1-2a,b). Wykorzystano kostkę nie polaryzacyjną co dodatkowo utrudniło kalibrację układu stabilizacji. W takim układzie moc na obu detektorach bardzo zależy od ustawień polaryzatorów. Bardzo prawdopodobne jest takie ustawienie polaryzatorów gdzie stabilizacja nie będzie zrealizowana na równowagę mocy obu modów ale dowolne inne proporcje tych mocy. Metoda ta posiada kolejną wadę, wynikającą z korzystania z dwóch torów detekcyjnych dla dwóch polaryzacji, co może powodować zmiany proporcji mierzonych mocy polaryzacji wraz ze starzeniem się układu oraz wstępny brak symetrii w obu torach pomiarowych. Dodatkowo, w przypadku lasera jednodomowego w polu magnetycznym, wymagana jest dodatkowa płytką ćwierćfalową do zamiany polaryzacji kołowej na liniową wiązki światła wychodzącej z lasera oraz płytką półfalową do orientacji obu polaryzacji, wymaganej przez detektory (Rys.4.2.5.2a).

W rozwiązaniach zaproponowanych w pracach [1.31], [1.38] oraz [3.09] do selekcji modu o odpowiedniej polaryzacji i stabilizacji lasera wykorzystana jest komórka ciekłokrystaliczna SSFLC o charakterze płytki półfalowej. W rozwiązaniu prezentowanym w pracy jest to komórka o charakterze płytki ćwierćfalowej (równanie 3.3.8), (Rys.3.3.5, Rys.4.2.3). Tak skonstruowana komórka zamienia polaryzację kołową wiązki na liniową oraz w połączeniu z odpowiednio zorientowanym polaryzatorem, tworzy tor optyczny, przepuszczający na detektor, w takt sygnału zegarowego, wiązkę światła o polaryzacji poziomej lub pionowej.

Układ detekcji na potrzeby stabilizacji lasera He-Ne ograniczony jest w takim przypadku do odpowiedniej komórki ciekłokrystalicznej oraz jednego detektora.

Istotnymi zaletami rozwiązania z komórką ciekłokrystaliczną SSFLC w układzie stabilizacji lasera w porównaniu do klasycznej metody z kostką światłodziącą [3.09] są:

- ✓ uproszczenie konstrukcji lasera dzięki eliminacji jednego detektora oraz zespołu optycznego z kostkami dzielącymi, polaryzatorami, ćwierćfalówką i półfalówką,
- ✓ zwiększenie stosunku sygnału do szumu w pętli stabilizacji dzięki zastosowaniu detekcji synchronicznej,
- ✓ zwiększenie stabilności długoterminowej przez eliminację jednego toru detekcyjnego. Dzięki temu zostały wyeliminowane zmiany parametrów torów detekcyjnych względem siebie wraz ze zmianami temperatury i z upływem czasu.

Głównym elementem układu dyskryminacyjnego w układzie stabilizacji wykonanej głowicy jest przełącznik optyczny (komórka ciekłokrystaliczna) umożliwiający wybór wiązki o polaryzacji poziomej lub pionowej, w zależności od znaku podanego na niego napięcia.

Komórka ciekłokrystaliczna, zawierająca kryształ ferroelektryczny stabilizowany powierzchniowo SSFLC, wraz z polaryzatorem analizującym, nadają się bardzo dobrze do zastosowania jako wspomniany selektor polaryzacji do układu stabilizacji lasera He-Ne.

Przedstawione poniżej badania komórek ciekłokrystalicznych zostały wykonane we współpracy z dr.A.Murawskim z Instytutu Fizyki Stosowanej w Mińsku (Białoruś).

Rodzaj zastosowanej w komórce SSFLC mieszaniny ciekłych kryształów ferroelektrycznych ma zasadniczy wpływ na działanie takiej komórki, głównie dlatego, że parametry ciekłych kryształów bardzo zależą od temperatury (Rozdział 3). W tabeli Tab.4.2.3 przedstawiono parametry kilku (rozważanych z punktu widzenia zastosowania w przełączniku optycznym) mieszanin ciekłych kryształów [3.09].

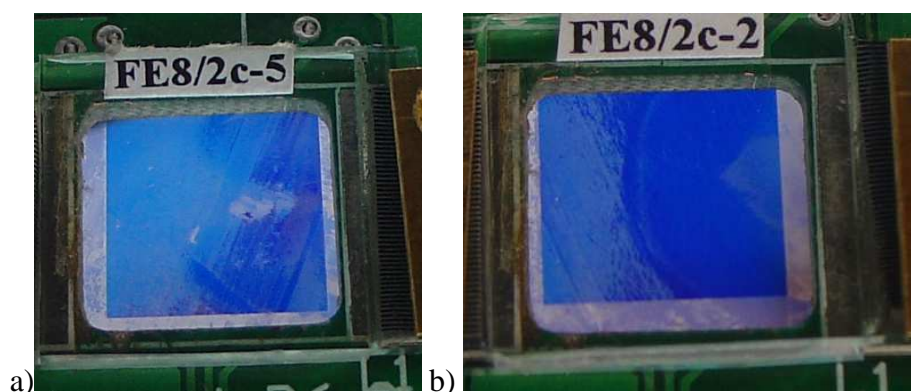
Lp.	FLC	$S_C^* \rightarrow S_A$ [°C]	$\theta$ [deg]	$P_s$ [nC/cm <sup>2</sup> ]	$\Delta n$ (@ 20°C)
4	DOF0003	58 (50.4 $S_A \rightarrow S_C^*$ )	18.8@25°C	11@25°C	-
7	CS2005	65	21.5@25°C	-72.7@25°C	0.18@25°C
8	CS3000	66	26@25°C	17.5@25°C	0.16@25°C
9	ZLI4237 000	63	25@20°C 23@30°C 18@50°C	-7@20°C -5@30°C -3@50°C	0.13
10	FELIX-015-000	71	24@20°C 23.5@30°C 22@50°C	10@20°C 7.5@30°C 6.5@50°C	0.15

Tab. 4.2.3. Porównanie parametrów mieszanin kryształów ferroelektrycznych FLC [3.09], [3.32], [3.25].

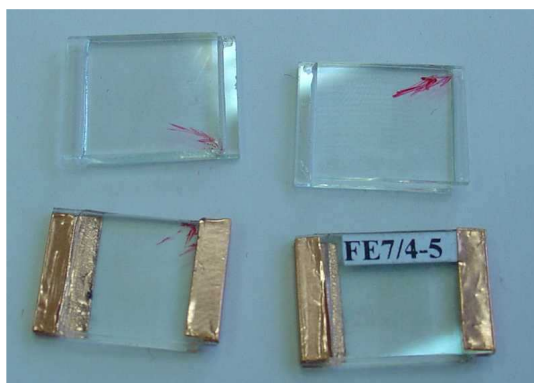
Ponieważ laser He-Ne w układzie zastosowanej stabilizacji jest wygrzewany do temperatury kilkunastu stopni Celsjusza powyżej temperatury otoczenia i jednocześnie system pomiarowy powinien pracować w dowolnych warunkach termicznych spotykanych w zakładach przemysłowych (w różnych krajach), ważne jest, aby zastosowana mieszanina kryształów zachowywała wymagane parametry (tj. nie przechodzić z fazy SmC\* do innej) w całym wymaganym zakresie temperatur. Dodatkowo przełącznik optyczny nadający się do zastosowania w głowicy laserowej powinien charakteryzować się wystarczającym kontrastem, czyli kątem pochylenia molekuł  $\theta$  powinien wynosić  $\pm 22.5^\circ$  w zakresie temperatur pracy głowicy (40-50°C).

Wszystkie przedstawione w tabeli **Tab.4.2.3** mieszaniny kryształów spełniają dwa podstawowe warunki: temperatura przejścia fazowego ze stanu SmC\* do SmA wynosi około 60°C oraz kąt pochylenia molekuł  $k$  osiąga w pewnym zakresie temperatur (różnym dla różnych kryształów) optymalną wartość 22.5°. Głównie ze względu na dostępność, a także ze względu na kąt  $\theta$  bliski wartości optymalnej w temperaturze 40°C, do budowy prototypu wybrano komórki z kryształem FELIX-015-000.

Wykonanie dobrze działającej komórki SSFLC wymaga wielu zabiegów technologicznych oraz dużej czystości i dokładności procesu produkcyjnego. Jedną z przyczyn wysokich wymagań jest fakt, iż natężenie pola elektrycznego między elektrodami sięga kilkuset kV/m. Drugą przyczyną jest wymaganie, aby rozkład natężenia wiązki laserowej nie został zdeformowany w całym układzie detekcji pozycji, ponieważ miałyby to wpływ na detekcję pozycji wiązki na detektorze czteropolowym. Przy detektorze PSD wiązka jest ogniskowana do punktu, więc możliwe są minimalne defekty, lecz nie takie duże jak na przykładach na **Rysunku.4.2.6**. W procesie produkcji powinno się dążyć do jednolitej struktury kryształu na całym obszarze komórki.

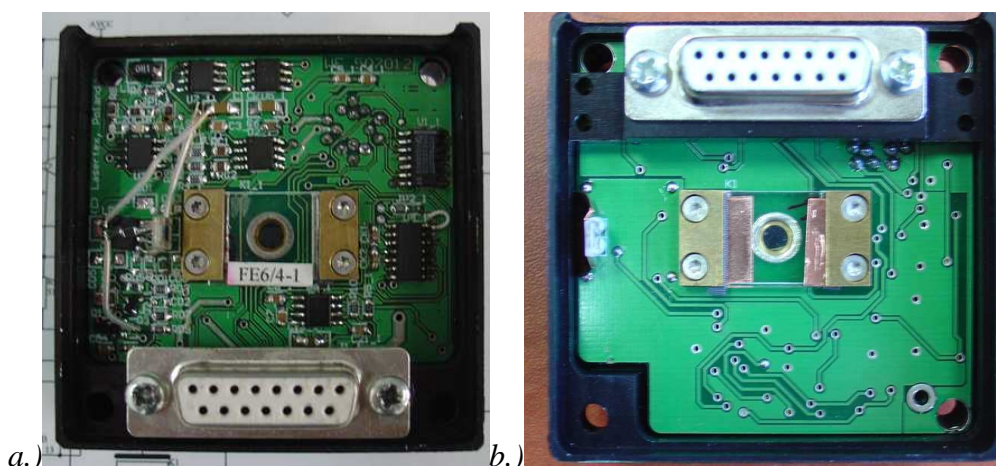


**Rys.4.2.6.** Przykłady ferroelektrycznych komórek ciekłokrystalicznych odrzuconych ze względu na skazy. Zdjęcia uzyskane w procesie analizy jakości i parametrów czasowych komórki.



**Rys.4.2.7. Przykłady ferroelektrycznych komórek ciekłokrystalicznych SSFLC wykorzystywanych w procesie stabilizacji laserowej głowicy interferometru..**

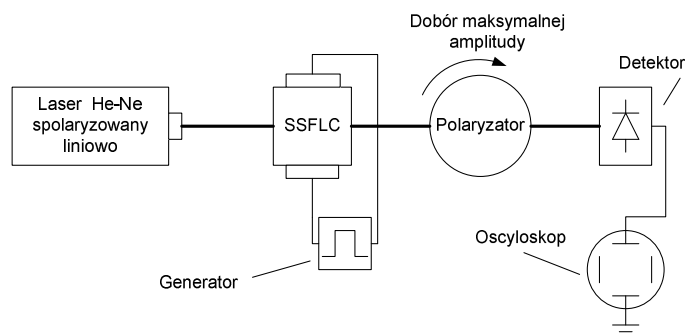
Na rysunkach *Rys.4.2.7*, *Rys.4.2.45* oraz w rozdziale 3.3.3 na rysunkach *Rys.3.3.3-3.3.4* przedstawione zostały zdjęcia oraz schematy komórki SSFLC (również używanej w autorskim prototypie). W procesie technologicznym, na dokładnie umytą i wysuszoną płytkę ze specjalnego szkła nakładane są optycznie przezroczyste elektrody. Po odpowiednim uformowaniu wzoru elektrod nanosi się materiał (tlenki krzemu lub materiały organiczne), służący do stworzenia warstw orientujących. Proces ten zwany jest *rubbingiem*. Warstwy orientujące mają postać rowków. Ich zadaniem jest rozwinięcie spiral ciekłych kryształów (**Rozdział 3**). Dodatkowo umieszcza się na płytkach odstępniki służące do określania grubości komórki (waha się ona zazwyczaj między 0,5-1,5 $\mu\text{m}$  dla komórek ferroelektrycznych i kilka  $\mu\text{m}$  dla nematycznych). Na tak przygotowane płytki szklane nanoszone na wewnętrzne kontakty i uszczelki. Następnie płytki są sklejane, a między nie wlewana jest mieszanina ciekłokrystaliczna. Należy zwrócić uwagę, iż obszar aktywny jest znacznie mniejszy od rozmiarów całej komórki. W przypadku komórek używanych do stabilizacji głowicy (*Rys.4.2.7*, *Rys.4.2.8*) obszar aktywny ma wymiar 5x5 mm, przy rozmiarach komórki 13x17 mm i grubości 2.2 mm. Przy komórkach wykorzystanych w układzie detekcji pozycji wiązki, aktywny obszar wynosi 10x10 mm przy minimalnie większych wymiarach całej komórki (*Rys.4.2.6*).



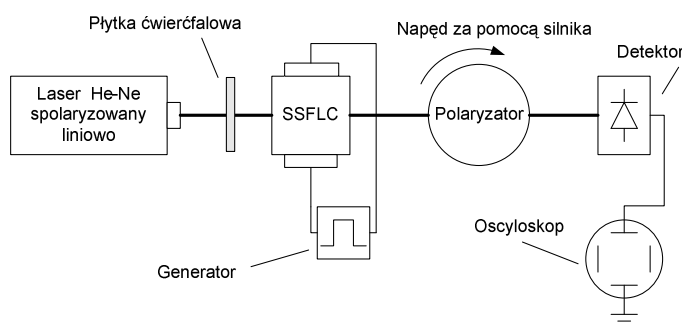
**Rys. 4.2.8. Komórka SSFLC używana do stabilizacji lasera w zaprojektowanej głowicy interferometru laserowego z układem generatora sterującego. Wiązka przechodzi przez środek komórki i pada na zespół polaryzatora i fotodetektora. Fotodetektor i polaryzator mogą być okracane wokół osi wiązki laserowej. a.)wersja pierwsza z układem detekcji referencyjnego sygnału pomiarowego „Zeemana” zbudowana na kaskodzie. b.) wersja przebudowana – kryształ utrzymuje swoją pozycję.**

Najważniejszymi parametrami przełączników optycznych są kontrast przełączania i szybkość reakcji na zmianę biegunowości napięcia sterującego.

Pomiary obu tych parametrów zostały wykonane w układach pokazanych na rysunku **Rys.4.2.9 - 4.2.10** dla kilkudziesięciu komórek ciekłokrystalicznych. Generator sterujący pracą kryształu posiadał regulację częstotliwości, natomiast polaryzator był umieszczony w uchwycie z napędem, co umożliwiało jego precyzyjny obrót i możliwość zadania rotacji.



**Rys.4.2.9. Układ do pomiaru parametrów komórek ciekłokrystalicznych pracujących w charakterze płytki półfalowej [3.09].**



**Rys.4.2.10. Układ do pomiaru parametrów komórek ciekłokrystalicznych pracujących w charakterze płytki ćwierćfalowej.**

Komórki zostały przebadane jak zachowują się w charakterze płytki półfalowej oraz ćwierćfalowej.

Pierwszą czynnością podczas badania charakteru półfalowego komórki, było takie ustawienie polaryzatora (bez komórki SSFLC), aby sygnał na oscyloskopie był minimalny. Następnie wstawiany był kryształ i włączany generator sterujący przełączaniem kryształu w komórce. Położenie polaryzatora było następnie dostrajane tak, by amplituda sygnału na oscyloskopie była maksymalna (**Rys. 4.2.11**).





**Rys.4.2.11. Przebieg sygnału na oscyloskopie w poprawnie ustawionym układzie pomiarowym Rys.4.2.9 [3.09]. Duża stromość zboczy przebiegu oraz duża amplituda uzyskanego sygnału świadczą o dobrym kontraście komórki ciekłokrystalicznej. Przedstawione przebiegi dla komórki charakterze płytki ćwierćfalowej oraz półfalowej.**

Lp.	Oznaczenie komórki	Amplituda [Vpp], badany charakter $\lambda/2$	Badany charakter $\lambda/4$ [Vpp]	Uwagi
1	CS1.36	0,75	0,55	długi czas przełączania
2	FE1/4-1	0,25		
3	FE2/4-1	0,3	1,2	
4	FE2/4-2	0,8	1,4	
5	CS1/2-6	0,55		długi czas przełączania
6	CS1/2-7	0,40		długi czas przełączania
7	FE5/2-5	3,40		
8	FE5/2-6	3,40		
9	FE6/4-3	2,00		
10	FE6/2-1	3,51	1,8	
11	FE6/2-8	3,31	1,6	
12	FE6/2-13	3,24		
13	FE7/2a-1	2,30		długi stan przejściowy
14	FE7/2b-1	2,50		bardzo długi czas przełączania
15	FE7/4-12	1,74	2,2	
16	FE2/4-4	0,6	1,7	
17	FE2/4-3	2,0	2,3	
18	CS1.7	0,4	0,08	
19	CS1.2	0,65	0,45	bardzo długi czas przełączania

**Tab. 4.2.1. Przykładowe wyniki badań komórek ciekłokrystalicznych [3.09].**

Symbol komórki oznacza typ użytej mieszanki (FE oznacza mieszaninę FELIX-015-000 produkcji Heochst, Niemcy, a CS mieszaninę CS3000 firmy Chisso, Japonia), numerze partii, przeznaczeniu (/2 oznacza komórkę o charakterze płytki półfalowej, a /4 ćwierćfalowej) oraz numerze porządkowym.

W przedstawionych wynikach zwracają uwagę dobry kontrast i powtarzalność serii FE5 i FE6 przeznaczonych do użytku jako płytki półfalowe. Kontrast komórek tych samych serii, ale przeznaczonych do pracy jako płytki ćwierćfalowe jest mniejszy, jednak wystarczający do układu stabilizacji lasera.

Temperatura rezonatora lasera He-Ne bardzo silnie wpływa na częstotliwość lasera (Rozdział 2) nawet wówczas, gdy zwierciadła rezonatora są umieszczone na materiale o małej rozszerzalności cieplnej. W układzie zastosowano więc aktywną stabilizację temperatury rury laserowej. Najprostszym sposobem jest podniesienie temperatury układu powyżej maksymalnej temperatury, jaką może osiągnąć sam laser w określonej temperaturze otoczenia. W prototypie zastosowano grzałkę w postaci miedzianego drutu nawiniętego na szklany korpus lasera He-Ne. W celu eliminacji wpływu impulsowego pola elektromagnetycznego, promieniowanego przez taki element na wartość współczynnika załamania ośrodka aktywnego lasera oraz/lub częstotliwość Zeemana, drut został nawinięty bifilarnie.



**Rys.4.2.12. Zdjęcie lasera He-Ne LGR7655S produkcji firmy Lasos GmbH. Na laserze nawinięta grzałka do stabilizacji temperatury lasera. W celu eliminacji pola elektromagnetycznego wytwarzanego przez grzałkę uzwojenie nawinięte jest bifilarnie.**

Tego typu układ stabilizacji zapewnia jedynie stabilność długoterminową układu. Szybkie zakłócenia w postaci drgań mechanicznych ( w tym akustycznych) nadal mogą pogarszać stabilność lasera. W celu ich eliminacji można zastosować szybkie przetworniki elektromechaniczne, takie jak piezoceramika.

Rozwiązanie to zostało jednak odrzucone, ponieważ wykorzystany laser LGR7655S posiada na obu końcach metalowe flansze (Rys.4.2.2 oraz Rys.4.2.12) o średnicach większych niż szklany korpus, przez co montaż piezoceramiki nie jest możliwy. Dodatkowo stos elementów piezoceramicznych zajmuje miejsce, które można by było wykorzystać do nawinięcia na nim grzałki lub umieszczenia magnesu trwałego.

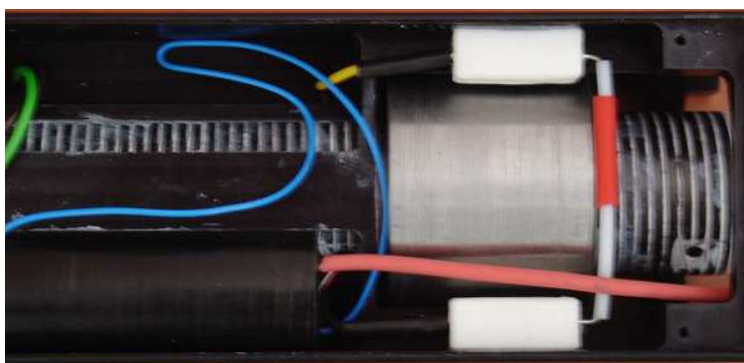
Do kompensacji szybkich zmian długości zdecydowano się na wykorzystanie efektu magnetostrykcyjnego.

Specjalnie skonstruowaną cewkę umieszczono w stalowym karkasie i umieszczono w pobliżu katody lasera.



**Rys.4.2.13. Zdjęcie cewki do układu stabilizacji lasera He-Ne, do magnetostrykcyjnej kompensacji szybkich zmian częstotliwości wynikających z zakłóceń mechanicznych rezonatora lasera (drań, wibracji mechanicznych).**

Aby rozszerzyć zakres temperatur pracy wykonanej prototypowej głowicy interferometru laserowego, rura laserowa z nawiniętą grzałką (element aktywnej stabilizacji temperatury lasera He-Ne, **Rys.4.2.12**) i cały układ elektroniczny stabilizacji zostały umieszczone w obudowie o stabilizowanej temperaturze (**Rys.4.2.14**).



**Rys.4.2.14. Zdjęcie obudowy lasera z grzałką obudowy nawiniętą bifilarnie. Widoczny magnes neodymowy ze zwoją magnetyczną oraz rezystory do wstępnego wygrzewania pomocniczego.**

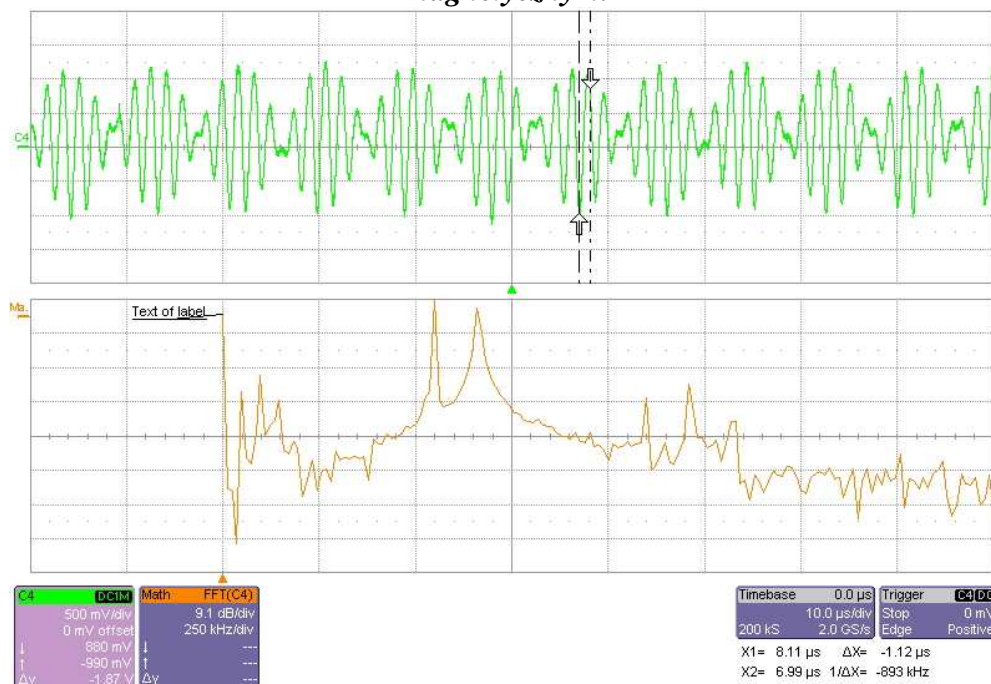
Do pomiaru temperatury lasera i aluminiowej obudowy wykorzystane zostały termistory NTC produkowane przez firmę Philips o oznaczeniu KTY82-210. Charakteryzują się one małymi wymiarami (obudowa SOT-23, **Rys.4.2.12**), dużą wrażliwością rezystancji na temperaturę oraz dobrą stabilnością długoterminową [4.02], [3.09]. Szczególnie ważna jest stabilność długoterminowa, gdyż ma ona bardzo istotny wpływ na odtwarzalność oraz długoterminową stabilność częstotliwości lasera He-Ne.

