



*Cezary Kaczmarek*

# Światłowodowy interferometr pętlowy jako narzędzie pomiarowe do wyznaczania dwójłomnych właściwości światłowodów

MONOGRAFIE

Światłowodowy interferometr pętlowy  
jako narzędzie pomiarowe do wyznaczania  
dwójłomnych właściwości światłowodów

# Monografie – Politechnika Lubelska



Politechnika Lubelska  
Wydział Elektrotechniki i Informatyki  
ul. Nadbystrzycka 38A  
20-618 Lublin

Cezary Kaczmarek

# Światłowodowy interferometr pętlowy jako narzędzie pomiarowe do wyznaczania dwójłomnych właściwości światłowodów



Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej  
Lublin 2019

Recenzent:

prof. dr hab. inż. Leszek R. Jaroszewicz, Wojskowa Akademia Techniczna

Publikacja wydana za zgodą Rektora Politechniki Lubelskiej

© Copyright by Politechnika Lubelska 2019

ISBN: 978-83-7947-364-9

Wydawca: Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej

[www.biblioteka.pollub.pl/wydawnictwa](http://www.biblioteka.pollub.pl/wydawnictwa)

ul. Nadbystrzycka 36C, 20-618 Lublin

tel. (81) 538-46-59

Druk: TOP Agencja Reklamowa Agnieszka Łuczak

[www.agencjatorp.pl](http://www.agencjatorp.pl)

---

Elektroniczna wersja książki dostępna w Bibliotece Cyfrowej PL [www.bc.pollub.pl](http://www.bc.pollub.pl)

Nakład: 50 egz.

## Spis treści

|                                                                                                                                                       |           |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| Wykaz ważniejszych oznaczeń .....                                                                                                                     | 9         |
| <b>1. Wstęp.....</b>                                                                                                                                  | <b>13</b> |
| <b>2. Polaryzacja światła.....</b>                                                                                                                    | <b>17</b> |
| 2.1. Propagacja fal świetlnych i ich polaryzacja .....                                                                                                | 17        |
| 2.2. Opis stanu polaryzacji światła.....                                                                                                              | 19        |
| <b>3. Światłowody przenoszące polaryzację i ich parametry .....</b>                                                                                   | <b>25</b> |
| 3.1. Wielkości charakteryzujące dwójłomne właściwości światłowodów ....                                                                               | 25        |
| 3.2. Światłowody przenoszące polaryzację.....                                                                                                         | 28        |
| <b>4. Metody pomiaru wielkości charakteryzujących właściwości</b><br><b>dwójłomne światłowodów przenoszących polaryzację .....</b>                    | <b>35</b> |
| 4.1. Wstęp .....                                                                                                                                      | 35        |
| 4.2. Metody pomiaru fazowej dwójłomności modowej światłowodów.....                                                                                    | 35        |
| 4.3. Metody pomiaru grupowej dwójłomności modowej światłowodów .....                                                                                  | 41        |
| 4.4. Metody pomiaru czułości dwójłomności modowej światłowodów<br>przenoszących polaryzację na wielkości zewnętrzne.....                              | 46        |
| 4.4.1. Metody pomiaru czułości fazowej dwójłomności modowej na<br>wielkości zewnętrzne .....                                                          | 46        |
| 4.4.2. Metody pomiaru czułości grupowej dwójłomności modowej na<br>wielkości zewnętrzne .....                                                         | 49        |
| <b>5. Światłowodowy interferometr pętlowy.....</b>                                                                                                    | <b>51</b> |
| 5.1. Interferometr pętlowy ze światłowodem jednomodowym.....                                                                                          | 51        |
| 5.2. Interferometr pętlowy ze światłowodem przenoszącym polaryzację.....                                                                              | 53        |
| <b>6. Światłowodowy interferometr pętlowy jako narzędzie do pomiaru</b><br><b>wielkości charakteryzujących dwójłomne właściwości światłowodów ...</b> | <b>57</b> |
| 6.1. Wprowadzenie .....                                                                                                                               | 57        |
| 6.2. Pomiar dwójłomności modowej światłowodów z wykorzystaniem<br>interferometru pętlowego .....                                                      | 57        |

|                                                                                                                                                                 |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 6.2.1. Metoda pomiaru dwójłomności modowej światłowodów<br>przenoszących polaryzację .....                                                                      | 57  |
| 6.2.1.1. Procedura wyznaczania znaku grupowej dwójłomności<br>modowej światłowodów przenoszących polaryzację<br>z wykorzystaniem interferometru pętlowego ..... | 59  |
| 6.2.2. Metody pomiaru dwójłomności modowej światłowodów<br>o małej dwójłomności .....                                                                           | 60  |
| 6.2.3. Pomiary grupowej i fazowej dwójłomności modowej<br>światłowodów przenoszących polaryzację – konwencjonalnych<br>i fotonicznych z pełnym rdzeniem .....   | 65  |
| 6.2.3.1. Niepewność rozszerzona pomiaru dwójłomności modowej..                                                                                                  | 67  |
| 6.3. Pomiar czułości dwójłomności modowej światłowodów<br>przenoszących polaryzację na wielkość zewnętrzną.....                                                 | 74  |
| 6.3.1. Pomiar czułości fazowej dwójłomności modowej<br>światłowodów przenoszących polaryzację na wielkość<br>zewnętrzną.....                                    | 74  |
| 6.3.1.1. Metoda pomiaru.....                                                                                                                                    | 74  |
| 6.3.1.2. Pomiary czułości fazowej dwójłomności modowej<br>światłowodów przenoszących polaryzację na<br>temperaturę, odkształcenie i ciśnienie.....              | 77  |
| 6.3.1.3. Niepewność pomiaru czułości fazowej dwójłomności<br>modowej światłowodów przenoszących polaryzację na<br>wielkości zewnętrzne .....                    | 91  |
| 6.3.2. Pomiar czułości grupowej dwójłomności modowej<br>światłowodów przenoszących polaryzację na wielkość<br>zewnętrzną.....                                   | 100 |

|                                                                                                                                          |            |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 6.3.2.1. Metoda pomiaru.....                                                                                                             | 100        |
| 6.3.2.2. Pomiary czułości grupowej dwójłomności modowej<br>światłowodów przenoszących polaryzację na temperaturę<br>i odkształcenie..... | 103        |
| 6.3.2.3. Niepewność pomiaru czułości dwójłomności grupowej<br>światłowodów przenoszących polaryzację na wielkości<br>zewnętrzne .....    | 115        |
| <b>7. Podsumowanie .....</b>                                                                                                             | <b>124</b> |
| <b>Bibliografia .....</b>                                                                                                                | <b>128</b> |