Laser stabilizowany w oparciu o równowagę rozszczepionego zeemanowsko modu musi być umieszczony we wzdluznym polu magnetycznym. Teoretyczne podstawy zjawiska zostały przedstawione w pracy [2.16] oraz w rozdziale drugim.

Do wytworzenia stałego pola magnetycznego wykorzystano toroidalny magnes neodymowy. W trakcie eksperymentów okazało się jednak, że bardzo duża wartość pola magnetycznego (kilkukrotnie większa od wymaganej) powodowała powstanie dodatkowych podziałów linii widmowej lasera (*Rys.4.2.15 oraz Rys.4.2.16*).



**Rys.4.2.15. Charakterystyka częstotliwościowa lasera He-Ne LGR7655S w silnym polu magnetycznym.**



**Rys.4.2.16. Charakterystyka częstotliwościowa lasera He-Ne LGR7655S w bardzo silnym polu magnetycznym.**

Ponieważ pomiar heterodynowy powoduje dopplerowskie zmiany częstotliwości zeemanowskiej w torze pomiarowym układu interferometru, dodatkowe linie widmowe będą powodowały modulację amplitudy dla pewnych prędkości przesuwania retropryzmatu i błędy w zliczaniu częstotliwości, co w konsekwencji uniemożliwi dokładny pomiar przesunięcia.

Konieczne stało się określenie maksymalnej wartości pola magnetycznego, przy którym nie występują pasożytnicze rozszczepienia linii widmowej lasera. W tym celu została wykonana cewka (solenoid) umożliwiająca wytworzenie pola o wartości od zera do około 100mT.



*Rys.4.2.17. Obudowany laser LGR7655S z cewką do wyznaczenia zależności częstotliwości Zeemana laserów He-Ne od wartości pola magnetycznego.*

Wzór na wartość indukcji magnetycznej w środku pojedynczego uzwojenia w kształcie okręgu wynosi:

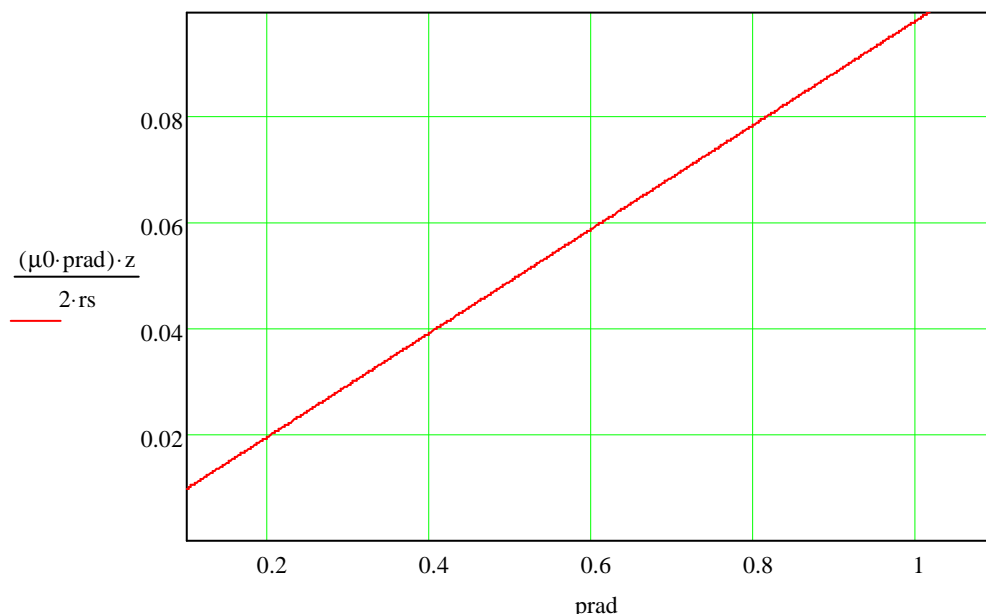
$$B = \frac{\mu_0 I}{2r} \quad (4.2.1)$$

gdzie:  $I$  – wartość prądu w uzwojeniu,  $r$  – promień okręgu,  $\mu_0$  - przenikalność magnetyczna próżni.

Całkowita wartość indukcji magnetycznej równa jest sumie wartości indukcji magnetycznej od poszczególnych uzwojeń:

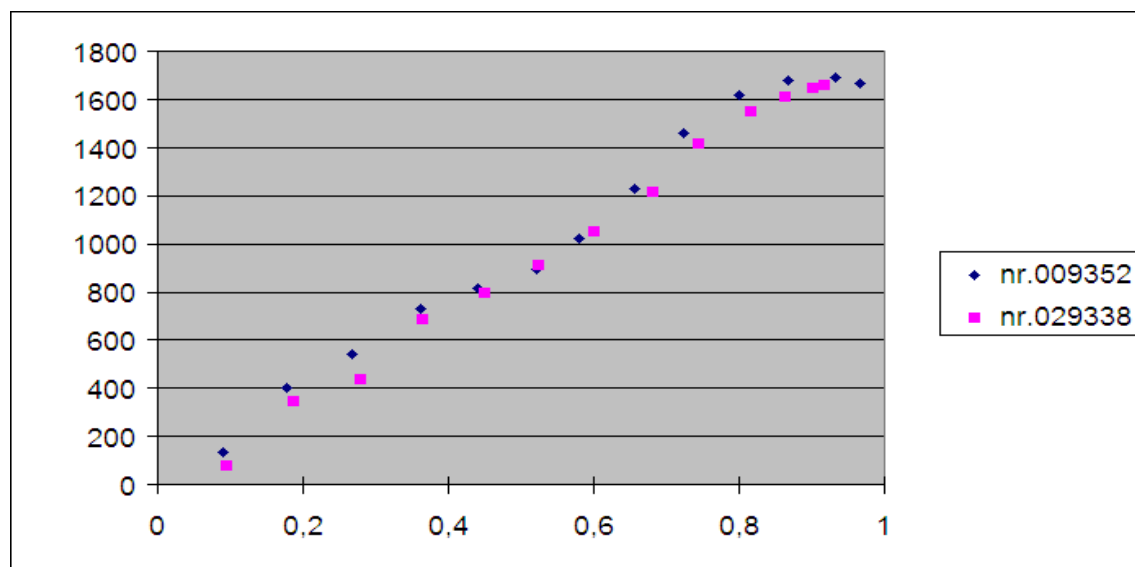
$$B_z = B \cdot z \quad (4.2.2)$$

W obliczeniach przyjąłem wartość średnią promienia dla całej cewki. Przy stałych wymiarach geometrycznych cewki i określonej grubości zwojów jedyną zmienną pozostaje prąd płynący cewce.



**Rys.4.2.18.** Wykres zależności wartości indukcji magnetycznej od prądu w cewce ( $\mu_0 =$  przenikalność magnetyczna próżni, „prąd”=I - wartość prądu w uzwojeniu,  $r_s$  – wartość średnia promienia uzwojenia cewki).

Na rysunku **Rys.4.2.19** przedstawiono zmierzone wartości częstotliwości Zeemana dla dwóch przykładowych egzemplarzy laserów LGR7655S w zależności od prądu w cewce.



**Rys.4.2.19.** Zmierzone charakterystyki zależności wartości częstotliwości Zeemana (oś pionowa; w kHz) od prądu płynącego w cewce (oś pozioma; w A).

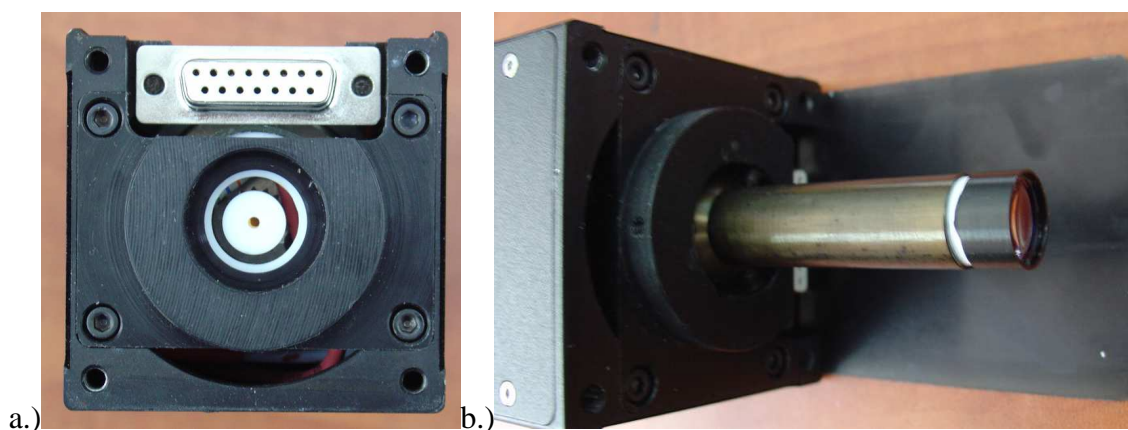
Bardzo duży prąd wymagany dla maksymalnej częstotliwości Zeemana przy stosunkowo niewielkich wymiarach geometrycznych cewki powoduje, że cewka bardzo się nagrzewa, co dyskwalifikuje tego typu rozwiązanie do zastosowania w interferometrze.

Na podstawie eksperymentu ustalona została optymalna wartość indukcji magnetycznej i cewka została zastąpiona neodymowym magnesem trwałym z dodatkowym stalowym elementem zwierającym część linii pola magnetycznego magnesu. Podczas zmian grubości zwory magnetycznej uzyskano zmiany pola wartości indukcji magnetycznej w osi magnesu w zakresie od 22mT (bez zwory) do 5mT (zwora o grubości 5mm) oraz zmiany przy powierzchni

jednej z podstaw magnesu w zakresie od 360mT (bez zwory) do 260mT (zwora o grubości 5mm).

Eksperyment potwierdza obliczenia przedstawione w pracy [2.16]. Niestety, pomimo doboru wymaganej wartości indukcji magnetycznej w osi magnesu (oraz lasera) okazało się, że gradient pola dla obu przypadków (magnes, cewka) różni się, przez co uzyskane wartości częstotliwości Zeemana przy zastosowaniu magnesu trwałego ze zworami były dużo niższe i zawierały się pomiędzy 800 a 1200kHz, w zależności od egzemplarza lasera. Dodatkowo dla zwór o ściankach mniejszych niż 2 mm uzyskano niekorzystne dodatkowe rozszczępienia linii widmowej głównego modu lasera. Dla niektórych przebadanych laserów (ten sam producent, typ lasera, typ magnesów) pomimo zmian zwory magnetycznej w całym dostępnym zakresie uzyskano zmianę częstotliwości Zeemana zaledwie o kilka kHz przy jednocześnie poprawnej charakterystyce zmian jej wartości podczas eksperymentu z cewką. Na razie nie udało się wyjaśnić tego zjawiska. Do konstrukcji głowicy pomiarowej został wybrany laser o najbardziej korzystnej wartości częstotliwości Zeemana (ok. 1200kHz) oraz charakterystyce widmowej bez dodatkowych rozszczępień linii widmowej lasera.

Ponieważ wiązka laserowa wychodząca z lasera LGR7655S jest rozbieżna (kąt zależny od egzemplarza) i w przewidzianym zakresie pracy interferometru (około 30 metrów), występowała zmiana średnicy wiązki w zakresie od około 1mm do 2cm, konieczne okazało się zastosowanie układu kolimacyjnego. Odpowiedni układ został zaprojektowany i wykonany w Instytucie Fizyki Politechniki Wrocławskiej przez dr.E.Fraćczek.



**Rys.4.2.20. Zdjęcie układu mocowania kolimatora wiązki laserowej. a.)Widoczna anoda lasera He-Ne LGR7655S zaizolowana osłoną teflonową. b.) Zamontowany kolimator wiązki laserowej. Kolimator wykonany w Instytucie Fizyki Politechniki Wrocławskiej.**

Zgodnie z wybranym układem detekcji heterodynowej oraz schematem przedstawionym w rozdziale pierwszym na **Rys.1.2.23**, z lasera stabilizowanego w oparciu o porównanie amplitud rozczepionego „zeemanowsko” modu głównego, wychodząca wiązka ma polaryzację kołową, w związku z tym wymagana jest zamiana takiej polaryzacji na liniową przy pomocy płytki ćwierćfalowej.

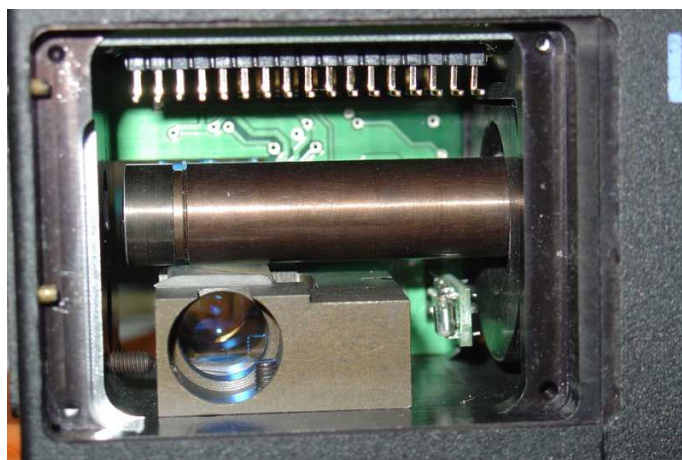


***Rys.4.2.21. Zdjęcie układu mocowania płytki ćwierćfalowej oraz półfalowej do zamiany polaryzacji kołowej wiązki laserowej na liniową.***

Odpowiednia płytką ćwierćfalowa została umieszczona za kolimatorem wiązki, w taki sposób, aby był możliwy dostęp do niej z zewnątrz oraz można było w łatwy sposób ustawić jej kąt względem wiązki laserowej.

W trakcie prób znalezienia odpowiedniej pozycji płytki ćwierćfalowej okazało się, że ze względu na jakość samej płytki, zamieniane jest zaledwie około 60% mocy wiązki z polaryzacji kołowej na liniową. Ponieważ w takim układzie sygnał na detektorze pomiarowym byłby zakłócony dudnieniami wynikającymi właśnie z występowania polaryzacji kołowej, konieczne okazało się dodanie płytki półfalowej na wyjściu wiązki. Dodatkowo płytka półfalowa pozwoliła na precyzyjne ustawienie orientacji uzyskanej polaryzacji poziomej i pionowej wiązki laserowej względem elementów optycznych w torze pomiarowym.

Ponieważ zbudowany przyrząd pomiarowy oprócz pomiaru przesunięcia w osi głównej lasera (zgodnej z wiązką laserową) ma za zadanie umożliwić pomiar pozycji wiązki w pozostałych dwóch osiach, konieczne okazało się rozdzielenie wiązki laserowej na detektor pozycji wiązki (detektor czteropolowy lub PSD).



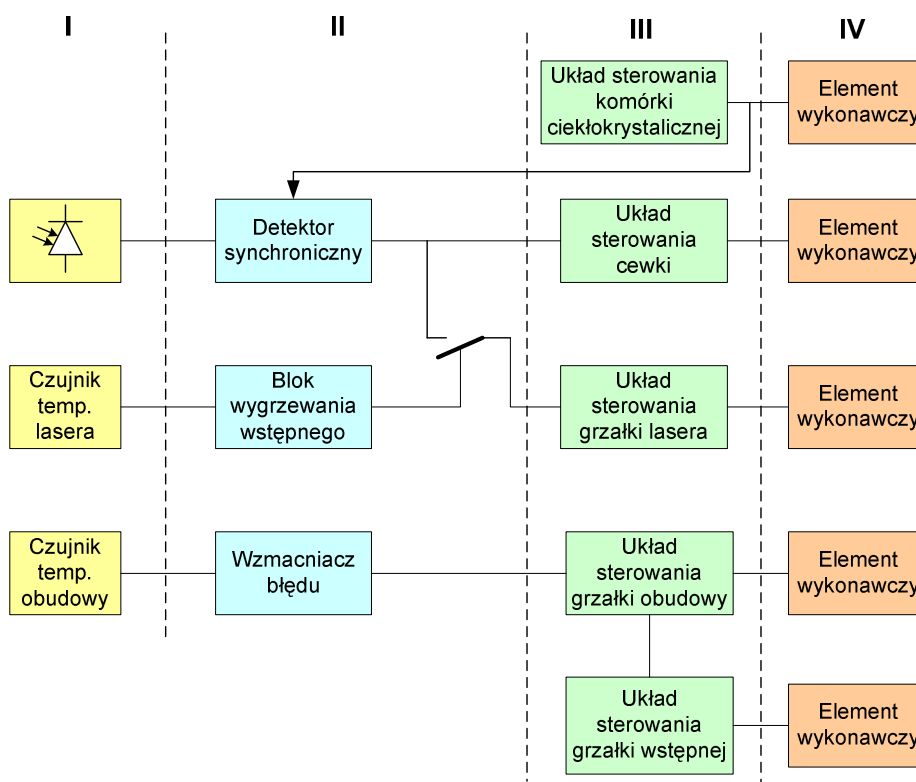
***Rys.4.2.22. Zdjęcie układu mocowania kostki światłdzielącej ( 50%) do układu pomiaru pozycji wiązki laserowej.***



W pierwszym rozwiązaniu układowym, detektor czteropolowy miał aktywne pole o rozmiarach 5mm na 5mm (**Rys.4.2.45**), w związku z tym konieczne okazało się ogniskowanie wiązki wychodzącej z lasera i powracającej do układu detekcyjnego. W tym celu dobrana została soczewka ogniskująca wiązkę laserową do średnicy około 2mm.

Na rysunku **Rys.4.2.23** przedstawiono schemat blokowy układu stabilizacji skonstruowanej głowicy laserowej. Układ można podzielić na cztery zasadnicze części:

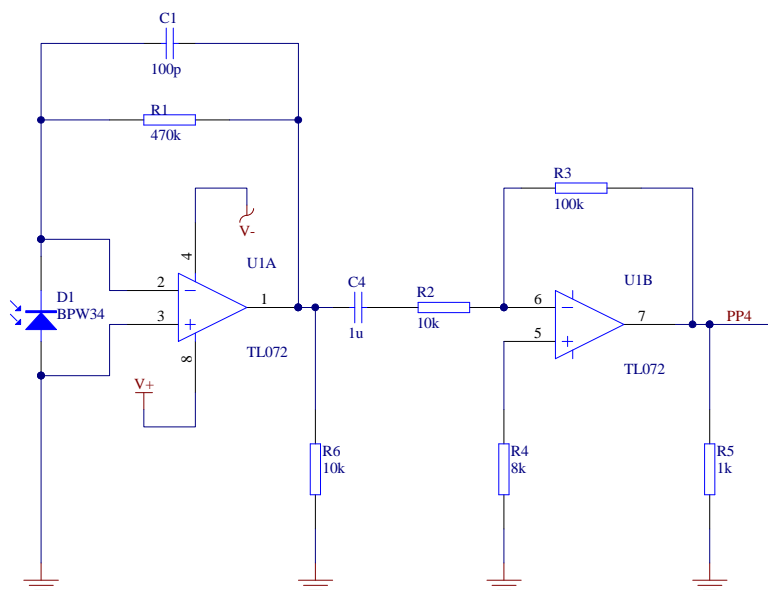
- blok czujników (I),
- blok wzmacniaczy (II),
- blok sterowania układami wykonawczymi (III),
- blok wykonawczy (IV).



**Rys. 4.2.23. Schemat blokowy układu sterującego pracą głowicy laserowej.**

W skład bloku czujników wchodzi: detektor promieniowania laserowego z polaryzatorem, czujnik temperatury lasera oraz czujnik temperatury obudowy (termistory KTY82-210). W skonstruowanej głowicy laserowej detektor tworzy jeden zespół wraz z przełącznikiem optycznym w postaci komórki ciekłokrystalicznej (**Rys.4.2.8**).

Układ elektroniczny detektora składa się z dwóch stopni wzmacniających (**Rys.4.2.24**). Pierwszy stopień konwertuje prąd fotodiody na napięcie, ograniczając pasmo przenoszenia od strony górnych częstotliwości (elementy C1 i R1). Drugi człon wzmacnia sygnał wyjściowy, dopasowując jego poziom do wymogów następnego bloku. Zadaniem kondensatora C4, umieszczonego pomiędzy oboma stopniami, jest odfiltrowanie składowej stałej. Dzięki temu elementowi wzmacnienie drugiego stopnia może być duże, co ma bezpośredni wpływ na stabilność lasera.



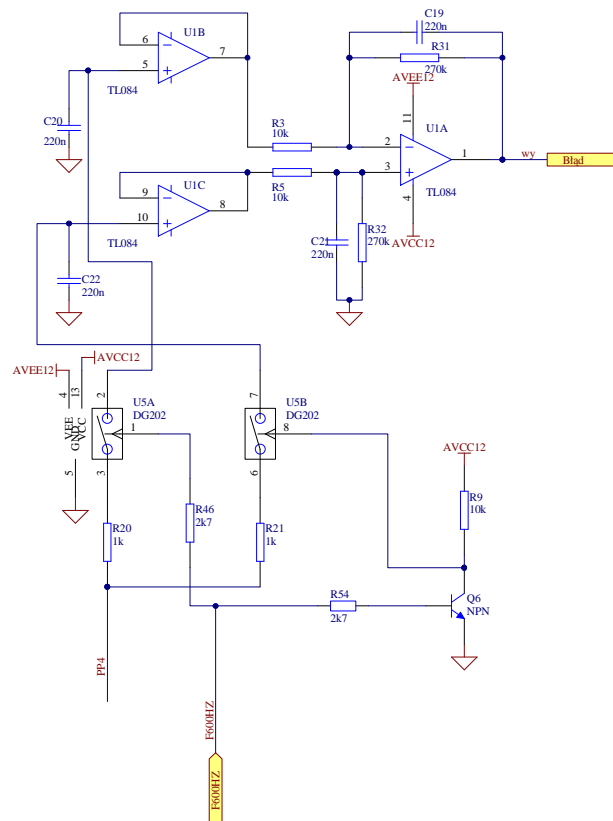
**Rys.4.2.24. Schemat detektora wiązki optycznej dla układu stabilizacji lasera He-Ne.**

Układ detektora został umieszczony na bardzo małej, okrągłej płytce, w taki sposób, aby możliwy był jego obrót i dobór maksymalnego kontrastu dla amplitud obu składowych wiązek laserowej.

Jednym z głównych elementów układu stabilizacji jest blok wzmacniacza/detektora synchronicznego (tzw. wzmacniacza Lock-in; **Rys.4.2.25**). Jego zadaniem jest detekcja synchroniczna sygnału oraz generacja sygnału odstroięcia lasera. Sygnał wyjściowy omawianego wzmacniacza jest następnie wykorzystywany do przestrajania długości rezonatora lasera: magnetostrykcyjnie oraz przez regulację temperatury lasera.

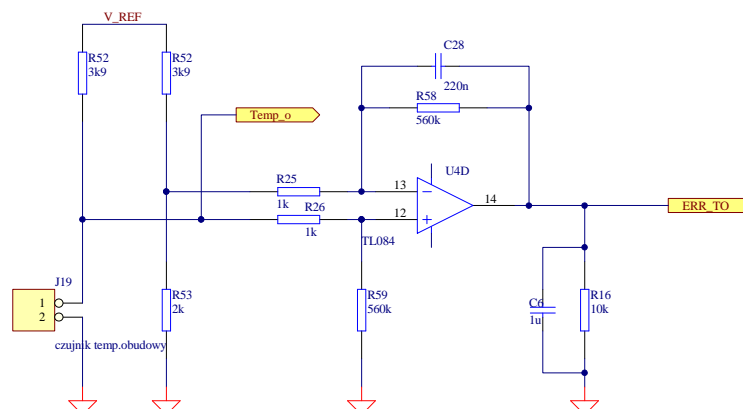
Sygnał „600Hz” jest sygnałem sterującym przełącznikiem optycznym (komórką ciekłokrystaliczną). Przełączając kryształ umożliwia wybór jednej z dwóch składowych rozszczepionego zeemanowsko modu oraz pomiar ich amplitud. Jest on jednocześnie wykorzystywany do synchronizacji wzmacniacza Lock-in.

Sygnał z układu detektora *PP4* (**Rys.4.2.24**) podawany jest w takty sygnału „600Hz” na przemian do dwóch układów próbkująco-pamiętających (C20 i U1B oraz C22 i U1C). Wzmacniacz różnicowy U1A odejmuje od siebie sygnały z obu układów (amplitudy obu modów). Różnica ta jest następnie filtrowana i wzmacniana.