## Wykaz ważniejszych oznaczeń

|                    |                                                                                                               |
|--------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $a$                | – duża półoś elipsy stanu polaryzacji światła, współczynnik nachylenia prostej                                |
| $A$                | – typ niepewności                                                                                             |
| $b$                | – półoś elipsy stanu polaryzacji światła, parametr prostej                                                    |
| $B$                | – typ niepewności                                                                                             |
| $\mathbf{B}$       | – wektor indukcji magnetycznej                                                                                |
| $c$                | – prędkość światła w próżni                                                                                   |
| $c_j$              | – współczynniki wrażliwości; $j$ – liczba całkowita                                                           |
| $c_n$              | – prędkość fazowa fali świetlnej w ośrodku o współczynniku załamania $n$                                      |
| $d$                | – odległość                                                                                                   |
| $\mathbf{E}$       | – wektor natężenia pola elektrycznego                                                                         |
| $\mathbf{E}_0$     | – amplituda zespolona wektora $\mathbf{E}$ w początku układu współrzędnych                                    |
| $[\mathbf{E}]$     | – wektor Jonesa                                                                                               |
| $\mathbf{H}$       | – wektor natężenia pola magnetycznego                                                                         |
| $j$                | – $\sqrt{-1}$                                                                                                 |
| $I$                | – natężenie światła                                                                                           |
| $[\mathbf{J}]$     | – macierz Jonesa                                                                                              |
| $k$                | – stała propagacji w próżni, stała równania                                                                   |
| $k_{Aj}$           | – współczynniki rozszerzenia dla niepewności typu A                                                           |
| $k_{Bi}$           | – współczynniki rozszerzenia dla niepewności typu B                                                           |
| $k_{sX}$           | – czułość przesunięcia widma interferometru pętlowego na wielkość $X$ , która działa na jego światłowód       |
| $K_X$              | – czułość polarymetryczna światłowodu przenoszącego polaryzację na wielkość $X$ , która działa na niego       |
| $K_{\Delta n}^X$   | – czułość dwójłomności fazowej światłowodu przenoszącego polaryzację na wielkość $X$ , która działa na niego  |
| $K_{\Delta n_G}^X$ | – czułość dwójłomności grupowej światłowodu przenoszącego polaryzację na wielkość $X$ , która działa na niego |
| $L$                | – długość, długość światłowodu                                                                                |
| $L_a$              | – długość odcinka światłowodu, na który nie działa wielkość zewnętrzna                                        |
| $L_b$              | – długość odcinka światłowodu, na który działa wielkość zewnętrzna                                            |
| $L_B$              | – droga dudnień                                                                                               |
| $\mathbf{m}$       | – wektor amplitudy rzeczywistej wektora $\mathbf{E}_0$                                                        |
| $m$                | – moduł amplitudy $\mathbf{m}$                                                                                |
| $[\mathbf{M}]$     | – macierz Muellera                                                                                            |
| $n$                | – współczynnik załamania światła                                                                              |

|                       |                                                                                                       |
|-----------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $n_x, n_y$            | – współczynniki załamania światła w kierunku osi polaryzacji $x$ i $y$ światłowodu                    |
| $n_{Gx}, n_{Gy}$      | – grupowe współczynniki załamania światła w kierunku osi polaryzacji $x$ i $y$ światłowodu            |
| $p$                   | – ciśnienie, poziom ufności                                                                           |
| $P$                   | – stopień polaryzacji światła                                                                         |
| $\mathbf{r}$          | – wektor wodzący                                                                                      |
| $r$                   | – promień światłowodu                                                                                 |
| $R$                   | – funkcja odbicia, współczynnik korelacji, promień zgięcia światłowodu, promień pętli                 |
| $R_G$                 | – różnica dróg optycznych modów polaryzacji w światłowodzie przenoszącym polaryzację                  |
| $\mathbf{s}$          | – wektor jednostkowy                                                                                  |
| $s_A(\bar{x}_j)$      | – odchylenie standardowe wartości średniej wielkości wejściowej $\bar{x}_j$                           |
| $[S]$                 | – wektor Stokesa                                                                                      |
| $t$                   | – czas                                                                                                |
| $t_{p,v}$             | – kwantyl rozkładu t–Studenta                                                                         |
| $T$                   | – temperatura, funkcja transmisji                                                                     |
| $u_A(\bar{x}_j)$      | – niepewność standardowa typu A wartości średniej wielkości wejściowej $\bar{x}_j$                    |
| $u_B(\bar{x}_j)$      | – niepewność standardowa typu B wartości średniej wielkości wejściowej $\bar{x}_j$                    |
| $U_A(\bar{x}_j)$      | – niepewność rozszerzona typu A wartości średniej wielkości wejściowej $\bar{x}_j$                    |
| $U_B(\bar{x}_j)$      | – niepewność rozszerzona typu B wartości średniej wielkości wejściowej $\bar{x}_j$                    |
| $U(y)$                | – niepewność rozszerzona pomiaru wielkości $y$                                                        |
| $v_{Gx}, v_{Gy}$      | – prędkości grupowe modów polaryzacji                                                                 |
| $V$                   | – widzialność prążków interferencyjnych                                                               |
| $\alpha$              | – azymut stanu polaryzacji światła, współczynnik rozszerzalności liniowej światłowodu, stała równania |
| $\beta$               | – kąt przekątnej, stała propagacji                                                                    |
| $\beta_x, \beta_y$    | – stałe propagacji modów polaryzacji                                                                  |
| $\delta_0$            | – początkowa różnica faz                                                                              |
| $\Delta g(\bar{x}_j)$ | – błędy graniczne przyrządów pomiarowych                                                              |
| $\Delta n$            | – fazowa dwójłomność modowa światłowodu                                                               |
| $\Delta \lambda_R$    | – szerokość odpowiedzi funkcji spektrometru                                                           |
| $\Delta \tau$         | – różnicowe opóźnienie modów polaryzacji                                                              |
| $\Delta \beta$        | – fazowa dwójłomność modowa światłowodu                                                               |

|                   |                                                                                                       |
|-------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $\Delta\varphi$   | – różnica faz między modami polaryzacji                                                               |
| $\varepsilon$     | – przenikalność elektryczna ośrodka, odkształcenie względne                                           |
| $\theta$          | – kąt obserwacji światła rozproszonego w światłowodzie, kąt ustawienia osi transmisyjnej polaryzatora |
| $\vartheta$       | – kąt eliptyczności stanu polaryzacji światła                                                         |
| $\lambda$         | – długość fali świetlnej w próżni                                                                     |
| $\Lambda$         | – okres widma                                                                                         |
| $\mu$             | – przenikalność magnetyczna ośrodka                                                                   |
| $\nu$             | – liczba stopni swobody                                                                               |
| $\tau$            | – dyspersja polaryzacyjna                                                                             |
| $\omega$          | – częstotliwość kołowa, pulsacja                                                                      |
| $\Omega$          | – kątowa prędkość obrotu, kąt skręcenia płaszczyzny polaryzacji światła liniowo spolaryzowanego       |
| $\nabla$          | – operator nabra                                                                                      |
| $\nabla^2$        | – operator Laplace’a                                                                                  |
| $\langle \rangle$ | – symbol uśredniania w czasie                                                                         |