Rys.4.2.25. Schemat wzmacniacza synchronicznego.

Działanie układu stabilizacji temperatury obudowy jest sterowane przez blok wzmacniacza błędu odstrojenia temperatury, pokazany na rysunku **Rys.4.2.26**. Jego zadaniem jest podawanie do układu sterowania grzałką obudowy, sygnału o wartości zależnej od różnicy między napięciem na czujniku obudowy ( $CO$ ), a napięciem ustalonym (tworzonym na dzielniku  $R52$  i  $R53$  z napięcia odniesienia  $V_{REF}$ ). Aby zapewnić dużą stabilność temperatury obudowy przy wahaniami temperatury otoczenia wzmocnienie sygnału błędu jest bardzo duże (ok. 560 razy).

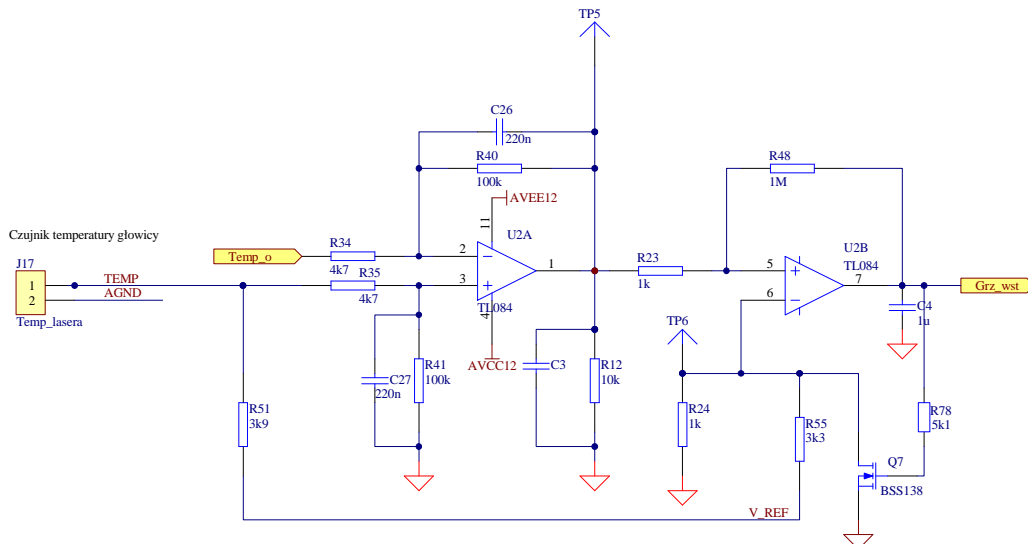


Rys.4.2.26. Schemat bloku wzmacniacza błędu stabilizacji temperatury obudowy głowicy interferometru.

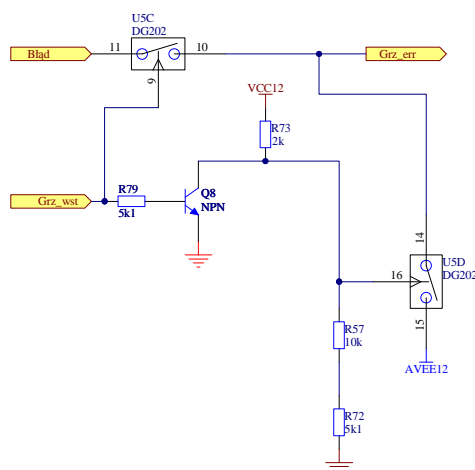
Zadaniem układu wygrzewania wstępnego (**Rys.4.2.27.1**) jest wstępne podgrzanie rury laserowej do temperatury o kilka stopni wyższej od temperatury obudowy. Jeżeli taka temperatura zostanie osiągnięta, to ustawiany jest sygnał  $Grz\_wst$ , włączający pętlę

stabilizacji lasera (Rys.4.2.27.2) oraz załączający tranzystor Q7. Załączenie tego tranzystora przełącza wpływ bloku wygrzewania wstępnego na działającą pętlę stabilizacji.

W zależności od wartości sygnału Grz\_wst grzałka lasera sterowana jest pełną mocą (napięcie ujemne VEE; wygrzewanie wstępne), bądź dołączony zostaje sygnał „Błąd” i pętla stabilizacji lasera He-Ne zostaje zamknięta.

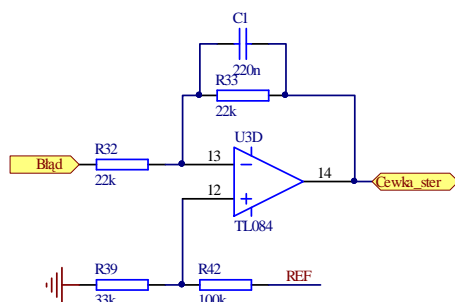


Rys.4.2.27.1. Schemat bloku wygrzewania wstępnego głowicy interferometru.



Rys. 4.2.27.2. Schemat części włączającej stabilizację lasera.

Układy sterowania cewką, grzałką lasera, grzałką obudowy i grzaniem wstępnym dopasowują sygnały z bloku wzmacniaczy do poziomu dopuszczanego przez elementy wykonawcze (grzałki, cewkę).

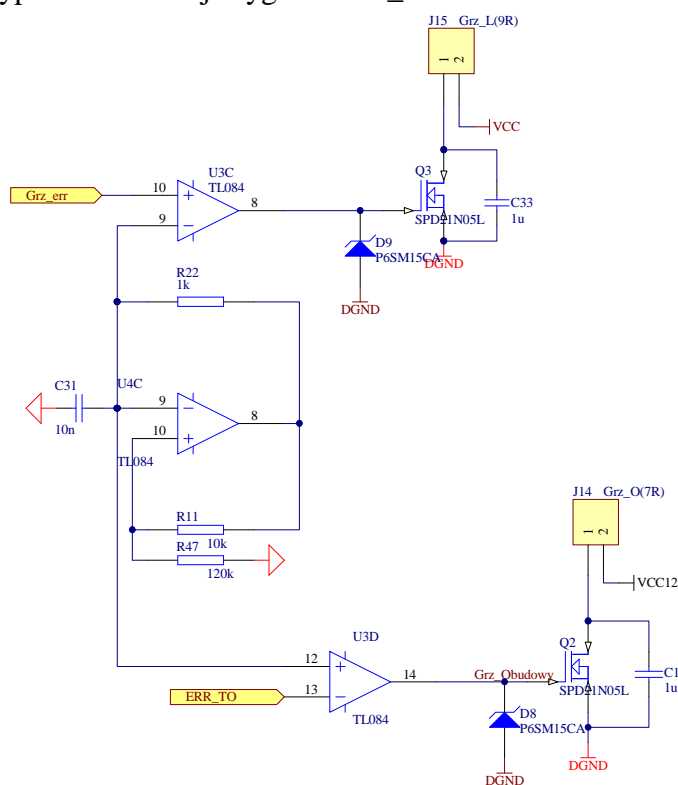


**Rys. 4.2.28. Schemat bloku sterującego pracą cewki w układzie stabilizacji lasera He-Ne.**

Jak widać na rysunku **Rys.4.2.28**, blok sterujący pracą cewki dodaje do wejściowego sygnału „Błędu” pewien offset i osłabia go tak, by był w zakresie działania cewki. W zależności od wartości „Błędu” przykładane jest do cewki odpowiednie napięcie powodujące wydłużenie, bądź też skrócenie rezonatora lasera. Reakcja jest bardzo szybka i umożliwia kompensację wibracji, uderzeń, drań rezonatora.

Pokazany na rysunku **Rys.4.2.29** układ sterowania grzałką lasera przekształca analogowy sygnał „Błędu” na ciąg impulsów o zmodulowanej szerokości i częstotliwości równej częstotliwości sygnału generowanego przez generator zbudowany w oparciu o układ *U4C*. Grzałka lasera jest sterowana wypełnieniem o współczynniku wypełnienia zależnym od wartości napięcia sterującego *Grz\_err*.

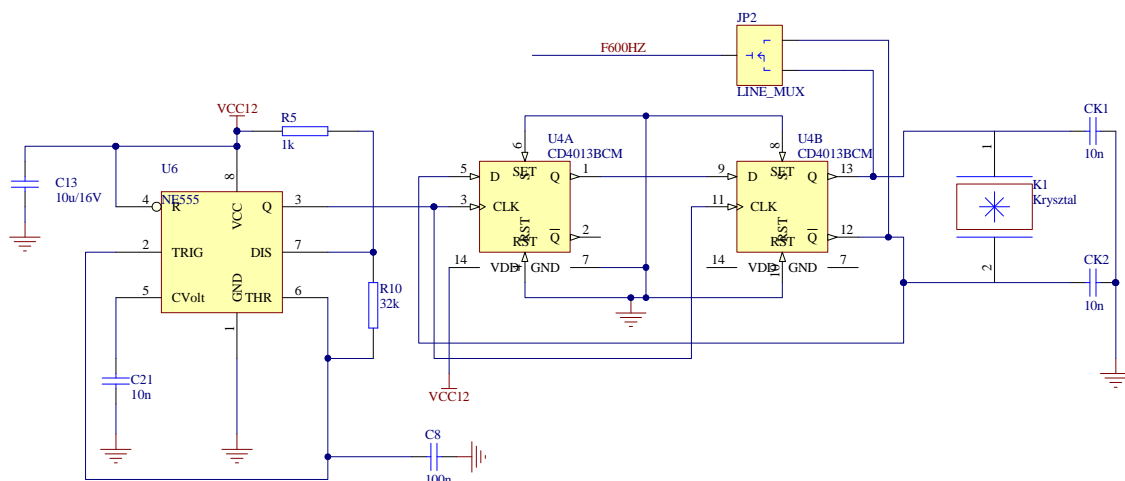
Na identycznej zasadzie działa układ sterujący pracą grzałki obudowy, lecz tym razem współczynnikiem wypełnienia steruje sygnał *ERR\_TO*.



**Rys.4.2.29. Schemat bloku sterującego pracą grzałek lasera i obudowy wraz z elementami wykonawczymi.**

Układ sterowania przełącznikiem optycznym zbudowany jest z generatora *U6* i zespołu przerzutników tworzących sygnały przesunięte w fazie o kąt  $180^\circ$  (**Rys.4.2.30**). Jeden z sygnałów dołączonych do komórki ciekłokrystalicznej jest podawany do detektora synchronicznego. Generowana częstotliwość „600Hz” wynosi około 1kHz (ustalona w zależności od egzemplarza komórki).

Zmontowany układ sterowania wraz z komórką został przedstawiony na rysunku **Rys.4.2.8**.



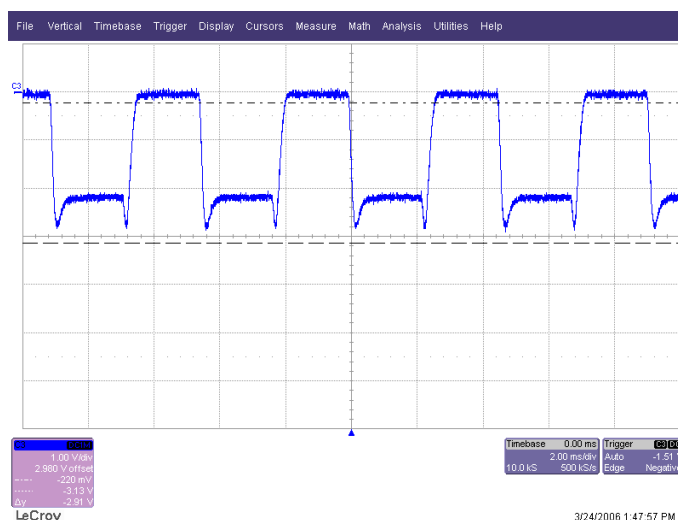
Rys.4.2.30. Schemat bloku sterującego pracą komórki ciekłokrystalicznej.

Funkcjonalnie układ stabilizacji głowicy interferometru (głowicy laserowej) można podzielić na dwie części funkcjonalne:

- układ stabilizacji temperatury obudowy,
- właściwy układ stabilizacji częstotliwości lasera (tzw. pętla stabilizacji).

Układ stabilizacji temperatury obudowy ma bezpośredni wpływ na stabilność długoterminową lasera.

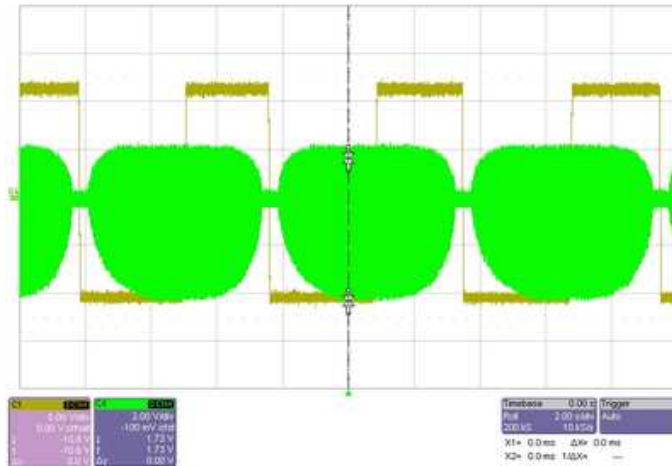
Po załączeniu zasilania lasera układ sterujący załącza na pełną moc dwie grzałki: grzania wstępnego oraz obudowy. Grzałka lasera grzeje na 50% mocy a grzania wstępnego na 100%. Prowadzi to do przyspieszenia procesu termicznego przestrajania, co jest obserwowane w sygnale wyjściowym z detektora (sygnał „PP4” – Rys.4.2.32), jako cykliczna zmiana fazy sygnału. W momencie zmiany fazy, natężenia obu modów są sobie równe.



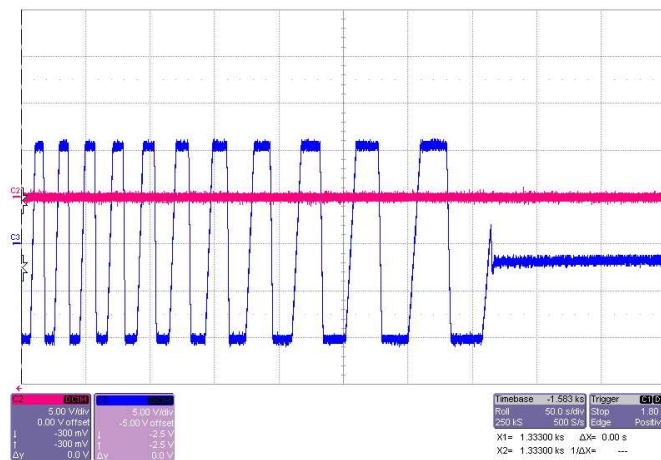
Rys. 4.2.31. Kształt sygnału przestrajania rury laserowej na detektorze (PP4; Rys.4.2.32) Różne moce obu składowych wiązki laserowej. Laser nie stabilizuje.

W wyniku działania wzmacniacza synchronicznego, na jego wyjściu uzyskuje się podczas przestrajania sygnał błędny pętli „Błąd”, pokazany na rysunku Rys.4.2.32. Okres sygnału zwiększa się tym bardziej im bliżej układ jest stanu stabilnego (Rys.4.2.33, Rys.4.2.35). W momentach, gdy wartość sygnału „Błąd” jest stała, laser pracuje jednomodowo w centrum krzywej wzmocnienia, lub bliski jest takiej pracy (natężenie

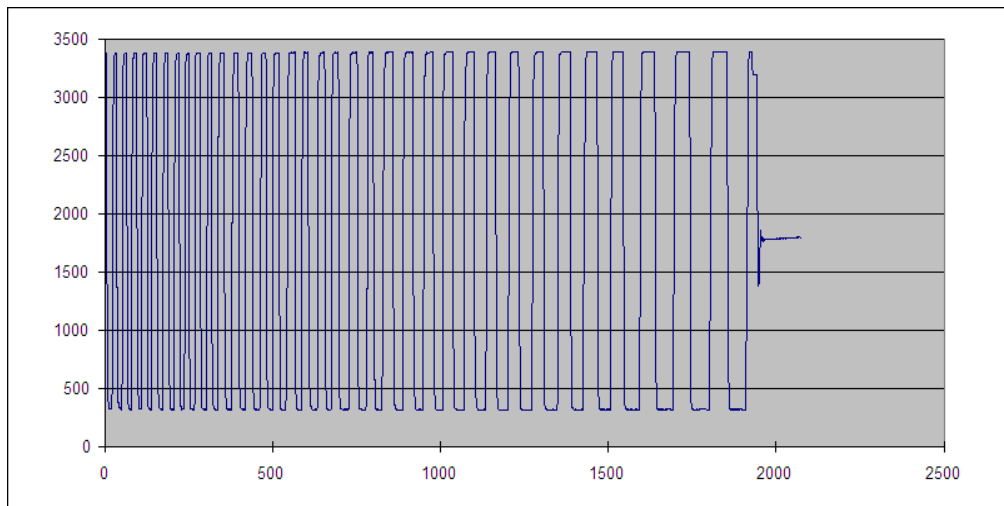
drugiego modu jest pomijalnie małe) [3.09]. Kiedy wartość sygnału wyjściowego wzmacniacza synchronicznego równa jest zeru laser generuje dwa mody i ich natężenia są sobie równe (*Rys.4.2.33*). Jest to pożądany punkt pracy lasera. Podczas jednak pierwszych prób układ pracował niestabilnie (*Rys.4.2.35.1*), co było spowodowane zbyt dużym wzmocnieniem w torze układu stabilizacji lasera. Zmniejszenie wzmocnienia w układzie detektora (*Rys.4.2.24*) umożliwiło stabilną pracę układu (*Rys.4.2.33*, *Rys.4.2.34*, *Rys.4.2.35.2*).



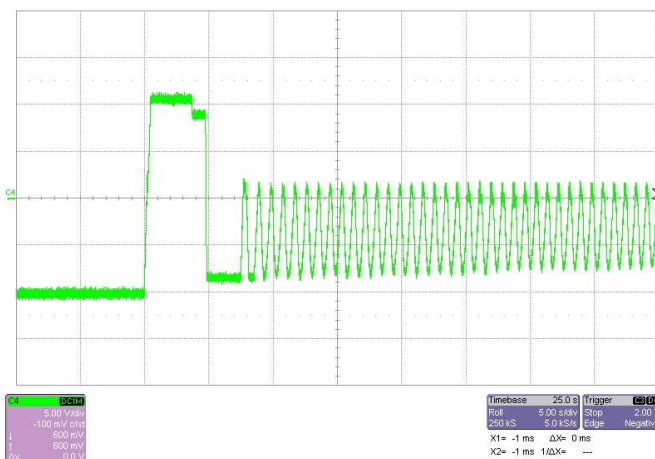
*Rys.4.2.32. Kształt sygnału wyjściowego wzmacniacza synchronicznego podczas przestrajania lasera (kolor brązowy) oraz sygnał z detektora wiązki układu stabilizacji (PP4, kolor zielony).*



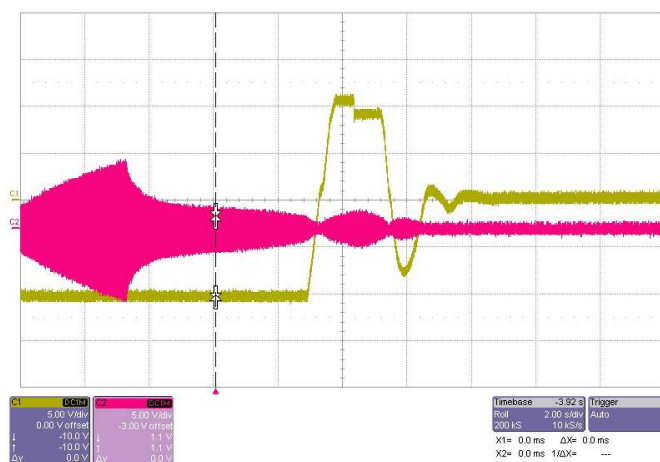
*Rys.4.2.33. Kształt sygnału wyjściowego wzmacniacza synchronicznego podczas przestrajania lasera (kolor niebieski) oraz moment załączenie pętli stabilizacji.*



**Rys.4.2.34. Kształt sygnału wyjściowego wzmacniacza synchronicznego podczas przestrajania lasera oraz moment załączenie pętli stabilizacji. Przebieg zebrany za pomocą przetwornika a/c i mikrokontrolera. Zmiany amplitudowe w zakresie od około 300 do 3500 oznaczają zmiany napięcia w zakresie od około -12V do 12V. Wartość na osi X=1000 oznacza czas 200 sekund.**



**Rys.4.2.35.1. Kształt sygnału wyjściowego wzmacniacza synchronicznego podczas załączenia pętli stabilizacji. Niestabilna, oscylacyjna praca układu.**



**Rys.4.2.35.2. Kształt sygnału wyjściowego wzmacniacza synchronicznego podczas załączenia pętli stabilizacji (kolor brązowy). Sygnał z detektora wiązki układu stabilizacji (PP4, kolor czerwony).**



Stromość zboczy omawianego sygnału (**Rys.4.2.33**, **Rys.4.2.34**) reguluje się poprzez zmianę wartości wzmocnienia wzmacniacza synchronicznego lub wzmacniając amplitudę sygnału PP4. Przy zboczu o stromości  $90^\circ$  teoretycznie niestabilność lasera byłaby nieskończenie mała. W praktyce są to wartości niemożliwe do uzyskania ze względu na występowanie skończonego czasu reakcji pętli stabilizacji (układu detekcyjnego i wykonawczego).

Podczas wygrzewania wstępnego, sygnał „*Błąd*” jest podawany tylko na układ sterowania cewką (**Rys.4.2.28**), co uwidacznia się zaburzeniami kształtu zboczy w pobliżu przejścia sygnału przez zero (wytworzone przez cewkę pole próbuje przeciwdziałać zmianom długości rezonatora – zbocze narastające na **Rys.4.2.35**; kolor beżowy).

Grzałka lasera jest w tym momencie sterowana pełną mocą. W momencie osiągnięcia przez rurę laserową zakładanej temperatury, pętla stabilizacji zostaje zamknięta poprzez zmianę położenia przełączników (**Rys.4.2.27**), (**Rys.4.2.35.2**, skok amplitudy, kolor beżowy). W tym momencie sygnał „*Błąd*” zaczyna sterować nie tylko cewką, ale również grzałką lasera [**Rys.4.2.29**]. Po pewnej chwili częstotliwość lasera przestaje się przestrażać i stabilizuje się na pewnej wartości.

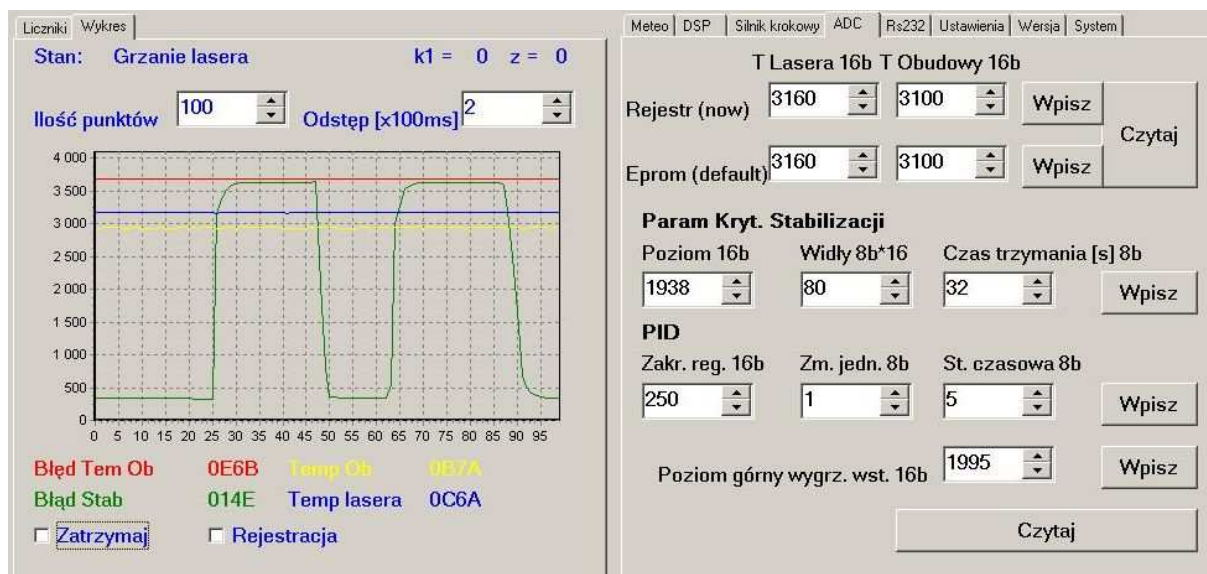
W pracy [3.09] została przedstawiona procedura projektowania układu stabilizacji lasera dwumodowego ze szczególnym naciskiem na konstrukcję modelu termicznego obudowy lasera i samego lasera. W autorskim projekcie głowicy interferometru ze względu na znacznie większą masę obudowy (pojemność) dodano trzecią grzałkę wspomagającą grzanie wstępne lasera (**Rys.4.2.14**). Ponieważ grzałka ta nie pracuje w momencie, gdy laser stabilizuje, nie wpływa ona na procedurę doboru stałych czasowych grzania i chłodzenia głowicy.

Jeżeli między temperaturą rury laserowej i temperaturą obudowy występuje odpowiedni, stały odstęp (stałe czasowe grzania i chłodzenia lasera są do siebie zbliżone), to sygnał „*Błąd*” ma wartość stałą, bliską zero. W przypadku, gdy laser szybciej się chłodzi niż nagrzewa, co oznacza, że jest zbyt mały odstęp temperatur lasera i obudowy, sygnał „*Błąd*” będzie miał wartość dodatnią. Jeżeli rura laserowa zostanie natomiast wygrzana zbyt mocno, sygnał błędu „*Błąd*” pętli będzie ujemny.



**Rys.4.2.36.** Zdjęcie układu stabilizacji lasera He-Ne w oparciu o równowagę dwóch składowych wiązki laserowej. Widoczny magnes neodymowy ze zwrótem magnetyczną.

Na rysunku **Rys.4.2.36** przedstawiono zbudowany przez autora układ stabilizacji lasera He-Ne z układem mikroprocesorowym do zadawania parametrów stabilizacji oraz odczytu aktualnego stanu działania pętli stabilizacji lasera (wynik pomiaru na **Rys.4.2.34**). Dodanie mikrokontrolera umożliwia szybsze dobranie optymalnych współczynników pętli stabilizacji poprzez zdalny monitoring pracy układu.

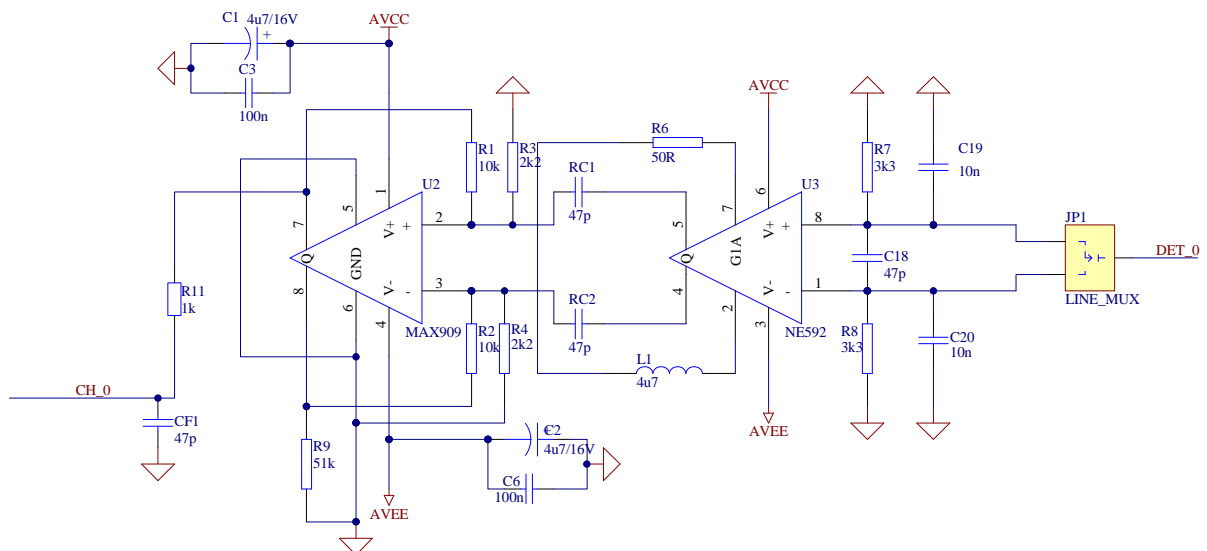


**Rys.4.2.37. Aplikacja umożliwiająca kontrolę i monitorowanie stanu pracy układu stabilizacji lasera He-Ne.**

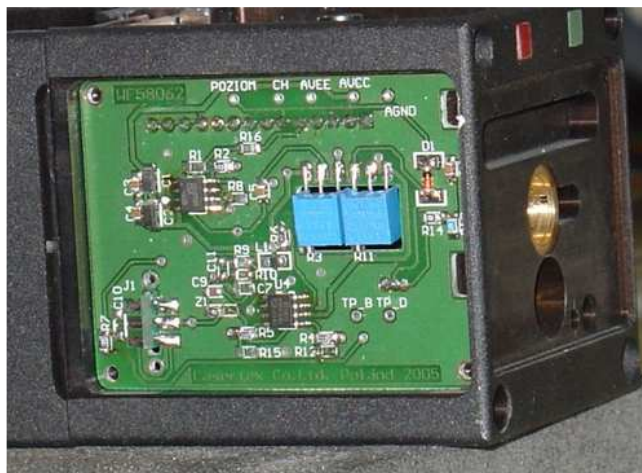
Wyniki pomiaru stabilności częstotliwości lasera He-Ne z proponowanym układem stabilizacji, w odniesieniu do wzorca z komórką jodową, zostały przedstawione w rozdziale piątym.

Część pomiarowa głowicy interferometru laserowego składa się z dwóch identycznych układów detekcyjnych analogicznych do schematu na **Rys.4.2.24** oraz dwóch torów formatowania sygnału (**Rys.4.2.38**). W przypadku toru referencyjnego użyty został wzmacniacz AD8058 o paśmie 350MHz. W torze pomiarowym, ze względu na duże zmiany częstotliwości, wzmacniacz w układzie detektora został zastąpiony wzmacniaczem AD8003 o paśmie 1.5GHz.

Stałe wzmocnienie w zakresie do kilkunastu, kilkudziesięciu MHz jest wymagane, aby układ formatowania sygnału pomiarowego, w szczególności komparator U2 ze względu na histerezę przełączania, przetwarzał sygnał sinusoidalny z detektora na prostokąt o stałym, jednakowym wypełnieniu.

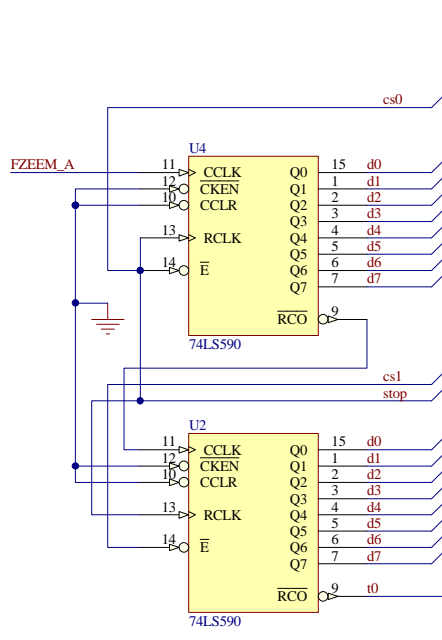


**Rys.4.2.38. Schemat układu formatowania sygnałów: pomiarowego oraz odniesienia interferometru laserowego.**



**Rys.4.2.39. Zdjęcie układu detekcji częstotliwości zeamanowskiej toru pomiarowego interferometru. Układ toru odniesienia został umieszczony na jednej płytce z detektorem układu stabilizacji (Rys.4.2.8).**

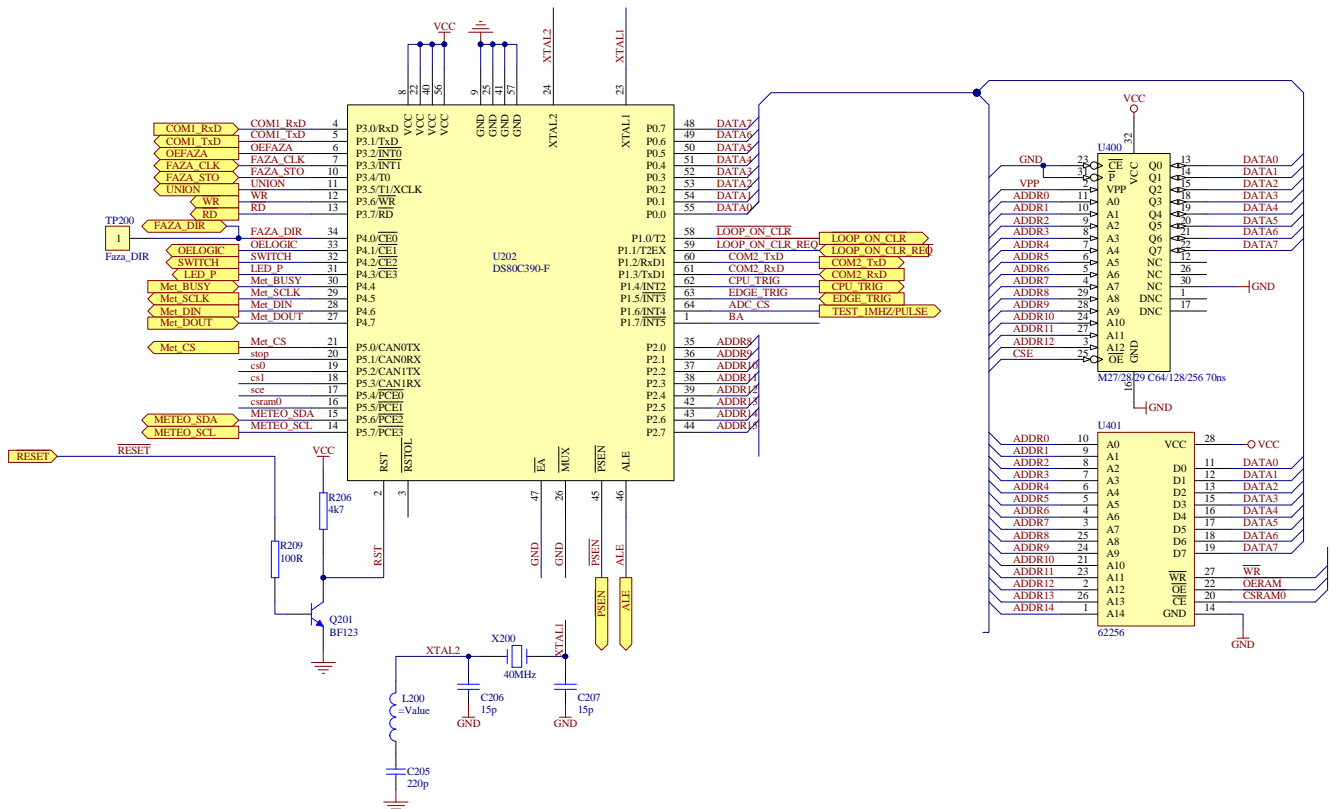
Sygnaly z obu kanałów: pomiarowego oraz referencyjnego są przesyłane do układu liczników (Rys.4.2.40), systemu mikroprocesorowego i komputera PC gdzie są .



**Rys.4.2.40. Schemat układu liczników do zliczania częstotliwości zeemanowskiej toru pomiarowego interferometru. Tor do zliczania częstotliwości zeemanowskiej toru referencyjnego jest identyczny.**

Sygnaly pomiarowy oraz referencyjny z układów formowania impulsów (**Rys.4.2.38**) są podłączone do układów liczników przedstawionych na **Rys.4.2.40** oraz **Rys.4.2.41**. Dwa układy 74LS590 tworzą jeden 16-bitowy licznik pomiarowy dla toru pomiarowego lub referencyjnego. Układy posiadają wewnętrzny zatrask i bufor, dzięki czemu możliwe jest jednoczesne zliczanie sygnału wejściowego, zatrzaśnięcie aktualnej wartości z kanału pomiarowego lub odniesienia oraz udostępnienie na magistrali danych procesora bez utraty synchronizacji z sygnałem wejściowym. Zliczone impulsy są zatrzaskiwane, co okres 1ms sygnałem z procesora „Stop” i następnie, po kolei, odczytywane poprzez magistralę danych (d0-d7; DATA0-DATA1; **Rys.4.2.41**).

W najnowszym rozwiązaniu układy 74LS590 zostały zastąpione programowalnym układem programowalnym XC95144 (**Rys.4.2.42**). Pozwoliło to uprościć konstrukcję układu oraz zwiększyć dopuszczalne częstotliwości wejściowe (w przypadku możliwego rozszerzenia rozdzielczości interferometru przez powielenie częstotliwości sygnałów pomiarowego i referencyjnego za pomocą pętli PLL, np.:TLC2932).



**Rys.4.2.41. Schemat układu głównego mikrokontrolera interferometru i towarzyszących mu pamięci ROM oraz SRAM.**

System mikroprocesorowy składa się z mikrokontrolera DS80C390 firmy Dallas (**Rys.4.2.41**), zgodnego z serią I8051 oraz układów pamięci ROM (U400) z oprogramowaniem oraz pamięci SRAM (U401).

Mikrokontroler jest wykorzystywany do odczytu danych z liczników pomiarowych (pomiarowego oraz referencyjnego), odczytu danych z przetwornika mierzącego wielkości środowiskowe, odbierania danych z układu pomiarowego pozycji wiązki laserowej oraz odpowiednim formatowaniem wszystkich tych danych i wysyłaniem do komputera typu PC, gdzie możliwa jest ich dalsza obróbka.



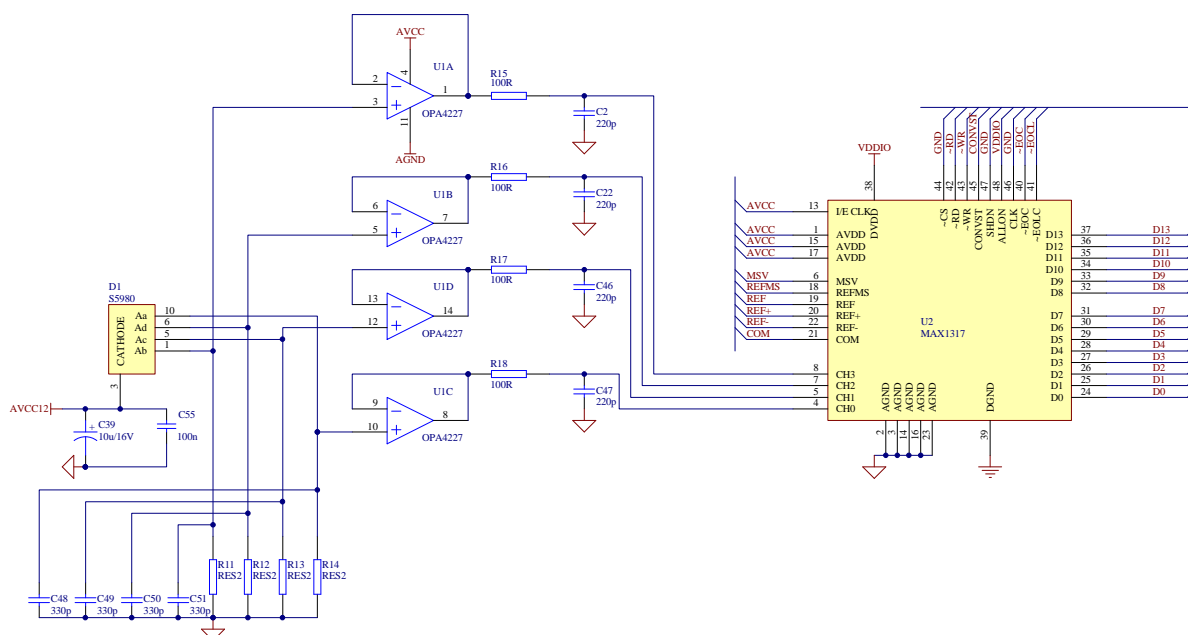
*Rys.4.2.42. Schemat układu głównego mikrokontrolera interferometru. Widoczny jest układ XC95144, w którym zaprogramowane zostały cztery odpowiedniki logiczne układów 74ls590.*

Podstawową cechą odróżniającą typowy układ interferometru heterodynowego od proponowanej przez autora konstrukcji jest układ detekcji pozycji wiązki umożliwiający pomiar przesunięcia w osiach Y, Z (prostopadłych do osi wiązki lasera).

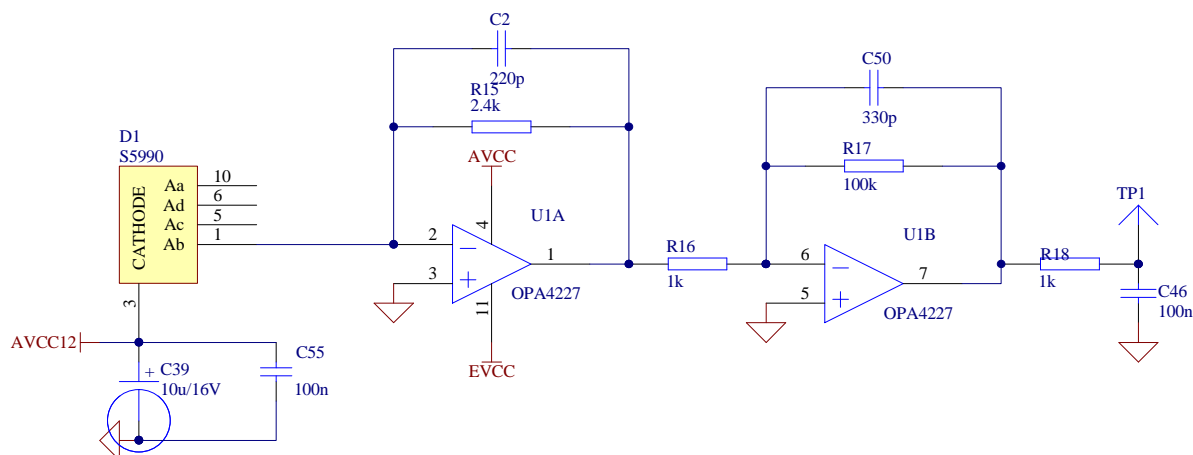
Schemat elektroniczny układu pomiarowego został przedstawiony na *Rys.4.2.43.1*, *Rys.4.2.43.2* oraz *Rys.4.2.44*. Główną częścią układu jest mikrokontroler ATmega64 firmy ATMEL i układ przetwornika a/c MAX1317, który umożliwia jednoczesny pomiar czterech kanałów analogowych z rozdzielczością czternastu bitów.

Napięcie, jakie odłoży się na rezystorach precyzyjnych R11-R14 (*Rys.4.2.43.1*) po przejściu przez wzmacniacze buforujące w układzie U1, jest dołączone do wejścia przetwornika a/c MAX1317. Seria pomiarowa dokonywana jest synchronicznie z przełączeniem kryształu SSFLC co około 500us, zarówno w czasie gdy zegar sterujący kryształ ma stan niski logicznie jak i wysoki. Każda seria to cztery pomiary, które są następnie uśredniane.

Po każdym dwóch seriach pomiarów (dla stanu niskiego i wysokiego zegara sterującego kryształ) dokonywane są obliczenia wg. wzorów: **1.2.25**, **1.2.26** z rozdziału pierwszego (wyznaczane są pozycje wiązki laserowej na detektorze). Wyliczone wartości przesunięcia w osiach X i Y, dla obu polaryzacji wiązki laserowej (wybór polaryzacji odbywa się poprzez komórkę SSFLC), są przesyłane poprzez mikrokontroler DS80C390 (*Rys.4.2.41*) do komputera PC.



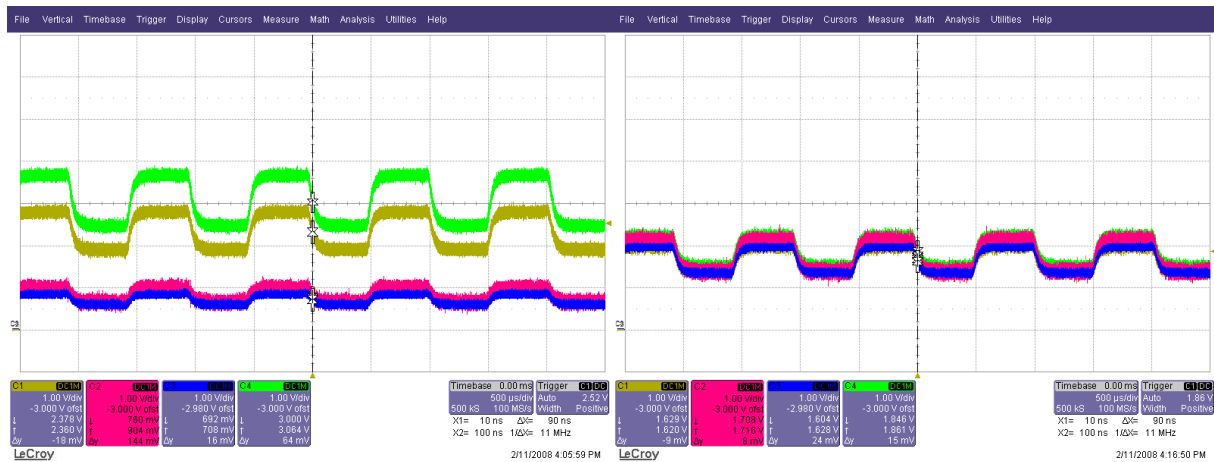
**Rys.4.2.43.1. Schemat układu detekcji pozycji z detektorem czteropolowym D1, układami buforowania U1 i czterokanałowym przetwornikiem a/c MAX1317.**



**Rys.4.2.43.2. Schemat układu detekcji pozycji z detektorem PSD S5990, układem przetwornika prąd na napięcie i wzmacniaczem. Przedstawiony schemat przeznaczony jest dla jednego toru. Pozostałe trzy (wyjścia 5, 6, 10 układu S5990) posiadają analogiczne układy przetwornika prąd na napięcie oraz wzmacniacza i są wymagane dla poprawnej pracy detektora PSD.**

W trakcie uruchamiania układu detekcji pozycji, niezwykle ważne okazało się precyzyjne ustawienie kostki dzielącej sygnał na potrzeby pomiaru pozycji wiązki i pomiaru interferometrycznego (**Rys.4.2.22**). **Minimalna** zmiana kąta i pozycji kostki przekładała się na bardzo duże zmiany obrazu wiązki na detektorze czteropolowym. Opracowany został układ mocowania do obudowy głowicy interferometru (stanowiącej sztywne podłoże) w postaci dodatkowego uchwytu do którego przyklejona jest kostka światłodziela. Układ musiał zapewniać jednocześnie bardzo duża sztywność, brak luzów a jednocześnie nie wprowadzać naprężeń na samą kostkę światłodziela.

Proces kalibracji toru sprowadzał się do takiego ustawienia kostki aby laserowa wiązka powrotna (przy pracy tylko z retropryzmatem) przechodząc maksymalnie centrycznie przez soczewkę ogniskującą (**Rys.4.2.21**) po podziale na kostce, padała dokładnie centrycznie na detektor. Było to możliwe obserwując napięcia na wyjściach buforów (**Rys.4.2.43.1**), (**Rys.4.2.43.3**).