## 1. Wstęp

Wytworzenie pierwszego światłowodu fotonicznego [1], a następnie światłowodu fotonicznego z rdzeniem powietrznym [2] u schyłku XX wieku, dało impuls do dynamicznego rozwoju badań i technologii wytwarzania tej nowej klasy światłowodów włóknowych. Efektem tych prac było pojawienie się światłowodu fotonicznego przenoszącego polaryzację [3]. Duże możliwości modyfikacji struktury tych światłowodów i wynikające z tego zmiany ich właściwości optycznych, pozwalają na projektowanie ich do określonych zastosowań. Uwzględniając dodatkowo ich małą czułość temperaturową, w porównaniu z konwencjonalnymi światłowodami przenoszącymi polaryzację, znajdują one szerokie zastosowanie nie tylko jako elementy urządzeń telekomunikacji optycznej, ale przede wszystkim jako czułe elementy (przetworniki pierwotne) czujników światłowodowych [4–6]. Rozwój technologii światłowodów fotonicznych spowodował powstanie nowych i udoskonalenie istniejących metod i narzędzi pomiarowych przeznaczonych do badania ich właściwości.

Fotonika jako nowa dziedzina naukowa obejmująca przesyłanie i przetwarzanie informacji za pomocą fotonów, wytworzyła nowy dział miernictwa, nazywany miernictwem fotonicznym [7, 8]. Miernictwo fotoniczne obejmuje pomiary elementów, układów i systemów optycznych, optoelektronicznych i światłowodowych oraz pomiary wielkości fizycznych i chemicznych z wykorzystaniem technik fotoniki. Dynamiczny rozwój techniki światłowodowej przyczynił się do powstania miernictwa światłowodowego, będącego obecnie działem miernictwa fotonicznego [8]. Obejmuje ono pomiary właściwości optycznych i mechanicznych światłowodów telekomunikacyjnych i dużej grupy światłowodów nie telekomunikacyjnych nazywanych także światłowodami kształtowanymi [9]. Do grupy tej zalicza się między innymi konwencjonalne i fotoniczne światłowody nieliniowe, wielordzeniowe i przenoszące polaryzację noszące także nazwę światłowodów o dużej dwójłomności, światłowody aktywne, przewężane i ciekłokrystaliczne. W miernictwie światłowodowym wykorzystuje się adaptowane do specyfiki szklanego światłowodu włóknistego metody pomiarowe optyki klasycznej, optoelektroniki i mechaniki oraz nowe metody pomiarowe opracowane dla zadań miernictwa światłowodowego. Niniejsza praca wpisuje się w zakres miernictwa światłowodowego.

Konwencjonalne i fotoniczne światłowody przenoszące polaryzację (ŠPP) są wykorzystywane powszechnie jako czułe na wielkości zewnętrzne elementy polarymetrycznych i interferometrycznych czujników wielkości fizycznych i chemicznych, oraz jako elementy układów telekomunikacji optycznej. Ważnymi wielkościami charakteryzującymi właściwości tych światłowodów są fazowa dwójłomność modowa  $\Delta n$  i grupowa dwójłomność modowa  $\Delta n_G$ . Należy zaznaczyć, że w pełni równoważną wielkością dla fazowej dwójłomności modowej jest droga dudnień  $L_B$ , natomiast w pełni równoważną wielkością dla

dwójłomności grupowej jest dyspersja polaryzacji światłowodu  $\tau$ . Ilościowy wpływ wielkości zewnętrznej  $X$  na światłowody przenoszące polaryzację określa, odpowiednio, czułość fazowej i grupowej dwójłomności modowej na tę wielkość  $d\Delta n/dX$  i  $d\Delta n_G/dX$ . Wyżej wymienione wielkości charakteryzujące światłowody przenoszące polaryzację decydują w głównej mierze o przydatności tych światłowodów w zastosowaniach czujnikowych i telekomunikacyjnych. I choć wartości tych wielkości można obliczyć na podstawie modeli światłowodów, to ostateczne wartości tych wielkości uzyskuje się na podstawie ich pomiaru.

Istnieje wiele metod pomiaru wielkości charakteryzujących właściwości światłowodów przenoszących polaryzację bazujących na różnych zjawiskach fizycznych, których układy pomiarowe są bardzo zróżnicowane, pod względem struktury i zastosowanych narzędzi pomiarowych.

Wyznaczanie fazowej dwójłomności modowej światłowodów wykonuje się zwykle na podstawie pomiaru ich drogi dudnień. Najczęściej stosowana metoda pomiaru drogi dudnień bazuje na efekcie elastooptycznym (spotykane jest też określenie – efekt fotosprężysty), wywołanym punktowym naciskiem mechanicznym na badany światłowod, który jest zainstalowany w układzie interferometru polarymetrycznego. W interferometrze może być stosowane laserowe źródło światła lub szerokopasmowe źródło światła. W pierwszym przypadku, miarą drogi dudnień jest liczba prążków interferencyjnych odpowiadająca długości przesunięcia nacisku [10, 11], w drugim przypadku, tą miarą, jest przesunięcie fazy widma interferometru odpowiadające długości przesunięcia nacisku [12].

Wyznaczanie dwójłomności grupowej, najczęściej, wykonuje się w dziedzinie widma, na podstawie pomiaru okresu widma interferometru polarymetrycznego [11, 13] lub interferometru pętlowego z badanym światłowodem (światłowodowy interferometr pętlowy nazywany jest też w literaturze światłowodowym interferometrem Sagnaca, światłowodowym filtrem Sagnaca lub światłowodowym zwierciadłem pętlowym) [14, 15]. Rzadziej dwójłomność grupową wyznacza się na podstawie pomiaru dyspersji polaryzacyjnej światłowodu [16], którą można zmierzyć kilkoma sposobami.

Czułość fazowej dwójłomności modowej na wielkość zewnętrzną  $d\Delta n/dX$  światłowodu przenoszącego polaryzację (ŚPP) wyznacza się zwykle na podstawie przesunięcia obrazu interferencyjnego, wyrażonego liczbą prążków interferencyjnych, interferometru polarymetrycznego z badanym światłowodem, na który działa wielkość zewnętrzna [11, 17].

Czułość  $d\Delta n/dX$  wyznacza się także, w dziedzinie widma, na podstawie, wywołanego wielkością zewnętrzną, przesunięcia widma interferometru polarymetrycznego z badanym światłowodem [18, 19]. Moduł czułości fazowej dwójłomności modowej światłowodów przenoszących polaryzację na

temperaturę  $d\Delta n/dX$  wyznaczono na podstawie przesunięcia widma interferometru pętlowego [20].

Czułość grupowej dwójłomności modowej ŚPP na wielkość zewnętrzną  $d\Delta n_G/dX$  oblicza się najczęściej z równania definicyjnego, na podstawie zmierzonej czułości  $d\Delta n/dX$  [11, 17, 21]. W tym celu do zmierzonej zależności czułości  $d\Delta n/dX$  od długości fali dopasowuje się wielomian. Ilościowy wpływ wielkości zewnętrznej  $X$  na właściwości dyspersyjne światłowodu oblicza się także jako czułość dyspersji polaryzacyjnej na tę wielkość  $d\tau/dX$ .