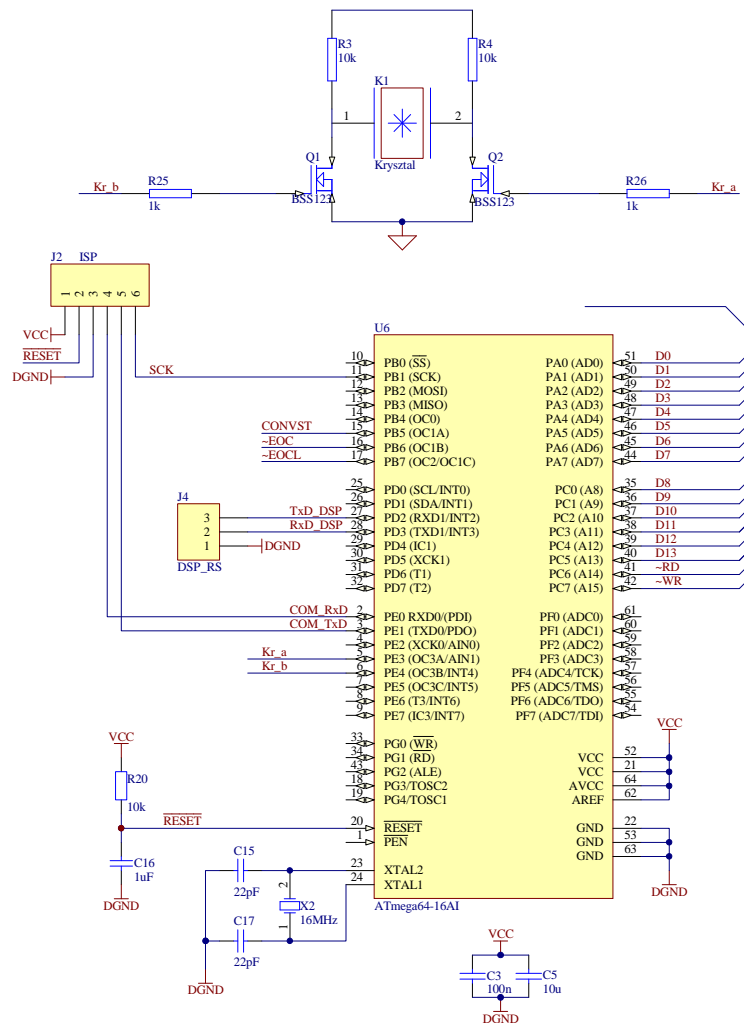


**Rys.4.2.43.3. Oscylogramy przebiegów wyjściowych z detektora czteropolowego. Widoczne przebiegi dla czterech pól detektora oraz dwóch polaryzacji. Po lewej układ niedokładnie skalibrowany, po prawej układ skalibrowany.**



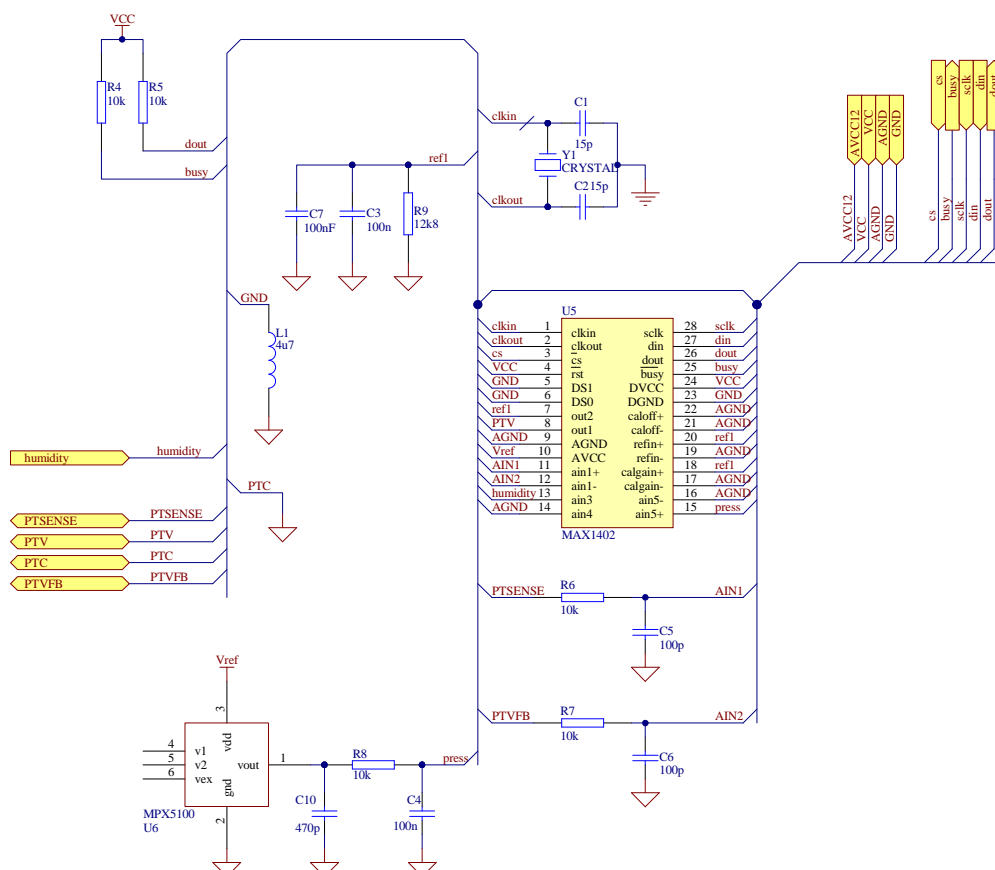
**Rys.4.2.43.4. Zdjęcia układu detekcji pozycji z detektorem czteropolowym, Kryształem SSFLC FE8/2c-5, układami buforowania, czterokanałowym przetwornikiem a/c oraz procesorem sterującym. Widoczne dwie wersje detektorów czteropolowych o różnych wymiarach powierzchni aktywnej (5x5mm oraz 10x10mm). Pomiedzy komórką z kryształem a detektorem znajduje się polaryzator ustawiony pod kątem 45° w stosunku do krawędzi detektora.**





**Rys.4.2.44. Schemat układu mikroprocesorowego do odczytu danych z przetwornika MAX1317 oraz sterowania kryształą SSFLC w układzie detekcji pozycji wiązki laserowej.**

Do kompensacji zmian długości fali wiązki laserowej (**Rozdział.1.2.4**) w powietrzu oraz pomiaru temperatury mierzonego (obrabianego) materiału w celu kompensacji wyniku pomiaru jego długości, wykorzystywany jest układ mierzący wilgotność, ciśnienie i temperaturę. (**Rys.4.2.45**).



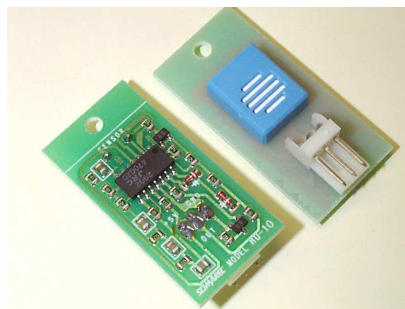
**Rys.4.2.45. Schemat układu pomiaru wielkości środowiskowych.**

Pomiar wszystkich wielkości jest dokonywany osiemnastobitowym przetwornikiem a/c MAX1402 firmy Maxim. Dane przesyłane są w pierwszej kolejności do układu mikrokontrolera DS80C390 i po odpowiednim przetworzeniu do komputera PC.

Do pomiaru temperatury został wykorzystany czujnik PT1000<sup>2</sup> klasy B w układzie czterozaciskowym, podłączany do sygnałów: PTSENSE, PTV, PTC, PTVB. Źródło prądowe do pomiaru czterozaciskowego o wydajności 200μA jest realizowane przez układ MAX1402. Ponieważ za pomocą przetwornika a/c możliwy jest jednoczesny pomiar tylko jednej temperatury, zostały wykorzystane cztery poczwórne analogowe klucze do przełączania dodatkowych czujników PT1000. Pomiar temperatury na wszystkich czujnikach dokonywany jest sekwencyjnie.

Do pomiaru ciśnienia został wykorzystany czujnik ciśnienia firmy Freescale MPX5100AP. Czujnik posiada wewnętrzną kalibrację temperatury oraz układ kompensacji histerezy dzięki czemu możliwy jest pomiar z dokładnością  $\sim \pm 1,5$ hPa w zakresie od 0°C do 85°C.

<sup>2</sup> Czujnik PT1000 był kalibrowany systemem do kalibracji ATC156B firmy AMETEK z czujnikiem wzorcowym PT1000 o dokładności wskazań  $\pm 0,03$ °C. Zaprojektowany układ pomiaru temperatury po kalibracji posiada dokładność wskazań temperatury lepszą niż  $\pm 0,1$ °C w całym zakresie pracy interferometru.



**Rys.4.2.46. Czujnik wilgotności RHU1015.**

Do pomiaru wilgotności został wykorzystany zintegrowany przetwornik wilgotność na pojemność z generatorem i układem przetwarzania na napięcie (**Rys.4.2.46**). Na wyjściu modułu pomiarowego dostępne jest napięcie zmieniające się w zakresie od 1 do 3V dla odpowiadających zmian wilgotności w zakresie od 10 do 100%. Dokładność pomiaru wilgotności w temperaturze 25°C w zakresie zmian wilgotności 25 do 90% wynosi  $\pm 5\%$ .

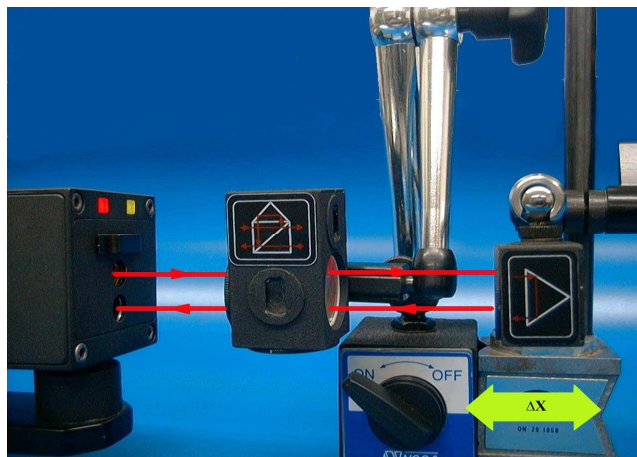
#### **4.4. OPROGRAMOWANIE SYSTEMU POMIAROWEGO.**

Oprogramowanie komputera PC zostało napisane w środowisku Delphi i pracuje pod systemem operacyjnym Windows.

W zależności od konfiguracji układu optycznego możliwe są następujące układy pomiarowe:

- pomiary liniowe,
- pomiary kątowe,
- pomiary przestrzenne.

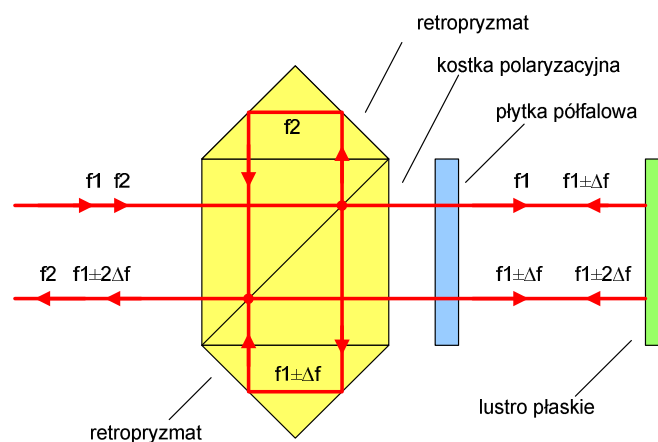
Podczas pomiarów liniowych wymagany jest podstawowy układ optyczny składający się z polaryzacyjnej kostki światłodzieliącej, retropryzmatów w torze pomiarowym oraz w torze odniesienia (**Rys.4.2.47**, **Rys.1.2.30**). Konfiguracja taka umożliwia wykonanie pomiarów przemieszczeń liniowych, pomiarów prędkości przesuwu, pomiarów pozycjonowania maszyny. Pomiary można wykonywać w trzech wzajemnie prostopadłych osiach pomiarowych X, Y, Z. Pomiar od powierzchni zwierciadła może być realizowany w konfiguracji dwuprzebiegowej z wykorzystaniem specjalnej optyki (**Rys.4.2.48**, **Rys.4.2.49**).



**Rys.4.2.47. Interferometr laserowy w konfiguracji do pomiaru przemieszczenia (pozycjonowania liniowego). Oś X.**



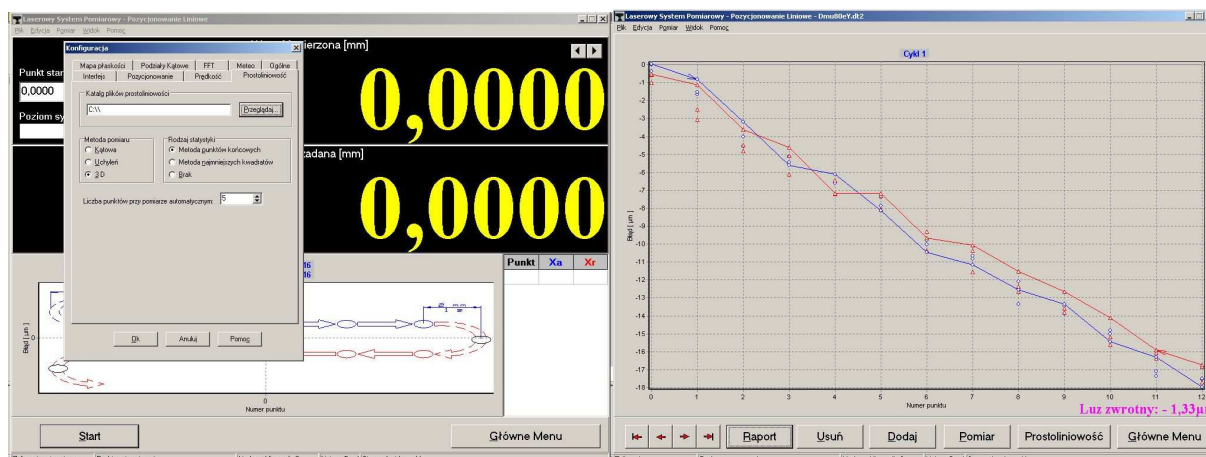
Rys.4.2.48. Interferometr laserowy w konfiguracji do pomiaru przemieszczenia od zwierciadła. Oś główna lasera – oś X.



Rys.4.2.49. Schemat toru optycznego w konfiguracji do pomiaru przemieszczenia od zwierciadła płaskiego. Podwójny przebieg wiązki laserowej w torze pomiarowym („f1”) oznacza dwukrotne zwiększenie rozdzielczości pomiaru.

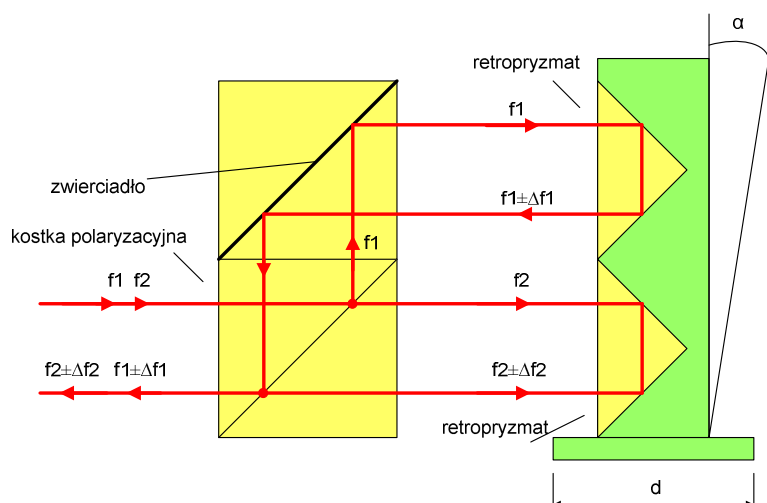


Rys.4.2.50. Okno podstawowe systemu pomiarowego umożliwiające sprawdzenie aktualnych wartości temperatur, ciśnienia i wilgotności, wykonanie podstawowych pomiarów przesunięcia oraz wykonanie kalibracji układu optycznego (retroreflektora pomiarowego i odniesienia z kostką polaryzacyjną).



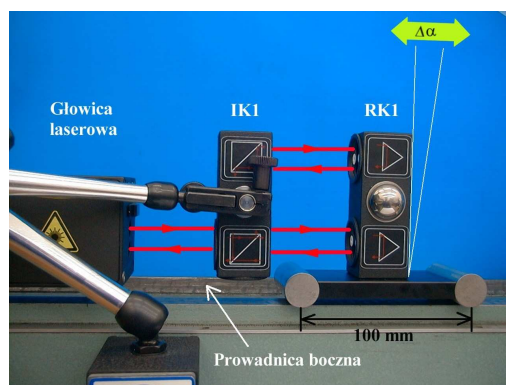
**Rys.4.2.51. Okno pomiaru pozycjonowania maszyny. Wykorzystywana standardowa optyka (Rys.4.2.47, Rys.1.2.30). Możliwy jest pomiar luzów maszyny i generowanie raporów do ich kompensacji.**

**Pomiary kątowe** wykorzystywane są do pomiarów prostoliniowości łoża maszyny obróbczej, płaskości powierzchni i do pozycjonowania kąтового. Pomiary prostoliniowości można wykonywać w trzech wzajemnie prostopadłych osiach pomiarowych X, Y, Z. Do wykonania pomiarów kątowych wymagana jest specjalna optyka (**Rys.4.2.52**).



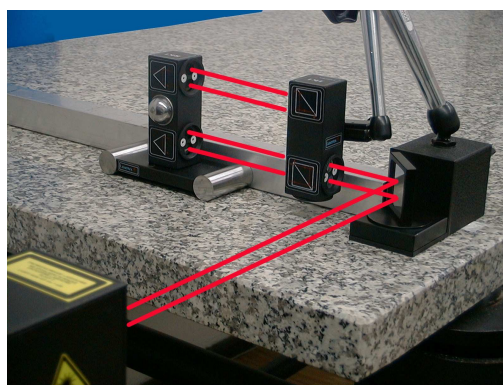
**Rys.4.2.52. Schemat optyki do pomiarów kątowych (również pomiarów płaskości powierzchni).**

Retropryzmaty dla obu polaryzacji umieszczone są na podstawie o znanej długości „d”. Nachylenie zestawu retropryzmatów o kąt  $\alpha$ , wynikający z występowania pewnej krzywizny na powierzchni, powoduje wydłużenie drogi w jednym torze oraz skrócenie drogi w drugim., dzięki czemu pomiar charakteryzuje się zwiększoną dwukrotnie rozdzielczością. Pomiar optyką „kątową” posiada jednak wadę wynikającą z istnienia długości podstawki retropryzmatów i wynikającego z tego powodu kroku pomiaru wynoszącego długość podstawki „d”.



*Rys.4.2.53. Interferometr laserowy w konfiguracji optycznej do pomiarów kątowych (również pomiarów płaskości powierzchni). Oś X.*

**Pomiary płaskości** powierzchni polegają na serii pomiarów prostoliniowości na badanej powierzchni. Lokalizacja odcinków, w jakich wykonywane są pomiary prostoliniowości zależne są od wymaganych norm lub zaleceń, badanej powierzchni lub wymagań producenta.



*Rys.4.2.54. Interferometr laserowy w konfiguracji do pomiarów płaskości powierzchni(jednej osi).*

Jako **pomiary przestrzenne** zostały zdefiniowane wszystkie pomiary wykorzystujące układ pomiaru pozycji wiązki laserowej proponowanej przez autora.

Zaliczają się do nich pomiary prostoliniowości, pomiary płaskości powierzchni oraz pomiary prostoliniowości osi głównych maszyny (np.: WMP lub centrum obróbczego) oraz przekątnych. Wykorzystywana jest standardowa optyka (*Rys.4.2.47*) składająca się z polaryzacyjnej kostki światłodzielną, retropryzmatów w torze pomiarowym oraz w torze odniesienia.



**Rys.4.2.55. Interferometr laserowy w konfiguracji do pomiarów prostoliniowości lub/i płaskości powierzchni (dwóch osi) oraz przykładowy wynik pomiaru.**

Pomiar dokonywany jest identycznie jak w przypadku korzystania z optyki kątovej , tzn.: retroreflektor przesuwany jest o stałą długość (np.: 100mm) i zapamiętywana jest wartość przesunięcia (przy wykorzystaniu układu autora: w trzech osiach jednocześnie). Aby zmierzyć powierzchnie należy wykonać szereg pomiarów prostoliniowości zgodnie z zaleceniami ISO, VDI/VDE lub innymi.

Wyniki pomiaru opracowaną metodą przedstawione są w rozdziale piątym.

Ciekawą właściwość mają pomiary metodą z detektorem czteropolowym z wykorzystaniem optyki do pomiarów kątowych. Zmiana kątowa jak na rysunku **Rys.4.2.56** układu odbłyśników, zdefiniowana jako błąd „roll” jest mierzona jako podwojona wartość przesunięcia. Błąd ten jest niemierzalny żadnym innym interferometrem laserowym.

Podstawiając do równania na długość łukową kąta:

$$L=2*R*\alpha*\pi/180^{\circ} \quad (4.2.3)$$

gdzie: R=50mm - odległość pomiędzy retropryzmatami,  $\alpha=1^{\circ}$  - kąt obrotu, L – przemieszczenie środków retropryzmatów względem osi Y,

otrzymujemy  $L \approx 1,74\text{mm}$ . Oznacza to, że przy założeniu dokładności pomiaru przemieszczenia rzędu  $\pm 10\mu\text{m}$ , otrzymujemy pomiar kąta rzędu pojedynczych sekund kątowych. Niestety zakres pomiarowy wynosi około 2mm (dla wiązki laserowej o średnicy 8mm) i aby zwiększyć ten zakres konieczna była by znaczna modyfikacja układu kolimacyjnego.



*Rys.4.2.56. Optyka do pomiarów kątowych firmy Renishaw (lub inna) w zestawie z interferometrem z rozszerzeniem proponowanym przez autora umożliwia pomiar błędu „roll”.*



## Literatura

- [4.01] LASOS Lasertechnik GmbH, "*LGR7655S – Helium Neon Laser Tube for OEM Application*", Karta katalogowa, [www.lasos.com](http://www.lasos.com), 10-05-2006
- [4.02] „*Dokumentacja techniczna czujników temperatury serii KTY-13*”, [www.infineon.com](http://www.infineon.com), 10.05.2006
- [4.03] <http://www.vermontphotonics.com/articles/smallanglesautocoll.html> , 2007.11.27

# 5

## Analiza czynników mających wpływ na wyniki pomiaru

### 5.1. WPROWADZENIE

Pomiary różnych wielkości są stosowane od tysięcy lat. Celem ich jest ustalenie wartości właściwości rzeczywistych obiektów lub zjawisk, które często, dodatkowo, ulegają zmianie pod wpływem różnych czynników zewnętrznych.

Podczas pomiaru właściwości realnych obiektów porównuje się z właściwościami odpowiednich wzorców pomiarowych.

Przydatność każdej metody pomiarowej, szczególnie wykorzystującej nowe narzędzie pomiarowe, musi być potwierdzone przez analizę możliwych źródeł błędów, oszacowania ich wielkości i uwzględnienia w ostatecznej ocenie. W przypadku, kiedy źródeł błędów jest bardzo dużo lub niemożliwe jest określenie ich źródeł i wielkości, szacuje się niepewność pomiaru opracowanej metody lub pomiaru na podstawie wyniku serii pomiarów oraz analizy statystycznej otrzymanych danych i rachunku prawdopodobieństwa.

#### 5.1. ANALIZA CZYNNIKÓW MAJĄCYCH WPŁYW NA WYNIKI POMIARU W PROPONOWANYM SYSTEMIE DO DOKŁADNYCH POMIARÓW PRZESTRZENNYCH.

Rozwój technik pomiarowych często pociąga za sobą rozwój przyrządów pomiarowych i większą złożoność przyjmowanych wzorców (np.: wzorzec metra w postaci stabilizowanego lasera He-Ne z komórką jodową; **Rozdział 1, Rozdział 2**). Większa złożoność przyrządu pomiarowego (zarówno części sprzętowej jak i programowej) zwiększa ilość czynników mogących mieć wpływ na wynik pomiaru.

W opracowanym przez autora systemie pomiarowym wykorzystywane są dwie techniki pomiarowe:

- pierwsza, cyfrowa: wykorzystująca zliczanie prążków interferencyjnych światła laserowego w układzie interferometru Michelsona,
- druga, analogowa: wykorzystująca bezpośredni pomiar pozycji wiązki laserowej przez pomiar rozkładu napięcia na detektorze kwadrantowym lub rozkładu prądów na detektorze PSD.

Rozdzielczość oraz dokładność pomiarów interferometrycznych jest uwarunkowana głównie przez stałość generowanej częstotliwości fali świetlnej oraz sposób kompensacji zmian jej długości. Najistotniejsze jest więc zapewnienie stabilnych temperaturowo

warunków pracy dla systemu pomiarowego lub możliwość wprowadzenia poprawek długości fali lasera w powietrzu w zależności od zmian wielkości środowiskowych.

Czynniki mające wpływ na dokładność pomiaru pozycji wiązki na detektorze pozycji (kwadrantowym lub PSD) można podzielić na dwie grupy:

- wynikające z lokalizacji plamki na detektorze,
- wynikające ze zmian pozycji wiązki pod wpływem czynników zewnętrznych.