Dla wyznaczenia znaku mierzonych wielkości charakteryzujących właściwości ŚPP opracowano specjalne procedury [11, 19, 22].

Światłowodowy interferometr pętlowy charakteryzujący się prostym układem optycznym, małą wrażliwością na wpływy otoczenia, jest wykorzystywany głównie w budowie czujników pomiarowych wielu wielkości fizycznych i chemicznych, a w ograniczonym zakresie do wyznaczania dwójłomnych właściwości światłowodów.

Niniejsza praca obejmuje całokształt zagadnień związanych z wykorzystaniem światłowodowego interferometru pętlowego (ŚIP) do wyznaczania dwójłomnych właściwości światłowodów. Przedstawiono w niej następujące zagadnienia: metody opisu stanu polaryzacji światła i wielkości charakteryzujące ten stan, parametry określające właściwości ŚPP i struktury tych światłowodów najczęściej spotykane w literaturze, oraz stosowane metody pomiaru parametrów dwójłomnych ŚPP. Ponadto w pracy przedstawiono dotychczasowe wykorzystanie ŚIP, zarówno w sensoryce światłowodowej, telekomunikacji optycznej, jak i w miernictwie wielkości charakteryzujących właściwości dwójłomne światłowodów. Zasadniczą część pracy stanowią opracowania autora, które zwiększają w znaczący sposób możliwości interferometru pętlowego, jako narzędzia do pomiaru parametrów określających właściwości ŚPP, w szczególności:

- Opracowane metody pomiaru czułości fazowej dwójłomności modowej i czułości grupowej dwójłomności modowej na temperaturę, odkształcenie względne i ciśnienie ŚPP, bazujące na interferometrze pętlowym, oraz wyznaczone równania pomiaru tych czułości.
- Opracowana procedura obliczania czułości grupowej dwójłomności modowej na temperaturę, odkształcenie względne i ciśnienie ŚPP, w przypadku gdy czułość okresu widma interferometru pętlowego z badanym ŚPP jest zbyt mała dla pomiaru.
- Opracowana procedura wyznaczania znaku grupowej dwójłomności modowej światłowodu przenoszącego polaryzację z wykorzystaniem interferometru pętlowego.
- Wyznaczona zależność wiążąca czułość przesunięcia widma interferometru pętlowego na wielkość zewnętrzną działającą na jego ŚPP  $k_{sX}$ , z czułością polarymetryczną tego światłowodu na wielkość zewnętrzną  $K_X$ .

- Pomiary parametrów konwencjonalnych ŚPP o dwójłomności naprężeniowej i fonicznych ŚPP i ich rezultaty. Pomiary te wykonano wykorzystując opracowane metody pomiaru i procedury oraz wyznaczoną zależność  $K_x = f(k_{sx})$ . Wykonane obliczenia niepewności przeprowadzonych pomiarów parametrów ŚPP konwencjonalnych i fonicznego PM-1550-01. Obliczenia te wykonano na podstawie wyznaczonych równań pomiaru czułości  $d\Delta n/dX$  i  $d\Delta n_G/dX$ . Wnioski wynikające z przeprowadzonych pomiarów parametrów ŚPP, obliczonej niepewności i analizy bilansu niepewności tych pomiarów.

## 2. Polaryzacja światła

### 2.1. Propagacja fal świetlnych i ich polaryzacja

Propagację fal świetlnych w ośrodkach nie przewodzących, pozbawionych ładunków i prądów elektrycznych opisują równania Maxwella o postaci [23]

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}, \quad (2.1)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}, \quad (2.2)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = 0, \quad (2.3)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0. \quad (2.4)$$

przy czym wektory natężenia pola elektrycznego  $\mathbf{E}$  i natężenia pola magnetycznego  $\mathbf{H}$  są związane z wektorami indukcji elektrycznej  $\mathbf{D}$  i indukcji magnetycznej  $\mathbf{B}$  równaniami materiałowymi  $\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E}$  oraz  $\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}$ , natomiast  $\epsilon$  i  $\mu$  oznaczają przenikalność elektryczną i magnetyczną ośrodka.

Wykonując proste przekształcenia matematyczne i korzystając ze znanych tożsamości rachunku wektorowego, można z równań Maxwella uzyskać równanie falowe elektrycznej składowej fali elektromagnetycznej

$$\nabla^2 \mathbf{E} = \mu \epsilon \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2}. \quad (2.5)$$

Jednym z rozwiązań równania (2.5) jest równanie fali płaskiej

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 \exp \left[ j\omega \left( t - \frac{\mathbf{r} \cdot \mathbf{s}}{c_n} \right) \right], \quad (2.6)$$

gdzie  $c_n = 1/(\mu\epsilon)^{1/2}$  oznacza prędkość fazową fali w ośrodku o współczynniku załamania  $n$ ,  $\mathbf{E}_0 = \mathbf{m} e^{-j\delta_0}$  jest amplitudą zespoloną wektora  $\mathbf{E}$ ,  $\mathbf{m}$  oznacza rzeczywistą amplitudę wektora  $\mathbf{E}_0$ ,  $\mathbf{s}$  jest wektorem jednostkowym prostopadłym do czoła fali,  $\mathbf{r}$  oznacza wektor wodzący,  $\delta_0$  jest fazą początkową,  $\omega$  oznacza częstotliwość kołową,  $t$  oznacza czas.

Jeżeli w równaniu (2.5) wielkości wektorowe rozwinąć we współrzędnych prostokątnych i układ ten obrócić tak by jego oś  $z$  była równoległa do  $\mathbf{s}$  to rozwiązanie tego równania można zapisać

$$\mathbf{E}_x = \mathbf{E}_{0x} \exp \left[ j\omega \left( t - \frac{z}{c_n} \right) \right], \quad (2.7)$$

$$\mathbf{E}_y = \mathbf{E}_{0y} \exp \left[ j\omega \left( t - \frac{z}{c_n} \right) \right]. \quad (2.8)$$

Po wyłączeniu z amplitudy zespolonej  $\mathbf{E}_0$  kąta fazowego  $\delta_0$  w równaniach (2.7) i (2.8) oraz dodaniu do nich fazy  $\delta_x$  można otrzymać równania drgań wektorów  $\mathbf{E}_x$  i  $\mathbf{E}_y$  w płaszczyźnie  $z = \text{const}$

$$\mathbf{E}_x = \mathbf{m}_x \cos \omega t, \quad (2.9)$$

$$\mathbf{E}_y = \mathbf{m}_y \cos(\omega t + \delta), \quad (2.10)$$

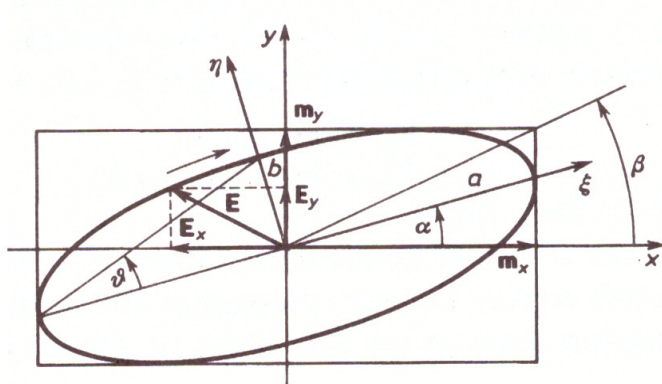
gdzie  $\delta = \delta_x - \delta_y$

Eliminując z równań (2.9) i (2.10) argument  $\omega t$  a następnie podnosząc je do kwadratu i dodając otrzymuje się równanie elipsy

$$\left( \frac{E_x}{m_x} \right)^2 + \left( \frac{E_y}{m_y} \right)^2 - \frac{2E_x E_y}{m_x m_y} \cos \delta = \sin^2 \delta. \quad (2.11)$$

Zatem koniec wektora natężenia pola elektrycznego  $\mathbf{E}$  kreśli na płaszczyźnie  $z = \text{const}$  elipsę. Stan polaryzacji (ang. state of polarization – SOP) fali elektromagnetycznej jest określany jako kształt figury zakreślonej przez koniec wektora  $\mathbf{E}$  na płaszczyźnie  $z = \text{const}$ . Można wyróżnić trzy stany polaryzacji; liniowy, kołowy i eliptyczny. Stan polaryzacji światła charakteryzują następujące wielkości z rysunku 2.1 [24]:

- Azymut  $\alpha$ : kąt pomiędzy dużą osią elipsy stanu polaryzacji a osią  $x$  układu współrzędnych, przy czym  $-\pi/2 \leq \alpha \leq \pi/2$ .
- Kąt eliptyczności:  $\vartheta = \arctg(b/a)$ , kąt ten zawiera się w przedziale  $-\pi/4 \leq \vartheta \leq \pi/4$ , przy czym dodatnie wartości wprowadzono dla oznaczenia polaryzacji prawoskrętnej zaś ujemne dla lewoskrętnej.
- Eliptyczność  $b/a$ : iloraz małej i dużej osi elipsy stanu polaryzacji światła.
- Kąt przekątnej  $\beta$ :  $\beta = \arctg(m_x/m_y)$ , kąt między przekątną prostokąta, w który jest wpisana elipsa polaryzacji stanu polaryzacji światła a osią  $x$  układu współrzędnych, przy czym  $0 \leq \beta \leq \pi/2$ .



Rys. 2.1. Elipsa stanu polaryzacji i wielkości fizyczne określające stan polaryzacji światła [24]

## 2.2. Opis stanu polaryzacji światła

Stan polaryzacji światła można opisać przy pomocy czteroelementowego wektora Stokesa. Dla światła quasi-monochromatycznego i częściowo spolaryzowanego wektor Stokesa ma postać [24]

$$[S] = \begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{xx} + I_{yy} \\ I_{xx} - I_{yy} \\ I_{xy} + I_{yx} \\ j(I_{yx} - I_{xy}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \langle m_x^2(t) + m_y^2(t) \rangle \\ \langle m_x^2(t) - m_y^2(t) \rangle \\ \langle 2m_x m_y \cos \delta \rangle \\ \langle 2m_x m_y \sin \delta \rangle \end{bmatrix}, \quad (2.12)$$

gdzie  $S_0$ ,  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$  są parametrami wektora Stokesa,  $I_{xx} = \langle E_x E_x^* \rangle$ ,  $I_{xy} = \langle E_x E_y^* \rangle$ ,  $I_{yy} = \langle E_y E_y^* \rangle$ ,  $I_{yx} = \langle E_y E_x^* \rangle$ .

Stopień polaryzacji światła (the degree of polarization – DOP), definiowany jako stosunek części natężenia światła, która jest spolaryzowana do natężenia całkowitego jest określony przez parametry Stokesa relacją [25]

$$P = \frac{I_p}{I} = \frac{\sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2}}{S_0}, \quad (2.13)$$

gdzie  $I$ ,  $I_p$  oznaczają odpowiednio natężenie całkowite i natężenie części spolaryzowanej.

Dla spolaryzowanego światła monochromatycznego wektor Stokesa przyjmuje postać [24]

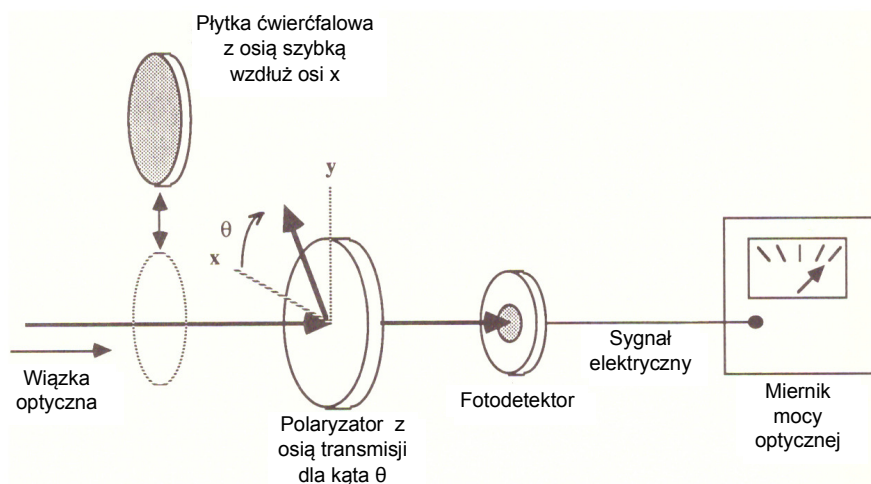
$$[S] = \begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_x^2 + m_y^2 \\ m_x^2 - m_y^2 \\ 2m_x m_y \cos \delta \\ 2m_x m_y \sin \delta \end{bmatrix} = S_0 \begin{bmatrix} 1 \\ \cos 2\vartheta \cos 2\alpha \\ \cos 2\vartheta \sin 2\alpha \\ \sin 2\vartheta \end{bmatrix}, \quad (2.14)$$

Tylko trzy elementy wektora Stokesa są niezależne, ze względu na relację  $S_0^2 = S_1^2 + S_2^2 + S_3^2$ .