Błędy pomiaru pozycji wiązki na detektorze wynikające z błędów lokalizacji plamki na detektorze można podzielić na:

- spowodowane zakłóceniami (szumami) elektroniki układu pomiarowego (w tym detektora),
- wynikające z niejednorodności rozkładu natężenia wiązki na detektorze, jakości wiązki laserowej, jakości elementów optycznych w torze pomiarowym (w tym, w szczególności niejednorodności kryształu w komórce ciekłokrystalicznej). Czynnikiem ten ma znacznie mniejsze znaczenie przy zastosowaniu detektora PSD do detekcji pozycji wiązki, co zostanie opisane w dalszej części rozdziału.

Błędy pomiaru pozycji wiązki na detektorze spowodowane zmianami pozycji wiązki pod wpływem czynników zewnętrznych można podzielić na:

- wynikające z występowania drgań w osiach prostopadłych do osi wiązki laserowej,
- drgań, zmian kątowych osi wiązki laserowej (pointing stability lasera He-Ne, drgania mechaniczne)
- wynikające z fluktuacji powietrza (termicznych); częściowo kompensowane przez istnienie wiązki w powrotnym torze pomiarowym lub/i minimalizowane przez zestawienie stanowiska pomiarowego w stabilizowanym termicznie pomieszczeniu, np.: w laboratorium pomiarowym.

### **5.1.1. BADANIA STAŁOŚCI CZĘSTOTLIWOŚCI OPRACOWANEJ GŁOWICY INTERFEROMETRU LASEROWEGO.**

Najistotniejszym parametrem głowicy laserowej przeznaczonej do zastosowania w laserowej interferometrii jest stałość częstotliwości sygnału wyjściowego oraz odtwarzalność tej częstotliwości przy załączeniach lasera w różnym okresie czasu (w odstępach minutowych, godzinowych, tygodniowych, itd.).

Pomiar stałości częstotliwości lasera może być wykonany przez porównanie częstotliwości dwóch identycznych laserów (zbliżona długość generowanej fali, zbliżona moc wiązki laserowej). Najlepiej, aby laser referencyjny był laserem o stałości częstotliwości co najmniej o rząd większej od stałości częstotliwości lasera badanego.

Stabilność częstotliwości opracowanego lasera była mierzona przez zdudnienie z wzorcem częstotliwości stabilizowanym w oparciu o nasyconą absorpcję w jodzie, zbudowanym przez dr.S.Sambora w Katedrze Teorii Pola i Elektroniki Kwantowej Politechniki Wrocławskiej [2.16], zgodnie ze schematem układu pomiarowego w **Rozdziale 2.4**. Wykorzystany w pomiarze wzorec dla stałej uśredniania 10 sekund posiadał stałość częstotliwości analizowaną za pomocą wariancji Allana wynoszącą około  $3,3 \cdot 10^{-12}$ , co jest

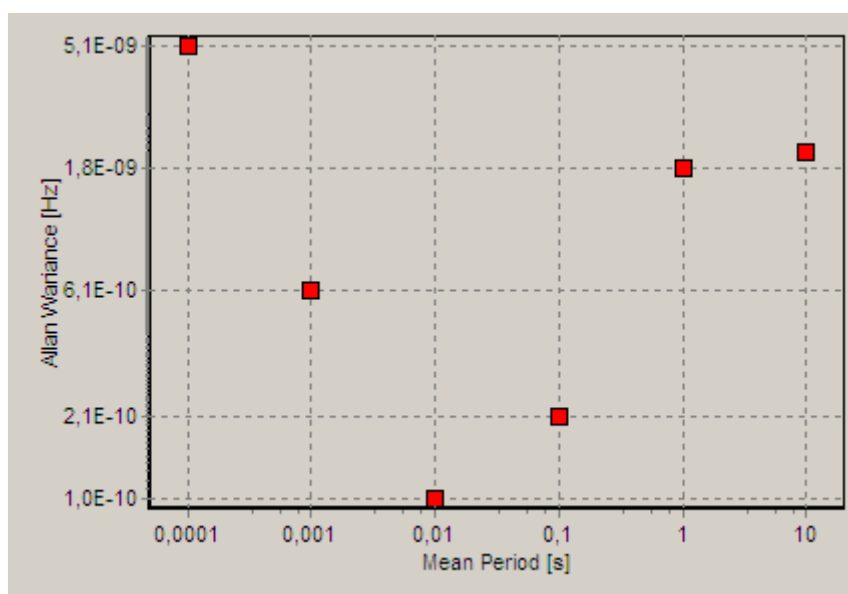
wynikiem typowym dla lasera HeNe/I<sub>2</sub>, oraz wystarczającym do zastosowania jako laserowego wzorca częstotliwości w procesie kalibracji wykonanego przez autora interferometru laserowego.

Zaletą pomiarów ze wzorcem jest możliwość określenia nie tylko stabilności, ale również bezwzględnej wartości częstotliwości lasera. Wadą tego rozwiązania jest natomiast konieczność wykonywania pomiarów w specjalnym laboratorium.

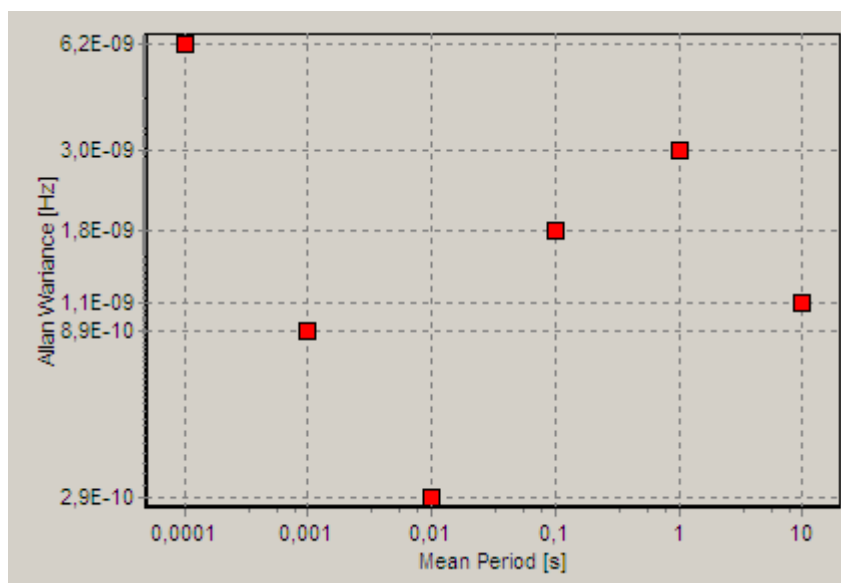
We wszystkich wykonanych badaniach stabilności kontrolowana była częstotliwość tylko jednego modu podłużnego lasera dwumodowego (semi-dwumodowego), ponieważ odległość międzymodowa zmienia się w pomijalnym stopniu (1087-1089 MHz; [3.09]).

Pomiary stabilności lasera były wykonane w trzech punktach stabilizacji wzorca jodowego na pikach: d, e, g.

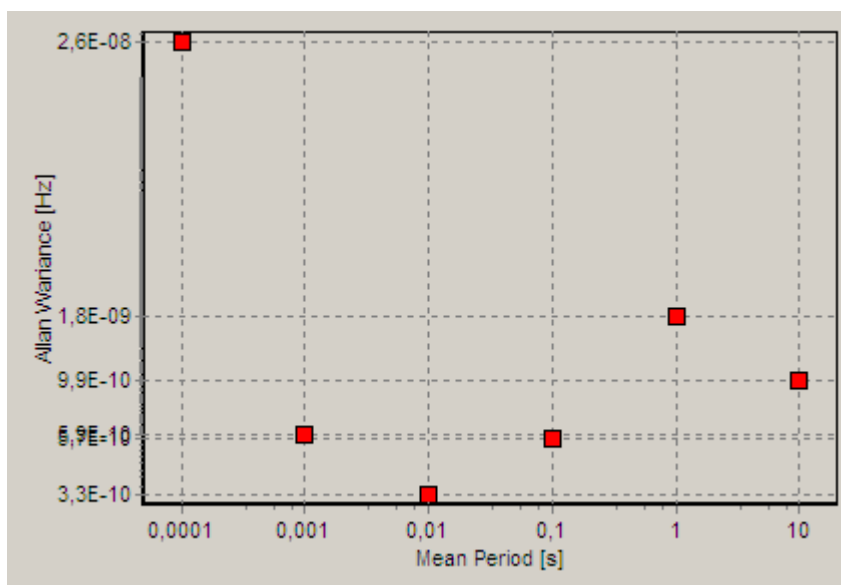
Na rysunkach **Rys.5.1.1-5.1.3** przedstawiono wyniki pomiaru stabilności częstotliwości liczonej metodą wariacji Allana. Wyniosła ona w najgorszym przypadku  $2.6 \cdot 10^{-8}$  Hz dla pomiarów o okresie 100 μs. Ponieważ pomiary wykonywane były w warunkach poza laboratoryjnych (pomieszczenia na drugim piętrze budynku uczelni, na zwykłym stole), należy oczekiwać, że wyniki mogą być lepsze w warunkach laboratoryjnych. Należy zauważyć, że dla pomiarów z takim cyklem czasowym istotne są zakłócenia w postaci szybkich wibracji, uderzeń, impulsów elektromagnetycznych. W przypadku zakłóceń typowo mechanicznych zmniejszona byłaby stałość przy pomiarach z cyklem 1ms, 10ms, 100ms. Otrzymane wyniki wskazują na zakłócenia elektromagnetyczne lub błędy w konstrukcji układu stabilizacji głowicy laserowej interferometru lub wzorca. Wraz z dalszym wydłużaniem czasu pomiarów istotniejszy wpływ mają np.: zmiany temperatury.



**Rys. 5.1.1. Stabilność częstotliwości opracowanej głowicy laserowej liczona metodą wariacji Allana. Wzorec stabilizuje na pikie d w średniej odległości 187MHz od modu głównego głowicy interferometru.**



**Rys. 5.1.2. Stabilność częstotliwości opracowanej głowicy laserowej liczona metodą wariancji Allana. Wzorzec stabilizuje na pikie e, w średniej odległości 173MHz od modu głównego głowicy interferometru.**



**Rys. 5.1.3. Stabilność częstotliwości opracowanej głowicy laserowej liczona metodą wariancji Allana. Wzorzec stabilizuje na pikie g, w średniej odległości 145MHz od modu głównego głowicy interferometru.**

Podczas serii pomiarów stałości częstotliwości metodą wariancji Allana obserwowana była jednocześnie zmiana częstotliwości spowodowana wyłączeniem, wychłodzeniem i ponownym włączeniem głowicy lasera do uzyskania stabilności. **Odtwarzalność częstotliwości** lasera He-Ne nigdy nie była gorsza niż około  $2,8 \cdot 10^{-8}$  (co odpowiada zmianom częstotliwości o około 12 MHz), pomimo zmian temperatury otoczenia w zakresie około 15°C.

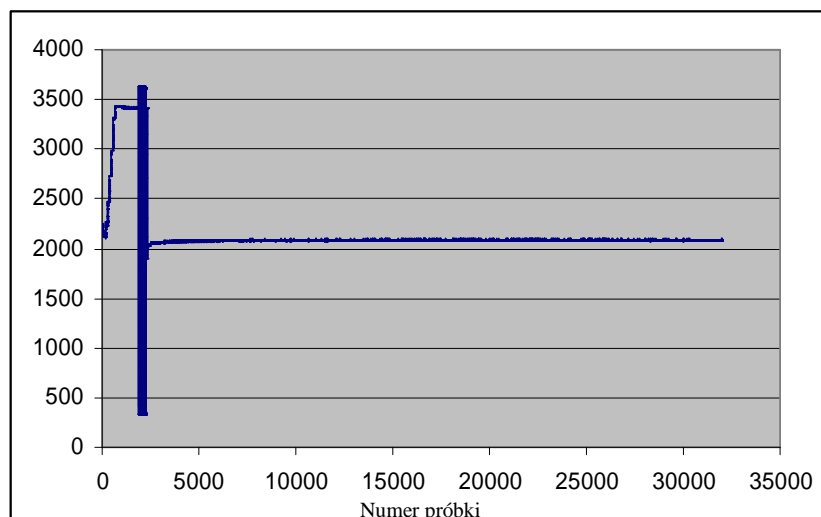
Jak już zostało wielokrotnie wspomniane, w pomiarze interferometrycznym długość fali światła laserowego jest wielkością wzorcową (wzorcem długości). Niestabilność lasera przekłada się bezpośrednio na wartość błędu pomiaru przemiedzczenia. Stabilność lasera na poziomie 1ppm ( $10^{-6}$ ) powoduje powstanie na odcinku 1m błędu 1µm.

Błąd stabilności lasera jest bardzo istotny przy pomiarach w próżni (gdy pomijany jest wpływ czynników środowiskowych) szczególnie przy pomiarze długości rzędu nanometrów, oraz w przypadku stosowania laserów o małej stabilności. Stałość częstotliwości generowanej fali stosowanych laserów gazowych He-Ne na poziomie  $10^{-8}$ Hz pozwala pominąć błąd stabilności lasera w ogólnym rachunku błędów.

Zmierzona stałość częstotliwości jest więc co najmniej dobra i wystarczająca do pomiarów interferometrycznych w warunkach przemysłowych jak i laboratoryjnych.

Jedną z ważniejszych cech głowicy laserowej przeznaczonej do pracy w środowisku przemysłowym jest stopień jej odporności na zmiany temperatury zewnętrznej. W hali przemysłowej, w przeciwieństwie do laboratorium, trudno jest kontrolować temperaturę otoczenia. Podczas zimy zdarza się, że temperatura w halach spada poniżej  $15^{\circ}\text{C}$  a w lecie przekracza  $30^{\circ}\text{C}$ . Drugim problemem jest częste występowanie w halach przemysłowych ruchu powietrza. Obie sytuacje powodują zmniejszenie współczynnika rezystancji termicznej obudowy i zaburzenie warunków pracy lasera He-Ne. W zmodyfikowanej wersji układu stabilizacji, w której mikrokontroler monitoruje pracę układu stabilizacji głowicy pomiarowej interferometru, została zaimplementowana procedura modyfikacji niektórych wartości układu pętli stabilizacji temperatury obudowy w przypadku dużych zmian temperatury otoczenia (takich, które „wyrzucą” układ ze stabilnej pracy; zmiana o kilkanaście  $^{\circ}\text{C}$ ). Powoduje to niestety chwilową przerwę w pracy układu, póki nie zostaną zastosowane nowe wartości parametrów, co trwa od kilku do kilkunastu minut.

Na rysunku 5.1.4 przedstawiony jest wykres sygnału błędu układu stabilizacji w okresie około dwóch godzin. Podczas prób, stwierdzono, że dla zmian temperatury w granicach około  $\pm 5^{\circ}\text{C}$ , przy temperaturze początkowej  $25^{\circ}\text{C}$ , układ może pracować stabilnie przez wiele dni. Ponieważ zbudowany prototyp układu stabilizacji lasera jest układem mikroprocesorowym, zmiany temperatury, destabilizujące pracę lasera, powodują zmianę parametrów układu stabilizacji w mikroprocesorze w taki sposób by był możliwy ponowny powrót do stabilnej pracy.



**Rys.5.1.4. Wykres sygnału wyjściowego wzmacniacza synchronicznego podczas przestrajania lasera oraz moment załączenia pętli stabilizacji. Oś pionowa (Y) przedstawia zmiany napięcia na przetworniku a/c procesora w zakresie od około  $-12\text{V}$  do  $12\text{V}$  w układzie stabilizacji lasera na równowagę dwóch modułów. Czas zbierania 10000 próbek wynosił 2000 sekund.**

W wybranym układzie heterodynowym pomiaru prążków interferencyjnych, sygnały referencyjny oraz pomiarowy są natychmiast po detekcji zamieniane na postać cyfrową. W

takim przypadku na wartość zmierzoną mogą mieć tylko wpływ błędy przypadkowe: zakłócenia w zasilaniu przyrządu, bardzo silne zakłócenia elektromagnetyczne.

Podczas uruchamiania głowicy interferometru problemem okazało się to, że występuje przenikanie sygnału taktującego kryształ układu stabilizacji do sygnału referencyjnego. Wynikiem czego były dodatkowe przełączenia na zboczach i niewłaściwa praca układu liczników (**Rys.5.1.5**). Sygnał zakłócający przenikał nie tylko poprzez zasilanie głowicy pomiarowej, masę układu, ale również przez promieniowanie. Usterka taka jest bardzo prosta do detekcji, ponieważ sprawdzając układ interferometru, kiedy w torze pomiarowym znajduje się tylko retropryzmat, oba sygnały: pomiarowy i referencyjny powinny mieć idealnie tę samą częstotliwość i różnica tych wartości częstotliwości musi dać wynik zero.



**Rys.5.1.5. Zakłócenia referencyjnego sygnału Zeemana wywołane przenikaniem sygnału z układu taktującego komórkę z ciekłym kryształem w układzie stabilizacji częstotliwości lasera.**

Ostatnią grupą błędów są te wynikające z niewłaściwego zastosowania bądź użycia interferometru.

Najważniejszym czynnikiem jaki należy uwzględnić podczas pomiaru jest wpływ wielkości środowiskowych (ciśnienie, temperatura oraz wilgotność) na długość fali w

powietrzu oraz wpływ, głównie temperatury, na rzeczywistą długość mierzonego przedmiotu lub maszyny.

Zgodnie z równaniami **1.2.20** – **1.2.22** zmiana temperatury otocznia o  $1^{\circ}\text{C}$  powoduje ponad trzy razy większe zmiany wartości współczynnika załamania światła niż zmiana ciśnienia o  $1\text{hPa}$  oraz o dwa rzędy większe zmiany niż zmiana wilgotności o  $1\%$ . Bez włączonej kalibracji tych wielkości, zakładając dopuszczalną temperaturę pracy w zakresie od  $15^{\circ}\text{C}$  do  $35^{\circ}\text{C}$ . W najgorszym przypadku błąd pomiaru (wynikający ze zmiany temperatury) może wynosić  $20\mu\text{m}/\text{metr}$  przemieszczenia retropryzmatu. Dla występującej w Polsce zmiany ciśnienia w zakresie od  $940\text{hPa}$  do ok.  $1060\text{hPa}$  oznacza to błąd pomiaru wynoszący około  $40\mu\text{m}/\text{metr}$ . Najmniejszy wpływ ma zmiana wilgotności, dla której zmiana w zakresie  $0\%$  do  $100\%$  spowoduje błąd pomiaru rzędu  $1\mu\text{m}$  na metr przesunięcia retropryzmatu w torze pomiarowym. Oczywiście żadna z tych wielkości nie zmienia się w takim zakresie podczas pomiaru. Określone zostały tylko maksymalne błędy mogące się pojawić w hipotetycznej sytuacji. Dla rzeczywistych, występujących w miejscu pomiaru zmian wielkości czynników środowiskowych w układzie bez kompensacji zmian długości fali wiązki laserowej, błąd pomiaru nie będzie najczęściej przekraczał  $10\mu\text{m}/\text{metr}$  przemieszczenia retropryzmatu.

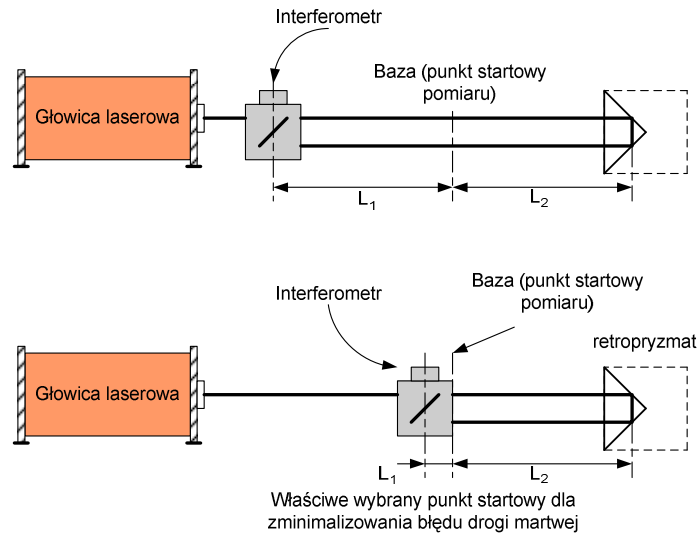
W systemie gdzie podczas kompensacji zmian długości fali lasera są uwzględniane wielkości środowiskowe, stosunek składowych błędów pozycjonowania jest inny. Zakładając pomiar temperatury z dokładnością  $\pm 0,05^{\circ}\text{C}$ , ciśnienia z dokładnością  $\pm 0,1\text{hPa}$  oraz wilgotności z dokładnością  $\pm 5\%$ , maksymalny błąd pozycjonowania wynikający z wpływu czynników środowiskowych wynosi około  $0,2\mu\text{m}/\text{metr}$ . Wzrasta procentowy udział innych błędów, szczególnie drogi martwej i błąd cosinusa.

Błąd drogi martwej jest bezpośrednio powiązany ze zmianami wielkości środowiskowych, temperatury maszyny i powstaje z niewłaściwego lub nieoptymalnego ustawienia układu optycznego (polaryzacyjnej kostki dzielącej z retropryzmatem i retropryzmatu pomiarowego). Jest to błąd powstały w wyniku nieskompensowania pewnej długości ścieżki światła laserowego i pojawia się, gdy zmieniają się wielkości środowiskowe (zmienia się długość fali).

Droga martwa jest odległością pomiędzy interferometrem optycznym (zestawem polaryzacyjnej kostki dzielącej z retropryzmatem) i punktem początkowym pozycji pomiarowej (miejscem rozpoczęcia pomiaru;  $L_1$ ; rysunek **Rys.5.1.6**). Przy zmianie współczynnika załamania (wynikającej ze zmiany wielkości środowiskowych) lub zmiany geometrii maszyny, zmierzona wielkość przesunięcia nie zostanie skompensowana, ponieważ system nie zarejestrował takiej zmiany przesunięcia.

Błąd ten jest szczególnie dotkliwy w systemach, w których interferometr jest zespolony w jednej obudowie z laserem (np.: system firmy Optodyne).



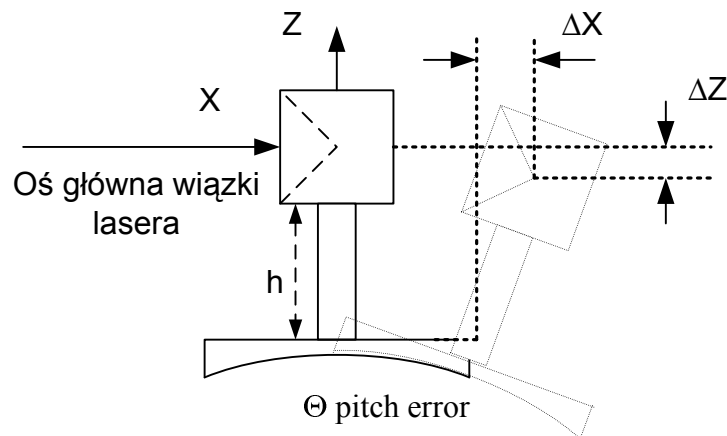


**Rys.5.1.6. Sposób minimalizacji drogi martwej  $L_1$  dla układu pomiaru przemieszczenia lub pozycjonowania maszyny. Odległość  $L_2$  stanowi właściwy odcinek mierzonego przemieszczenia. Odcinek  $L_1$  powinien być jak najkrótszy.**

Udział tego błędu w całkowitym błędzie pomiaru przemieszczenia jest łatwy do wyliczenia, ale jest on zależny od konkretnego układu pomiarowego (aplikacji). Jego wartość może się zmieniać od ułamka  $\mu\text{m}/\text{m}$  do kilkudziesięciu  $\mu\text{m}/\text{m}$ .

Ostatnimi błędami w tej kategorii są błędy cosinusa i Abbego (**Rozdział 1, Rys 1.2.28, Rys 1.2.29**).

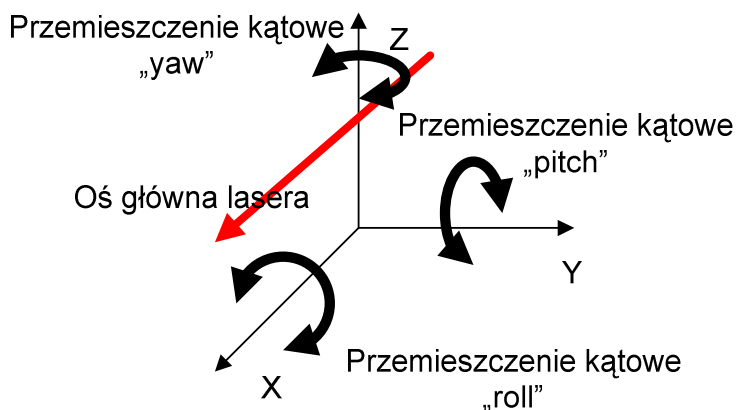
Błąd Abbego (**Rys.5.1.7, Rys.1.2.29**) powodujący powstanie dodatkowego przesunięcia w osi X, Y, Z w wyniku niewłaściwego prowadzenia retropryzmatu w torze pomiarowym układu Michelsona bezpośrednio wpływa na analogowy pomiar przesunięcia w osiach Y i Z (również na pomiar interferometryczny w osi głównej lasera).