Elementy wektora Stokesa można zmierzyć w układzie pomiarowym przedstawionym na rysunku 2.2 [26]. Oś transmisyjna polaryzatora jest zorientowana pod kątem  $\theta$  względem osi  $x$ , podczas gdy szybka oś płytki ćwierćfalowej jest wzdłuż osi  $x$ . Pomiaru natężenie światła  $I(\theta, \delta)$  dokonuje się gdy  $\delta$  równa się 0 lub  $\pi/2$  w zależności od tego czy płytka jest czy nie w wiązce światła. Elementy wektora Stokesa są związane z poszczególnymi wynikami pomiarów następująco

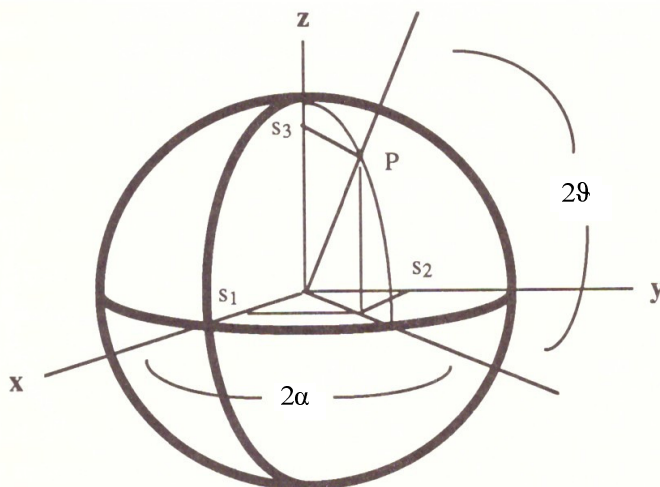
$$[S] = \begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I(0,0) + I\left(\frac{\pi}{2}, 0\right) \\ I(0,0) - I\left(\frac{\pi}{2}, 0\right) \\ I\left(\frac{\pi}{4}, 0\right) - I\left(\frac{3\pi}{4}, 0\right) \\ I\left(\frac{\pi}{4}, \frac{\pi}{2}\right) - I\left(\frac{3\pi}{4}, \frac{\pi}{2}\right) \end{bmatrix}, \quad (2.15)$$

Płytkę ćwierćfalową wykorzystuje się tylko w pomiarze  $S_3$ . Elementy wektora Stokesa reprezentują:  $S_0$  całkowite natężenie wiązki światła,  $S_1$  różnicę natężenia pomiędzy pionową i poziomą składowymi polaryzacji,  $S_2$  różnicę natężenia pomiędzy  $\pi/4$  i  $3\pi/4$  składowymi polaryzacji, i  $S_3$  reprezentuje różnicę natężenia pomiędzy składowymi prawo i lewo skrętnych polaryzacji kołowych.



Rys. 2.2. Schemat układu do wyznaczania wszystkich czterech składowych wektora Stokesa [26]

Geometryczną reprezentacją dowolnego stanu polaryzacji wyrażonego elementami wektora Stokesa jest punkt na powierzchni sfery o promieniu  $S_0$ , którego współrzędne biegunowe wynoszą  $S_0$ ,  $2\alpha$ ,  $2\theta$ , co wynika z zależności (2.14). Sfera ta jest nazywana sferą Poincaré. Jak widać na rysunku 2.3 rzut punktu na powierzchni sfery na osie układu współrzędnych daje składowe wektora Stokesa. Zatem dowolny stan polaryzacji wiązki monochromatycznej jest reprezentowany przez punkt na powierzchni sfery i odwrotnie – jednemu punktowi na powierzchni sfery przyporządkowany jest jeden stan polaryzacji wiązki światła.



Rys. 2.3. Sfera Poincaré [25]

Badając powierzchnię sfery w połączeniu z definicją składowych wektora Stokesa można dokonać szeregu identyfikacji. Równik sfery reprezentuje liniowe stany polaryzacji. Stany polaryzacji eliptycznej mieszczą się powyżej i poniżej równika; na półsfery północnej polaryzacja prawoskrętna, na półsfery południowej polaryzacja lewoskrętna. Bieguny sfery północny i południowy reprezentują, odpowiednio, prawoskrętną i lewoskrętną polaryzację kołową. Równoleżniki sfery reprezentują stany polaryzacji o tej samej eliptyczności, natomiast południki stany o tym samym azymucie. Skoro stany polaryzacji są reprezentowane na powierzchni sfery Poincare przez pojedyncze punkty to zamiany stanu polaryzacji są reprezentowane na niej jako linie ciągłe.

Dowolny stan polaryzacji fali świetnej może być opisany przez wektor Jonesa. Wektor Jonesa jest dwuelementową macierzą, której elementy są liczbami zespolonymi [24]

$$[E] = \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = e^{j\omega t} \begin{bmatrix} m_x \\ m_y e^{j\delta} \end{bmatrix}. \quad (2.16)$$

Jeżeli istotny jest tylko stan polaryzacji to postać wektora Jonesa przyjmuje postać uproszczoną

$$[E] = \begin{bmatrix} m_x \\ m_y e^{j\delta} \end{bmatrix}. \quad (2.17)$$

Stosowany jest także standardowy wektor Jonesa dla którego amplitudy  $m_x$  i  $m_y$  są tak unormowane, że natężenie światła  $I = m_x^2 + m_y^2 = 1$

$$[E] = \begin{bmatrix} \cos\beta \\ \sin\beta e^{j\delta} \end{bmatrix}. \quad (2.18)$$

Z wektora Jonesa można obliczyć wielkości określające stan polaryzacji światła:  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\vartheta$  oraz natężenie światła  $I$ . Odwrotnie, gdy znane są  $\alpha$ ,  $\vartheta$  oraz  $I$ , można obliczyć składowe wektora Jonesa.

Składowe uproszczonego wektora Jonesa można wyznaczyć na podstawie pomiaru natężenia wiązki światła przepuszczonej przez polaryzator, którego kierunek przepuszczania jest zgodny albo z kierunkiem  $x$  albo z kierunkiem  $y$ . Otrzymuje się wtedy wartości, odpowiednio,  $m_x^2$  i  $m_y^2$ . Kąt  $\delta$  można zmierzyć kompensatorem.

Wyznaczenie stanu polaryzacji światła wyjściowego układu optycznego, który składa się z kaskadowo zestawionych/połączonych elementów dwójłomnych objętościowych/światłowodowych, można wyznaczyć metodą macierzy Jonesa lub macierzy Stokesa-Meullera. Zakłada się przy tym, że stan polaryzacji światła wejściowego układu jest znany i macierze Jonesa [J]

o wymiarze 2x2 oraz macierze Meullera  $[M]$  (o wymiarze 4x4) elementów dwójłomnych układu są znane. Wektor Jonesa i wektor Stokesa światła wyjściowego układu optycznego opisują zależności [24, 26]

$$[E_{wy}] = [J_n][J_{n-1}] \dots [J_1][E_{we}], \quad (2.19)$$

$$[S_{wy}] = [M_n][M_{n-1}] \dots [M_1][E_{we}], \quad (2.20)$$

Mnożenie odbywa się od strony prawej do lewej. Numery elementów układu rosną od wejścia światła. Mnożąc  $[E_{we}]$  przez macierz  $[J_1]$  lub macierz  $[M_1]$  otrzymuje się wektor Jonesa  $[E_1]$  lub wektor Stokesa  $[S_1]$  stanu polaryzacji po pierwszym elemencie, które mnoży się następnie, odpowiednio, przez macierz  $[J_2]$  lub przez macierz  $[M_2]$  otrzymując wektor  $[E_2]$  lub wektor  $[S_2]$  po drugim elemencie i tak dalej przez wszystkie elementy. Można także wyznaczyć stan polaryzacji światła wyjściowego układu obliczając macierz zastępczą  $[J_z]$  mnożąc przez siebie wszystkie macierze  $[J_i]$  lub macierz zastępczą  $[M_z]$  mnożąc przez siebie wszystkie macierze  $[M_i]$ , a następnie obliczyć wektory  $[E_{wy}]$  i  $[S_{wy}]$  zgodnie ze wzorami

$$[E_{wy}] = [J_z][E_{we}], \quad (2.21)$$

$$[S_{wy}] = [M_z][E_{we}], \quad (2.22)$$

Należy zaznaczyć, że metoda macierzy Jonesa ogranicza się tylko do światła całkowicie spolaryzowanego.



### 3. Światłowody przenoszące polaryzację i ich parametry

#### 3.1. Wielkości charakteryzujące właściwości optyczne światłowodów

Światłowód jednomodowy prowadzi faktycznie dwa tryby o tych samych wartościach stałych propagacji  $\beta_x = \beta_y$ , które są spolaryzowane w dwóch prostopadłych kierunkach. W idealnych warunkach, to jest przy doskonałej symetrii i izotropowych materiałach, tryb podstawowy z polaryzacją w kierunku  $x$  nie powinien się sprzęgać z trybem o polaryzacji w kierunku  $y$ . W rzeczywistym światłowodzie, występujące odchylenia od geometrii cylindrycznej i niejednorodności materiałów zakłócają stan polaryzacji. Stałe propagacji trybów spolaryzowanych w kierunkach  $x$  i  $y$  różnią się  $\beta_x \neq \beta_y$ . Ta właściwość światłowodu nazywa się fazową dwójłomnością modową, którą definiuje się jako [27]

$$\Delta n = \frac{(\beta_x - \beta_y)}{k}, \quad (3.1)$$

gdzie:  $k = 2\pi/\lambda$  jest stałą propagacji w próżni,  $\lambda$  jest długością fali. Uwzględniając w równaniu (3.1) zależności na stałe propagacji  $\beta_x = kn_x$  oraz  $\beta_y = kn_y$ , otrzymuje się

$$\Delta n = \frac{(\beta_x - \beta_y)}{k} = n_x - n_y, \quad (3.2)$$

gdzie:  $n_x$  i  $n_y$  są współczynnikami załamania światła odpowiednio w kierunku  $x$  i  $y$ .

Alternatywnie dwójłomność fazową definiuje się jako [28, 29]

$$\Delta\beta = \beta_x - \beta_y. \quad (3.3)$$

Różnica fazy pomiędzy trybami polaryzacji na drodze o długości  $L$  w światłowodzie wynosi

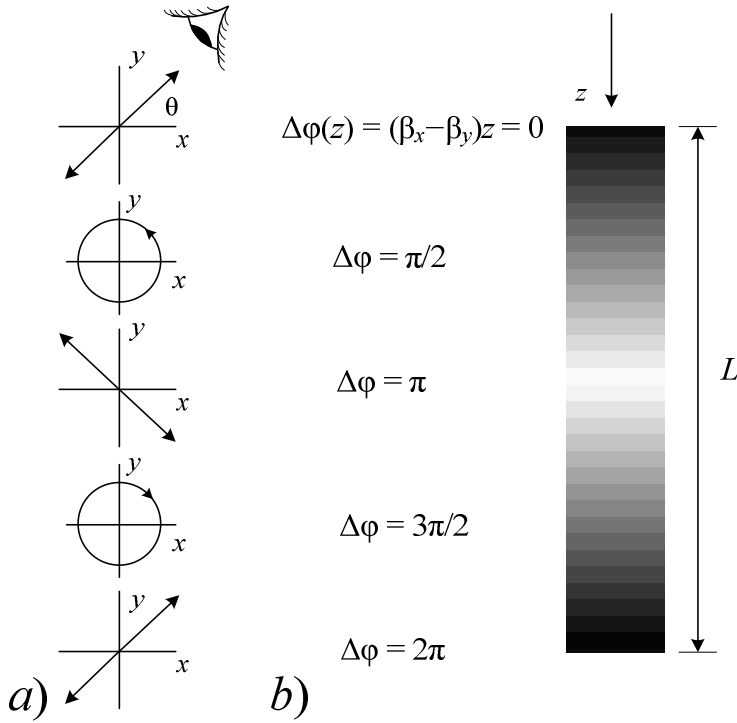
$$\Delta\varphi = (\beta_x - \beta_y)L. \quad (3.4)$$

Dwójłomność prowadzi do periodycznej wymiany mocy między trybami polaryzacji w światłowodzie na drodze o długości określonej zależnością [27]

$$L_B = \frac{\lambda}{\Delta n} = \frac{2\pi}{\beta_x - \beta_y}. \quad (3.5)$$

Długość  $L_B$  jest nazywana drogą dudnień (ang. beat length). Ewolucję stanu polaryzacji w światłowodzie dwójłomnym, dla liniowo spolaryzowanej wiązki światła wprowadzonej pod kątem  $45^\circ$  do osi polaryzacji światłowodu, wraz z obserwowanym promieniowaniem rozproszonym w tym światłowodzie,

przedstawiono na rysunku 3.1. Na podstawie obserwacji tego promieniowania można wyznaczyć drogę dudnień światłowodu.



Rys. 3.1. Droga dudnień a) stan polaryzacji w zależności od  $\Delta\varphi$ , b) promieniowanie rozproszone w światłowodzie obserwowane pod kątem  $\theta$  [27]

Właściwości dyspersyjne światłowodów przenoszących polaryzację mogą być przedstawiane ilościowo przez wielkości znane jako grupowa dwójłomność modowa  $\Delta n_G$  i dyspersja polaryzacji  $\tau$ . Wielkości te są definiowane następującymi równaniami [23]:

$$\Delta n_G = \Delta n - \lambda \frac{d\Delta n}{d\lambda} = -\frac{\lambda^2}{2\pi} \frac{d\left[\frac{\Delta n}{\lambda}\right]}{d\lambda}, \quad (3.6)$$

$$\tau = \frac{\Delta\tau}{L} = \frac{1}{v_{Gx}} - \frac{1}{v_{Gy}} = \frac{d\beta_x}{d\omega} - \frac{d\beta_y}{d\omega}, \quad (3.7)$$

gdzie:  $\Delta\tau$  oznacza różnicowe opóźnienie modów polaryzacji,  $L$  jest długością światłowodu,  $v_{Gx}$  i  $v_{Gy}$  oznaczają prędkości grupowe modów polaryzacji,  $\omega = 2\pi c/\lambda$  jest pulsacją fali świetlnej.