**Rys.5.1.7.1. Ilustracja błędu Abbego przy występowaniu ruchów retropryzmatu w płaszczyźnie XZ („pitch”; definicja w tekście).**

Błąd Abbego powstaje równoległe z pojawieniem się ruchów kątowych Pitch oraz/lub Roll (**Rys.5.1.7.2**). Może zostać zminimalizowany przez skrócenie wysokości podstawy retropryzmatu  $h$  oraz wydłużenie suportu maszyny.

Nie jest możliwe jednoznaczne stwierdzenie występowania tego czynnika w bilansie błędów, ponieważ nie jest możliwe odróżnienie faktycznego przesunięcia retropryzmatu w osi Y i osi Z wynikającego z nierównomierności drogi, od przesunięcia retropryzmatu wynikającego z występowania tego błędu.



Rys.5.1.7.2. Ilustracja błędu pitch, roll, yaw.

Błąd cosinusa polegający na tym, że oś główna wiązki lasera nie jest równoległa z osią ruchu narzędzia obróbczego może być spowodowany trzema źródłami: złego justowania systemu laserowego, drganiem kątowymi głowicy laserowej oraz stabilnością kierunku propagacji wiązki laserowej (*ang. Pointing Stability*). Pierwsze dwa źródła można zminimalizować poprzez właściwe, ponowne justowanie toru pomiarowego oraz sztywny montaż głowicy pomiarowej.

Stabilność kierunku propagacji wiązki laserowej (*ang. Pointing Stability*) jest jednym z ważniejszych parametrów laserów. Samoistne, niekontrolowane zmiany kierunku propagacji wiązki laserowej mają charakter losowy i są szczególnie niepożądane w takich aplikacjach jak pomiary dużych przemieszczeń czy laserowe systemy metrologiczne pracujące na zasadzie pomiaru położenia wiązki, w szczególności w rozwiązaniu proponowanym przez autora.

Wartość Pointing Stability, zależna jest od konstrukcji lasera, jego długości i zawiera się w zakresie od ułamka  $\mu$ radiana do setek miliradianów [5.01]. Główną przyczyną przemieszczania się wiązki laserowej są szumy plazmy, na które mamy niewielki wpływ oraz temperatura, a dokładniej precyzja jej stabilizacji. Producent użytego lasera He-Ne firma LASOS nie podaje tego parametru dla swojego produktu, jednak w przypadku podobnej konstrukcji firmy JDS Uniphase stabilność kierunku propagacji wiązki laserowej po 15-sto minutowym wygrzewaniu wynosi około 0,2 miliradiany co odpowiada przesunięciu rzędu  $200\mu\text{m}$  w osiach Y i Z w odległości 1 metra od lasera. W przypadku lasera stabilizowanego wartość ta może zostać zmniejszona do kilku  $\mu$ radianów (1mW laser Spectra-Physics lub 1,7  $\mu$ radianów dla lasera 10mW, 5.01). Zmiany pozycji w osiach Y i Z w odległości 1 metra od lasera będą wynosiły około  $1\mu\text{m}$  na zmianę kierunku propagacji o 1  $\mu$ radian.

Wszystkie wymienione zmiany katowe w propagacji wiązki mają bardzo duże znaczenie dla dokładności pomiaru przemieszczenia. Szybkie zmiany losowe jak: wibracje przenoszące się na głowicę systemu pomiarowego oraz wpływ Pointing Stability lasera są uśredniane zarówno podczas zbierania danych przetwornikiem a/c z detektora pozycji (uśredniane jest 16 próbek) jak i na komputerze PC podczas kilkusekundowego pomiaru pozycji wiązki laserowej (pomiaru przemieszczenia). Zmiany trwające kilkadziesiąt sekund

lub liczone w minutach muszą być wyeliminowane przez zapewnienie właściwych warunków na stanowisku pomiarowym.

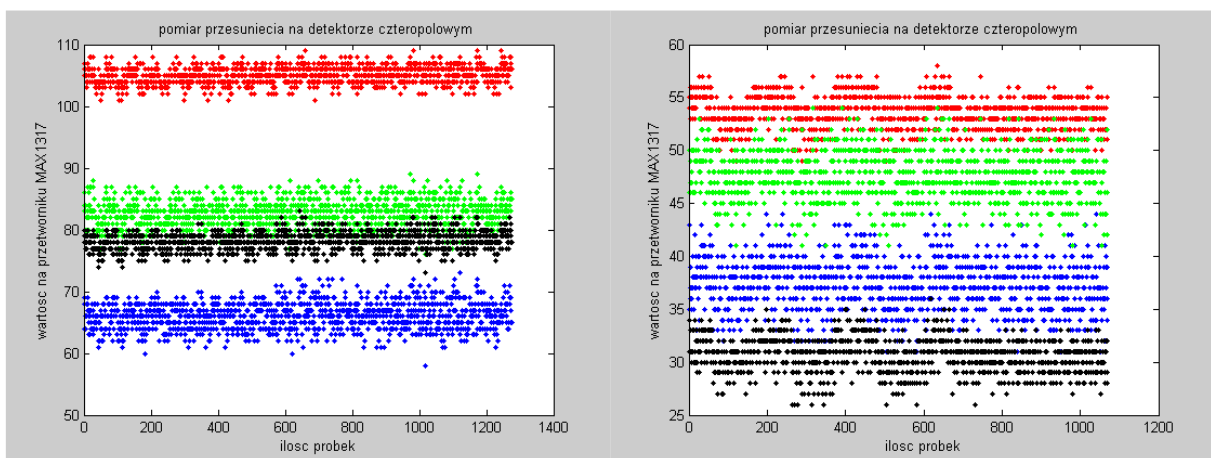
### 5.1.2. ANALIZA ŹRÓDEŁ BŁĘDÓW POMIARU WYNIKAJĄCYCH Z NIEWŁAŚCIWEJ LOKALIZACJI PLAMKI NA DETEKTORZE.

Błędy pomiaru pozycji wiązki na detektorze kwadrantowym ( lub PSD) wynikają bezpośrednio z trzech czynników:

- zakłóceń wprowadzanych przez elektronikę systemu pomiarowego, w tym jakości toru wiązki pomiarowej i jakości optycznego toru pomiarowego,
- zakłóceń zewnętrznych w postaci drgań mechanicznych i akustycznych oraz zakłóceń elektromagnetycznych o dużym natężeniu. Wpływ tych źródeł może zostać zminimalizowany przez właściwe zestawienie układu pomiarowego, z dala od źródeł zakłóceń termicznych, elektromagnetycznych i mechanicznych.
- błędów w przeliczaniu danych pozycji z przetwornika tj.: niewłaściwe współczynniki skalowania wartości zmierzonej przez przetwornik a/c oraz niewłaściwe współczynniki linearyzacji wartości odczytanej detektora kwadrantowego lub PSD.

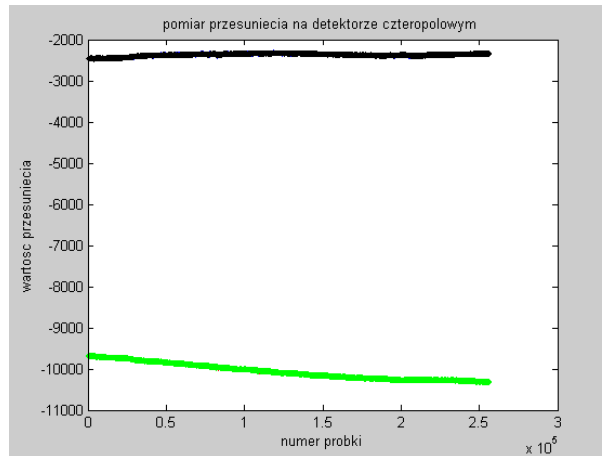
Wykorzystany przetwornik MAX1318 jest osiemnastobitowym, czterokanałowym przetwornikiem z jednoczesnym próbkowaniem. Maksymalny błąd przetwornika wynosi wg. producenta  $\pm 1,5$  najmniej znaczącej cyfry. Stosunek sygnał szum wynosi 90dB a współczynnik zawartości harmonicznych -86dB.

Ilość zakłóceń, która faktycznie trafia do przetworzonych danych była mierzona bezpośrednio w układzie. Wejścia wzmacniaczy buforujących (U1, *Rys.4.2.43.1 – Rozdział 4*) zostały zwarte do masy. Następnie odczytano około tysiąca próbek bezpośrednio z przetwornika, bez uśredniania. Wynik przedstawiono na *Rys.5.1.8*. Rozbieżne wyniki w obu wykresach wynikają najprawdopodobniej z rozrzutu parametrów elementów w poszczególnych torach (parametrów wzmacniaczy lub rezystorów). Maksymalny szum wynosi około 3,5 najmniej znaczących bitów przetwornika. Zmiany wartości o 3,5 bita, przy przyjętym w dalszych pomiarach współczynnika skalowania odpowiadałaby błędowi przemieszczenia rzędu  $\sim 0,01\mu\text{m}$ . Jest więc to wartość do pominięcia w dalszych rozważeniach.



*Rys.5.1.8. Przykłady wykresów przedstawiających rozrzut odczytów wartości napięć na wejściach przetwornika MAX1317 (dla czterech wejść) przy zwartych do masy wejściach wzmacniaczy buforujących. Dwa różne pomiary dla różnych okresów pomiarowych i różnych warunków środowiskowych otoczenia.*

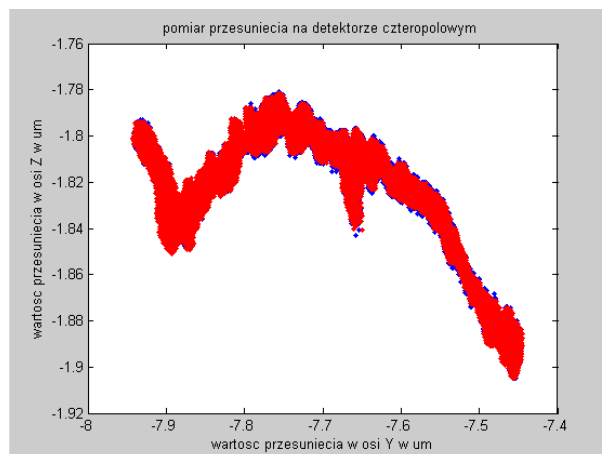
Kolejnym etapem było dołączenie detektora kwadrantowego i kolejny pomiar bez źródła światła. W tym momencie możliwe jest określenie, jakim w rzeczywistości szumem charakteryzuje się detektor. Warto zauważyć, że pomiar dotyczy całego układu elektronicznego pomiaru przesunięcia, ale nie uwzględnia zakłóceń wprowadzanych przez optykę w torze pomiarowym a w szczególności komórki z ciekłym kryształem.



**Rys.5.1.9.** Wykres przedstawiający samoczynną zmianę mierzonej pozycji spowodowaną szumem części elektronicznej układu pomiaru przemieszczenia z podłączonym detektorem kwadrantowym lub/i zmianami temperatury układu pomiarowego pozycji wiązki (np.; wskutek wygrzewania się głowicy) . Częstotliwość pomiaru w układzie wynosi 1kHz. Na osi Y przedstawiono pozycje wiązki w osiach Y i Z wyliczone zgodnie z równaniami 1.2.25 i 1.2.26 z rozdziału pierwszego względem numeru próbki.

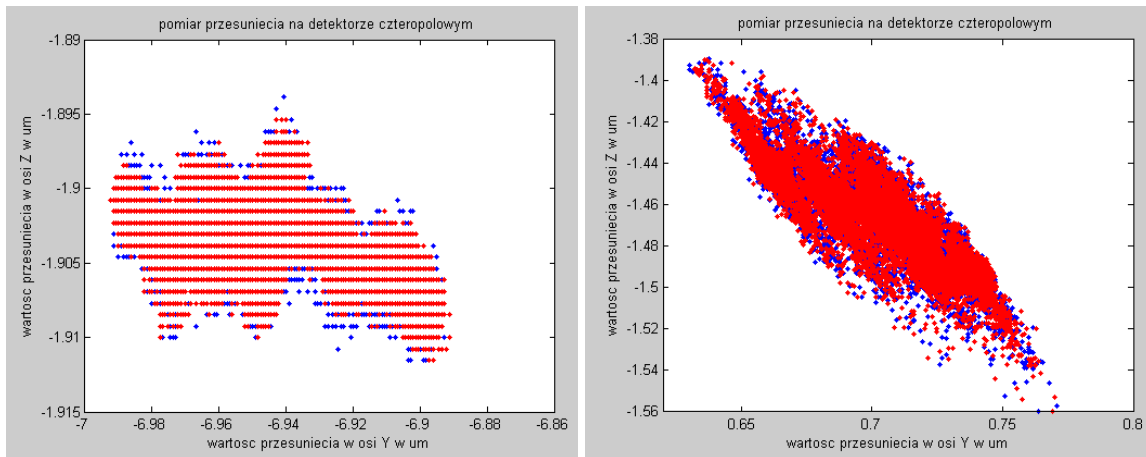
Zarejestrowane zakłócenia są minimalnie większe niż dla układu ze zwartymi do masy wejściami wzmacniaczy buforujących. Prawdopodobnie przyczyną nie jest sam detektor, ale szumy przenikające po jego zasilaniu. Według producenta szum detektora powinien być mniejszy niż  $2 \cdot 10^{-14} \text{ W/Hz}^{1/2}$ . Możliwe jest również występowanie dryftu wynikającego z nagrzewania się przedniej części głowicy pomiarowej od stabilizowanego temperaturowo lasera He-Ne.

**Rysunek 5.1.10** przedstawia te same dane jak na **Rys.5.1.9** jednak zostały one przeliczone na przemieszczenie w osiach Y i Z zgodnie z równaniami 1.2.25 i 1.2.26 z rozdziału pierwszego oraz dodatkowo przeskalowane na wartość przesunięcia w  $\mu\text{m}$  .



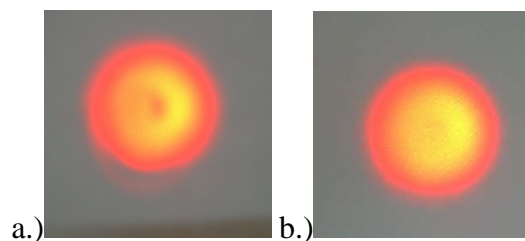
**Rys 5.1.10.** Wykres przedstawiający zmianę mierzonej pozycji wiązki na detektorze kwadrantowym, spowodowaną zakłóceniami w torze pomiarowym.

Wartość mierzonego przemieszczenia okazała się zależna od parametrów układu stabilizacji lasera i trybu pracy w której układ stabilizacji się znajdował.

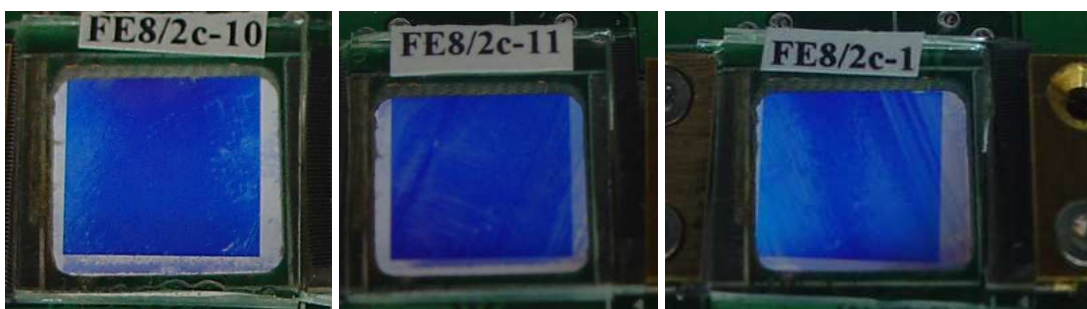


**Rys 5.1.11.** Wykresy przedstawiające zmianę mierzonej pozycji wiązki na detektorze kwadrantowym, spowodowaną zakłóceniami w elektronice toru pomiarowego. Charakter i zakres zmian zależny jest od trybu pracy układu stabilizacji, wprowadzając mniej lub więcej zakłóceń przenoszących się prawdopodobnie poprzez zasilanie detektora kwadrantowego.

Ostatnim etapem próby oszacowania błędu pomiaru pozycji wiązki mogłoby być wyznaczenie wpływu braku jednorodnego rozkładu mocy w wiązce laserowej (**Rys 5.1.12**) jednak ze względu na bardzo duże zanieczyszczenia w komórkach z ciekłym kryształem (**Rys 5.1.13**) przełączającą polaryzację wiązki padającej na detektor kwadrantowy, sensowniejszy wydaje się być pomiar szumu całego toru pomiarowego i oszacowanie maksymalnego błędu w tym torze. W innym przypadku należałoby dysponować wzorcową komórką, bez zanieczyszczeń, wzorcową optyką oraz źródłem światła o jednorodnym rozkładzie mocy.

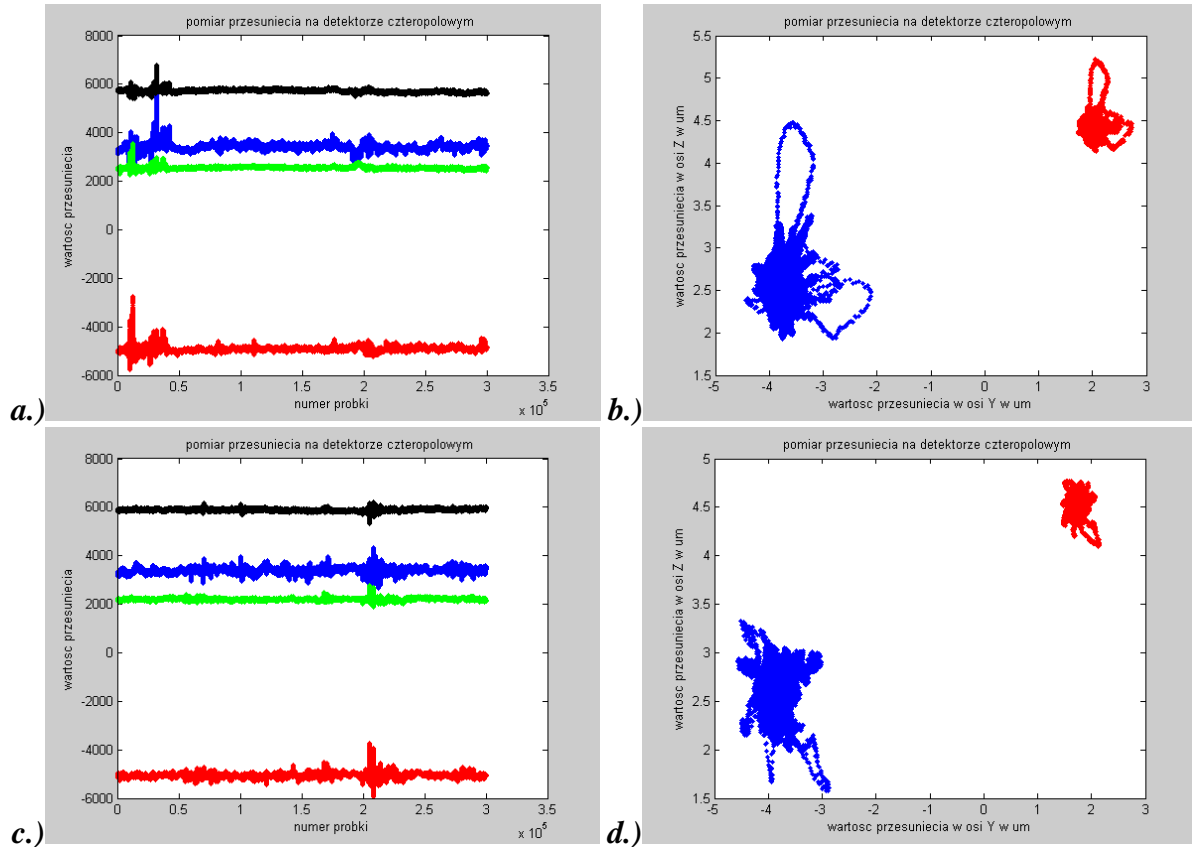


**Rys 5.1.12.** Zdjęcia przedstawiające rozkład natężenia mocy w wiązce laserowej. Różnice wynikają z jakości układu kolimującego. Na rysunku b. widoczny rozkład przypominający gaussowski.



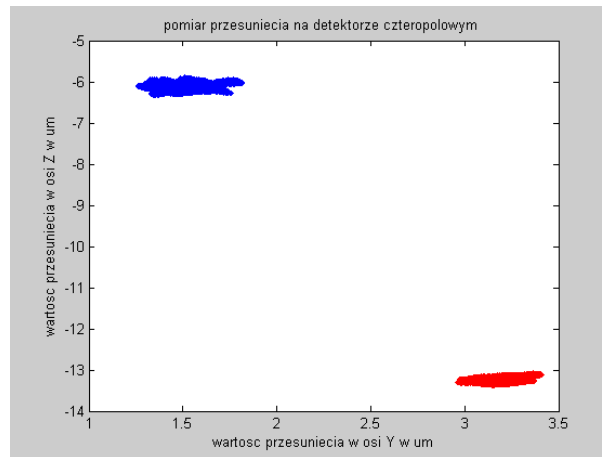
**Rys 5.1.13.** Zdjęcia przedstawiające zanieczyszczenia w stosowanych komórkach z ciekłym kryształem.

Pomiary zostały wykonane w konfiguracji do pomiaru przemieszczenia (**Rys.4.2.47**). Interferometr optyczny i retropryzmat zostały umieszczone w różnych odległościach od głowicy interferometru a następnie wykonane zostały serie pomiarów przemieszczenia na detektorze kwadrantowym oraz osobno na detektorze PSD.



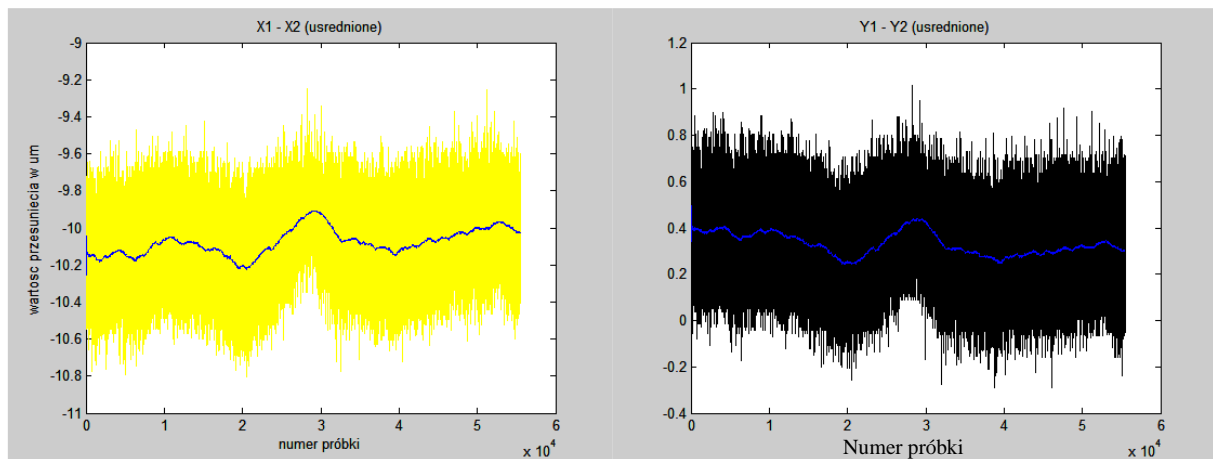
**Rys 5.1.14.** Wykresy przedstawiające zmianę pozycji mierzonej pozycji wiązki na detektorze kwadrantowym, spowodowaną zakłóceniami w torze pomiarowym. Rys „a” oraz „c” przedstawiają zmianę pozycji względem numeru próbek. Rys „b” oraz „d” przedstawiają zmiany w osiach Y i Z dla wszystkich próbek z wykresu „a” oraz „c”. Widoczne zakłócenia mechaniczne (wprowadzone sztucznie) w układzie pomiarowym. Różne wartości wielkości zakłóceń dla obu polaryzacji, widoczne na wykresie po prawej stronie, wskazują na występowanie zakłóceń kątowych. Częstotliwość pomiaru w układzie wynosi 1kHz. Odległość interferometru optycznego od głowicy lasera wynosiła 75cm, odległość retropryzmatu od głowicy 240cm.

Na rysunku **Rys.5.1.14** przedstawione zostały wyniki pomiaru, przemieszczeń jakie dodają się do wskazań układu pomiaru pozycji wiązki laserowej na detektorze kwadrantowym. Ujawnił się silny wpływ zakłóceń najprawdopodobniej mechanicznych przenoszących się na zmianę kąta pomiędzy osią wiązki laserowej a osią przyjętego układu odniesienia (osi mierzonej). Widoczne na wykresach efekty zakłóceń nie przekraczały wartości 2 $\mu$ m przy odległości retropryzmatu od głowicy interferometru laserowego wynoszącej 240cm. Dla mniejszych odległości (**Rys. 5.1.15**) wpływ zakłóceń jest mniejszy. Wpływ drgań kątowych głowicy pomiarowej na wartości przesunięcia obu polaryzacji (**Rys.5.1.14 - 5.1.15**) jest proporcjonalny do odległości w układzie pomiarowym. Zależność ta może zostać wykorzystana do częściowej kompensacji błędu pomiaru pozycji.

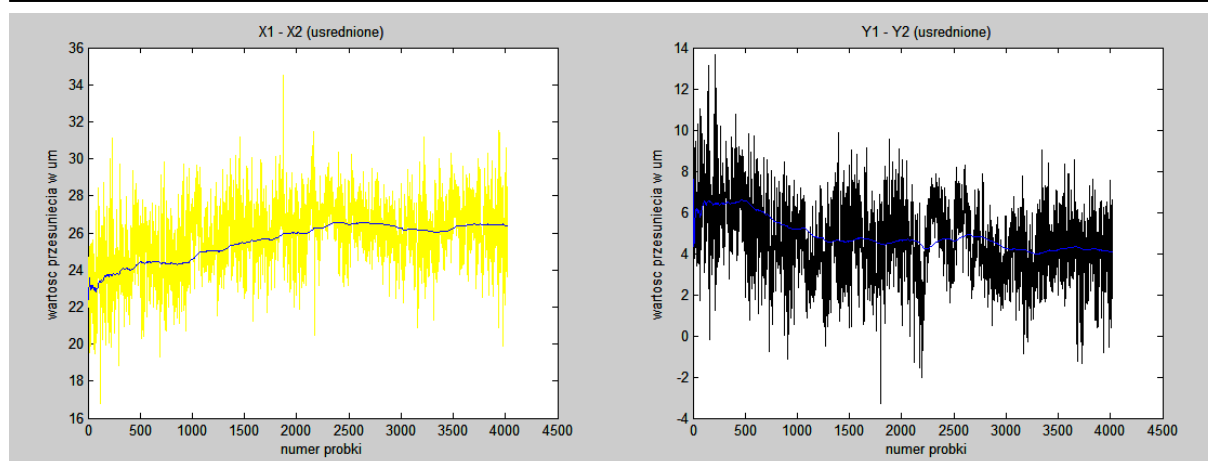


**Rys 5.1.15.** Wykres przedstawiający zmianę mierzonej pozycji wiązki na detektorze kwadrantowym, spowodowaną zakłóceniami w torze pomiarowym (analogicznie do 5.1.14b oraz 5.1.14d). Częstotliwość pomiaru w układzie wynosi 1kHz. Odległość interferometru optycznego od głowicy lasera wynosiła 75cm, odległość retropryzmatu od głowicy 83cm.

Niektóre zakłócenia elektromagnetyczne i mechaniczne oraz zakłócenia impulsowe mogą zostać częściowo odfiltrowane przez uśrednianie danych pomiarowych. Dane są uśredniane w głowicy pomiarowej, gdzie w każdej stabilnej fazie, przełączanej z częstotliwością 1kHz, komórki z ciekłym kryształem, wykonywane jest szesnaście pomiarów tej samej wielkości i liczona jest wartość średnia. Dane z kilkusekundowego pomiaru pozycji wiązki laserowej są dodatkowo uśredniane w aplikacji komputera PC. Efektem tych procedur jest znacząca redukcja zakłóceń w sygnale pomiarowym (**Rys.5.1.16**, **Rys.5.1.17**).



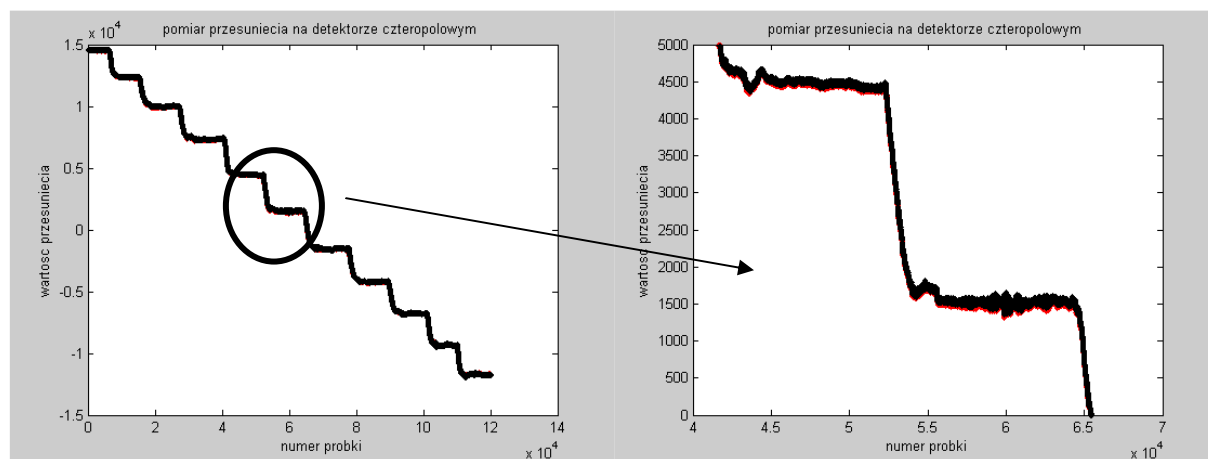
**Rys 5.1.16.** Wykresy przedstawiające wyniki uśredniania sygnału pomiarowego w głowicy pomiarowej. Pomiar wykonany na detektorze kwadrantowym. Pomiar wykonany z wykorzystaniem tylko retropryzmatu (bez interferometru optycznego w układzie pomiarowym).



**Rys 5.1.17. Wykresy przedstawiające wyniki uśredniania sygnału pomiarowego w głowicy pomiarowej. Pomiar wykonany na detektorze PSD.**

Do wykonania pomiaru pozycji wiązki laserowej oraz pomiaru przemieszczenia wiązki na maszynie wymagane jest odpowiednie skalibrowanie układu. Należy przypisać odpowiedniej zmianie napięcia na przetworniku a/c wartość przesunięcia zmierzoną wzorcem długości. Najlepszym rozwiązaniem byłoby zastosowanie stolika pomiarowego z możliwością zadania automatycznego bądź ręcznego wartości przesunięcia w osiach Y i Z i pomiar tego przesunięcia za pomocą interferometru laserowego. Użycie dwudomowego interferometru homodynowego pozwoliłoby na wykorzystanie jednej głowicy laserowej do pomiaru w dwóch wymaganych osiach. W autorskim układzie interferometru do kalibracji wykorzystano śrubę mikrometryczną o rozdzielczości 10nm.

W konfiguracji do pomiaru przemieszczenia (*Rys.4.2.47*) za pomocą stolika YZ (do którego został przypięty retropryzmat) został wyznaczony współczynnik skalowania dla układu pomiaru pozycji wiązki.



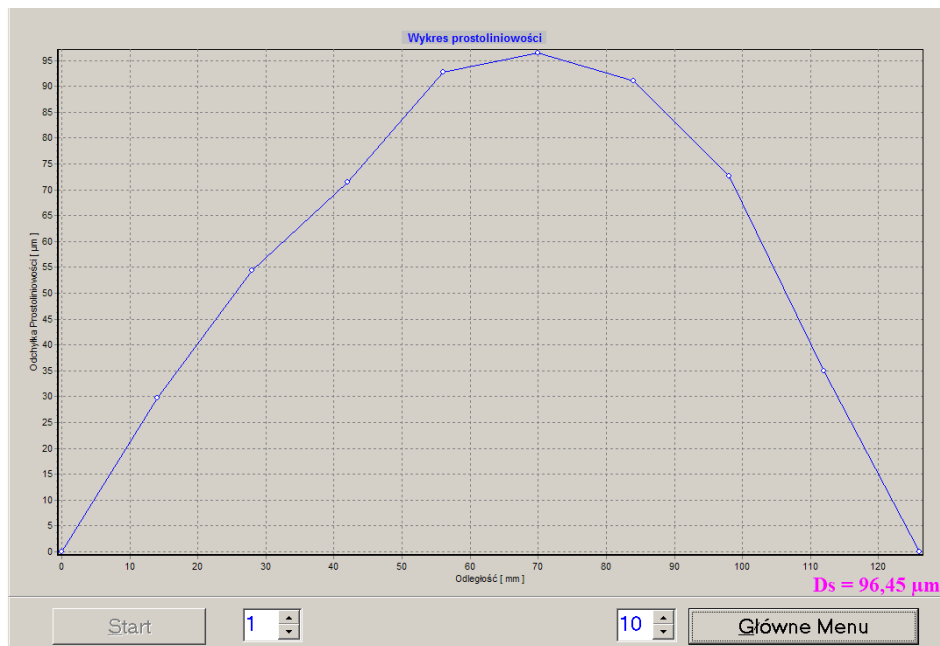
**Rys 5.1.18. Wynik pomiaru przysunięcia w kompletnym torze pomiarowym podczas wykonania kalibracji układu pomiaru pozycji wiązki laserowej. Krok przemieszczenia 100µm. Wykres po prawej stronie przedstawia zbliżenie kroku kalibracji. Wartości przesunięcia na osiach Y wyliczone zgodnie z zależnościami 1.2.25 i 1.2.26.**

Otrzymany współczynnik skalowania jest zależny od wartości charakterystycznych wielkości wykorzystanych elementów w układzie pomiaru pozycji wiązki, w związku z tym musi zostać wykonany ponownie po dowolnej modyfikacji układu elektronicznego.

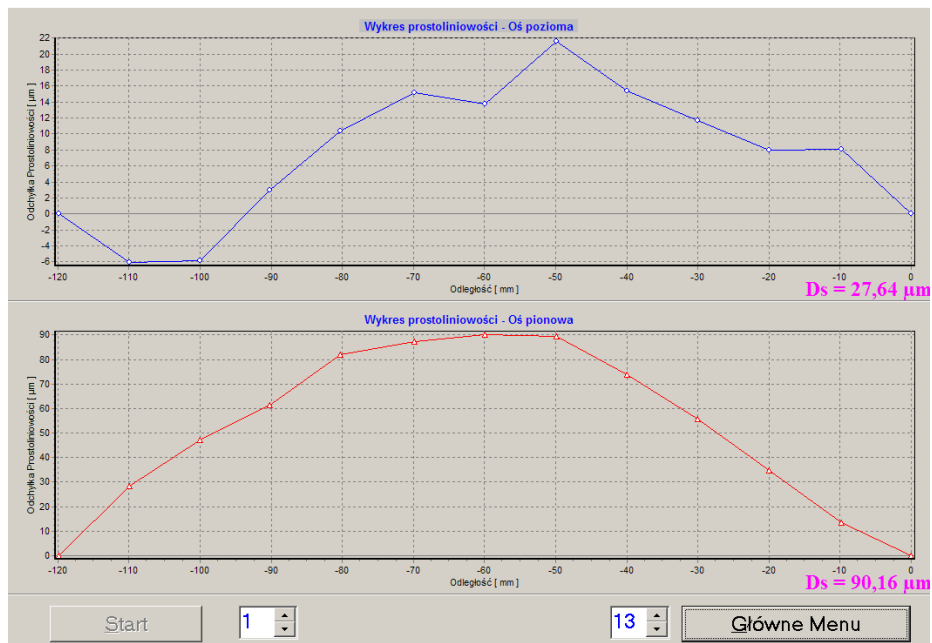


Na **Rys.5.1.18** widać, że wartość odczytu z przetwornika dla przesunięcia w krokach  $100\mu\text{m}$  w całym zakresie pomiarowym nie jest jednakowa. Wynika to z nieliniowego charakteru elementu detekcyjnego. Został on częściowo skompensowany przez dodatkową korektę danych.

Aby zweryfikować przydatność proponowanej metody pomiarowej zostały wykonane pomiary dwoma różnymi metodami tego samego urządzenia (w tym przypadku optycznej ławy pomiarowej).



**Rys 5.1.19.** Wynik pomiaru prostoliniowości metodą uchyleń kątowych (Rys.4.2.53) optycznej ławy pomiarowej. Wykres przedstawia jedną płaszczyznę pomiarową XZ.



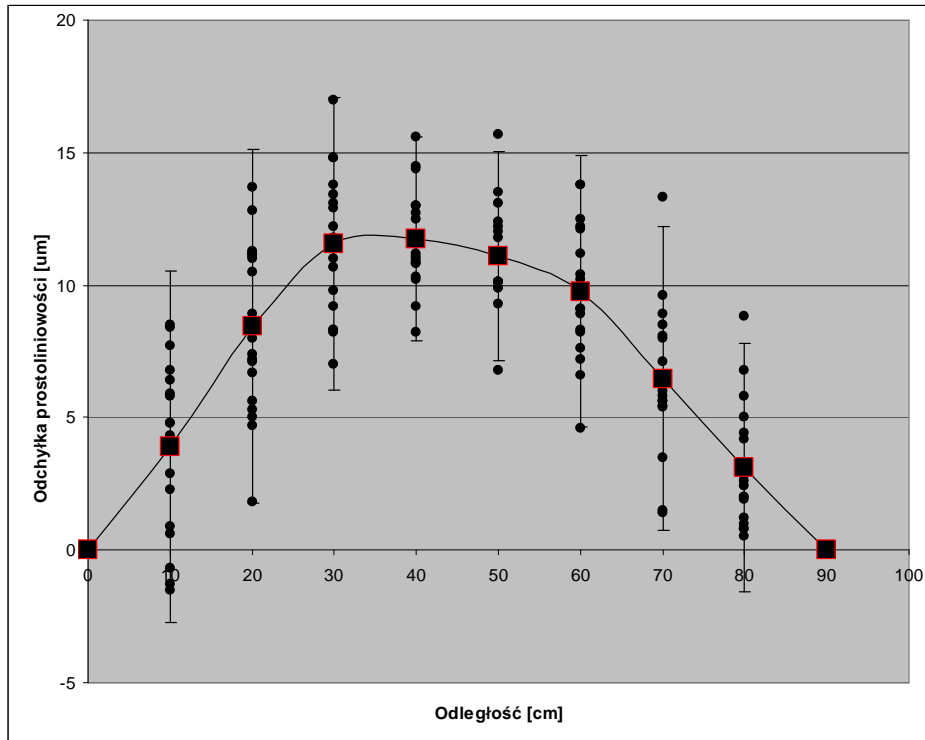
**Rys 5.1.20.** Wynik pomiaru prostoliniowości optycznej ławy pomiarowej autorską metodą 3D (Rys.4.2.53). Pomiar wykonany w takim samym układzie pomiarowym jak pomiar metodą uchyleń kątowych (Rys.5.1.19). Mierzona jedna płaszczyzna – XY (na wykresie „Oś pionowa”).

Otrzymana rozbieżność w wynikach pomiarów rzędu  $5\mu\text{m}$ , stanowi wartość nieznacznie większą niż oczekiwana.

Wyniki pomiarowe, chociaż zachęcające, nie potwierdzają jeszcze prawidłowości pomiaru i nie wyznaczają błędu metody pomiarowej.

Dodatkowe pomiary zostały wykonane na Wydziale Mechanicznym Politechniki Wrocławskiej, na maszynie TUR MN dzięki uprzejmości dr.W.Kwaśnego.

Wykonano serię dwudziestu trzech serii pomiarów prostoliniowości maszyny metodą 3D.



**Rys 5.1.21. Wynik pomiaru prostoliniowości maszyny TUR MN proponowaną metodą 3D.**

Określono błędy nadmierne jako nie mieszczące się w przedziale  $u=\pm 3s$ , gdzie:  $u$ - wartość oczekiwania,  $s$ - odchylenie standardowe.

Na podstawie pozostałych 20 serii pomiarowych wyznaczono niepewność pomiaru na poziomie ufności 97,5% korzystając z rozkładu t-Studenta dla określonej liczby pomiarów.

Uzyskana dokładność wynosi  $\pm 5\mu\text{m}$ . Dla małych odchyłek od prostoliniowości (jak np.: dla maszyny TUR MN) jest to dokładność niewystarczająca, pozwalająca jedynie stwierdzić występowanie i określić charakter odchyłki. W tym momencie metoda ta pozwala na szybką ocenę jakości maszyny. Przy większych odchyłkach, aktualne rozwiązanie pomiaru przemieszczenia może stanowić użyteczną i najszybszą metodę pomiaru w trzech osiach jednocześnie.

Dalsza ocena opracowanej metody pomiarowej wymaga kolejnych modyfikacji konstrukcji układu pomiarowego ze szczególnym naciskiem na poprawienie jakości toru optycznego systemu pomiarowego w celu poprawienia liniowości pomiaru przemieszczenia w całym zakresie pomiarowym (dotyczy pomiaru na detektorze kwadrantowym; **Rys.5.1.18**) oraz

polepszenie parametrów układu stabilizacji lasera He-Ne w celu zmniejszenia wpływu niestabilności kierunku propagacji wiązki laserowej (*ang. Pointing Stability*) [5.01].

Korzystne wydaje się zwiększenie średnicy soczewek kolimatora w celu zwiększenia zakresu pomiarowego oraz zastosowanie ćwierćfalówek i półfalówek do przekształcenia polaryzacji kołowej na liniową lasera He-Ne o lepszej jakości. W obecnym rozwiązaniu dodatkowe modulacje sygnału (analogiczne jak w układzie homodynowym interferometru) powodują dodatkowe błędy odczytu pozycji wiązki laserowej na detektorze kwadrantowym.

## Literatura

- [5.01] J.Gray,P.Thomas, X.D.Zhu, „*Laser pointing stability measured by an oblique-incidence opticaltransmittance difference technique*”, REVIEW OF SCIENTIFIC INSTRUMENTS, VOLUME 72, NUMBER 9, SEPTEMBER 2001,

# 6

## PODSUMOWANIE

Celem pracy było opracowanie metody pomiarowej i prototypu urządzenia do określania dokładności pozycjonowania maszyn w przestrzeni. Założony cel pracy został w pełni spełniony.

Opracowano metodę pomiarową i zbudowano prototyp systemu pomiarowego do określenia pozycji punktów pomiarowych w przestrzeni w celu pomiaru błędów przestrzennych współrzędnościowych maszyn pomiarowych oraz obróbczych.

Autor zaproponował rozwiązanie wykorzystujące heterodynowy interferometr laserowy oraz półprzewodnikowy układ pomiaru pozycji wiązki laserowej. Do budowy interferometru wykorzystano tani i łatwo dostępny laser He-Ne produkowany przez firmę Lasos o mocy 1mW. Opracowano układy detekcyjne i licznikowe oraz interfejs umożliwiający sterowanie interferometrem z poziomu komputera PC.

Zaprojektowano układ stabilizacji z możliwością zdalnego, cyfrowego zadawania parametrów stabilizacji, tak, aby umożliwić pracę w różnych warunkach klimatycznych z automatycznym dopasowaniem parametrów stabilizacji.

W prototyp układu interferometru wbudowano obwody umożliwiające pomiar wielkości środowiskowych (temperatury, ciśnienia i wilgotności) w celu umożliwienia kompensacji długości fali wiązki laserowej w powietrzu, zapewniając dokładność pomiaru lepszą niż  $\pm 1,5\mu\text{m}/^\circ\text{C}/\text{m}$ .

Zastosowanie w układzie stabilizacji częstotliwości lasera komórek ciekłokrystalicznych umożliwiło redukcję wpływu toru elektronicznego na długoterminową stabilność częstotliwości oraz uprościło konstrukcję głowicy pomiarowej interferometru.

Pomiar przemieszczeń w dodatkowych dwóch osiach YZ zrealizowano wykorzystując detektor kwadrantowy firmy Hamamatsu oraz komórkę z ciekłym kryształem o charakterze przełączanej płytki półfalowej. Poprzez pomiar względny pozycji dwóch ortogonalnych polaryzacji wiązki laserowej uzyskano niezależność pomiaru przemieszczenia od zakłóceń (przemieszczeń) w osiach YZ.

Po zbudowaniu systemu pomiarowego wykonano cykl badań prawidłowego funkcjonowania zarówno interferometrycznego układu pomiaru przemieszczenia jak i analogowego układu do pomiaru pozycji wiązki laserowej.

W celu zbadania stabilności i odtwarzalności częstotliwości wyjściowej opracowanej głowicy wykonano szereg badań porównawczych z wzorcem laserowym stabilizowanym na linii absorpcyjnej jodu  $^{127}\text{I}_2$ . Zmierzona stabilność częstotliwości była rzędu  $2,6 \cdot 10^{-8}\text{Hz}$  dla pomiarów w okresach o czasie trwania  $100\mu\text{s}$ , a odtwarzalność częstotliwości rzędu  $2,8 \cdot 10^{-8}$

Hz. Oznacza to, że opracowana głowica nadaje się do zastosowania w przemysłowej interferometrii laserowej.

W celu zbadania dokładności pomiaru pozycji wiązki za pomocą detektora czteropolowego w układzie z ferroelektryczną komórką ciekłokrystaliczną, zmierzono zakłócenia w różnych punktach toru pomiarowego i zaproponowano sposób ich eliminacji. Po wstępnej kalibracji toru pomiaru pozycji wiązki wykonano pomiary porównawcze ławy pomiarowej opracowaną metodą pomiarową oraz za pomocą metody uchyleń kątowych. Wykonano serię pomiarów przykładowej maszyny obróbczej w celu określenia niepewności pomiarowej metody.

Uzyskano niepewność pomiaru lepszą niż  $\pm 1,5\mu\text{m}/^\circ\text{C}/\text{m}$  dla osi głównej głowicy laserowej, przy wykorzystaniu metody interferometrycznej oraz niepewność pomiaru lepszą niż  $\pm 5\mu\text{m}/\text{m}$  dla pozostałych dwóch osi mierzonych analogowo.

Zbudowanie systemu pomiarowego o zadowalających parametrach wymagało zapoznania się nie tylko z opracowanymi do tej pory metodami stabilizacji laserów, ale również z stosowanymi w przemyśle metodami pomiarowymi, określeniu wad tych metod i zalet.

Poniżej wymieniono istotne osiągnięcia naukowe i techniczne związane z prezentowaną pracą:

1. Interpretacja wpływu wielkości pola magnetycznego na częstotliwość Zeemana jednomodowego lasera He-Ne oraz budowa stanowiska do pomiaru częstotliwości zeemanowskiej.
2. Opracowanie koncepcji interferometru laserowego do pomiarów przestrzennych.
3. Opracowanie koncepcji budowy mechanicznej głowicy interferometru.
4. Projekt i budowa wszystkich podzespołów elektronicznych stabilizowanej głowicy.
5. Opracowanie procedury uruchomienia układu stabilizacji głowicy i elektroniki interferometru laserowego.
6. Opracowanie procedury uruchomienia układu pomiaru pozycji wiązki wykorzystującej detektor kwadrantowy oraz komórkę ciekłokrystaliczną.
7. Wykonanie badania stałości odtwarzalności częstotliwości lasera He-Ne w układzie interferometru heterodynowego metodą wariacji Allana, ze pełną rejestracją i archiwizacją danych pomiarowych.
8. Wykonano badania porównawcze opracowanej metody oraz badania mające na celu oszacowanie niepewności metody pomiarowej.

Autor zamierza prowadzić dalsze badania nad poprawą dokładności pomiarowej oraz wykorzystaniem opracowanej metody pomiarowej do celów diagnostycznych maszyn obróbczych i współrzędnościowych maszyn pomiarowych.

Szczególnie interesujące wydaje się być wykorzystanie metody do pomiarów przestrzennych (objętościowych) według normy ISO230-6:2002. Norma ta specyfikuje testy maszyny współrzędnościowej poprzez pomiary przekątnych maszyny. Proponowana metoda 3D zapewniając dokładność rzędu  $\pm 1\mu\text{m}$  pozwoliła by na najszybsze wykonanie oceny maszyny zgodnie z wspomnianą normą.