Uwzględniając zależność na dwójłomność grupową światłowodu:

$$\Delta n_G = n_{Gx} - n_{Gy} = \frac{c}{v_{Gx}} - \frac{c}{v_{Gy}}, \quad (3.8)$$

gdzie:  $n_{Gx}$  i  $n_{Gy}$  oznaczają grupowe współczynniki załamania światła w kierunku osi polaryzacji  $x$  i  $y$  światłowodu, można zapisać zależność wiążącą dwójłomność grupową z dyspersją polaryzacyjną światłowodu w postaci:

$$\Delta n_G = c \cdot \tau = c \frac{\Delta \tau}{L}. \quad (3.9)$$

Światłowody przenoszące polaryzację są często wykorzystywane jako elementy aktywne czujników światłowodowych, lub elementy urządzeń w telekomunikacji optycznej takich jak kompensatory dyspersji polaryzacyjnej. Wielkości zewnętrznie działające na taki światłowód wywołują zmianę jego fazowej dwójłomności modowej i grupowej dwójłomności modowej. Miarą ilościową tego działania jest czułość fazowej dwójłomności modowej na wielkość zewnętrzną  $K_{\Delta n}^x$ , oraz czułość grupowej dwójłomności modowej na wielkość zewnętrzną  $K_{\Delta n_G}^x$ , określane następująco [17, 30, 31]:

$$K_{\Delta n}^x = \frac{d\Delta n}{dX}, \quad (3.10)$$

$$K_{\Delta n_G}^x = \frac{d\Delta n_G}{dX}. \quad (3.11)$$

Ze względu na stosowanie definicji fazowej dwójłomności modowej światłowodu zgodnie ze wzorem (3.3), stosuje się także odpowiadającą jej definicję czułości fazowej dwójłomności modowej na wielkość zewnętrzną, o następującej postaci [29]

$$K_{\Delta \beta}^x = \frac{d\Delta \beta}{dX}. \quad (3.12)$$

Ilościową miarą działania wielkości zewnętrznej na właściwości dyspersyjne ŚPP jest czułość dyspersji polaryzacyjnej na tę wielkość [29]

$$K_{\tau}^x = \frac{d\tau}{dX}. \quad (3.13)$$

Na podstawie zależności (3.6) czułość grupowej dwójłomności modowej na wielkość zewnętrzną definiuje się następująco

$$\frac{d\Delta n_G}{dX} = \frac{d\Delta n}{dX} - \lambda \frac{d^2 \Delta n}{d\lambda dX}. \quad (3.14)$$

Parametrem charakteryzującym odpowiedź fazową światłowodu przenoszącego polaryzację na działanie wielkości zewnętrznej, często stosowanym w technice pomiarowej, jest czułość polarymetryczna światłowodu, definiowana w sposób następujący [17, 30]:

$$K_x = \frac{d\Delta\varphi}{LdX}. \quad (3.15)$$

Czułość polarymetryczna określa zmianę różnicy faz między modami polaryzacji wywołaną jednostkową zmianą wielkości  $X$  przy jednostkowej długości światłowodu. Uwzględniając w równaniu (3.15) zależności (3.4) i (3.1) czułość polarymetryczną można wyrazić w postaci zależności:

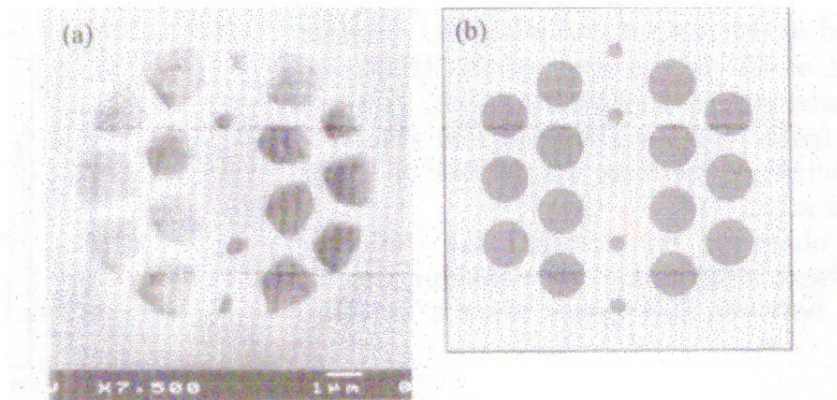
$$K_x = \frac{2\pi}{\lambda} \left[ \frac{d\Delta n}{dX} + \frac{\Delta n}{L} \frac{dL}{dX} \right]. \quad (3.16)$$

### 3.2. Światłowody przenoszące polaryzację

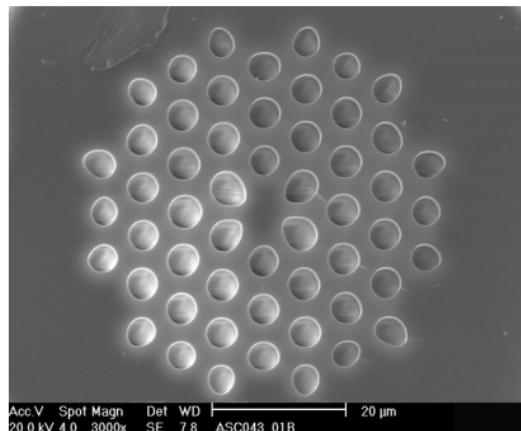
Światłowody o dużej dwójłomności wewnętrznej, powstałej w procesie ich wytwarzanie, są nazywane światłowodami utrzymującymi i przenoszącymi polaryzację (ang. polarization-maintaining fiber PMF) lub światłowodami o dużej dwójłomności (ang. highly birefringent – HB). Do wytwarzania konwencjonalnych światłowodach przenoszących polaryzację wykorzystuje się głównie anizotropie kształtu lub naprężenia. Dużą dwójłomność kształtu uzyskuje się stosując eliptyczny rdzeń, eliptyczny płaszcz lub tunele po obu stronach cylindrycznego rdzenia. Szeroko rozpowszechniona metoda uzyskania dużej dwójłomności naprężeniowej polega na wytworzeniu dwóch obszarów ze szkła borokrzemianowego po przeciwległych stronach rdzenia, wykonanego ze szkła kwarcowego domieszkowanego  $\text{GeO}_2$ . Tym sposobem są wytwarzane światłowody o nazwie Bow-tie i Panda, dostępne w handlu i powszechnie stosowane. Wartość dwójłomności tych światłowodów są zbliżone i wynosi około  $4 \cdot 10^{-4}$  [14, 15, 31, 32]. Konwencjonalne ŚPP charakteryzują się względnie dużą wartością czułości na temperaturę ( $K_T = -5 \div 0,5 \text{ rad/K} \cdot \text{m}$ ) [22, 29, 33].

Dwójłomność fazowa i dwójłomność grupowa fotonicznych ŚPP jest nie linowo zależna od długości fali [11, 29, 34]. Światłowody te wytwarzane ze szkła kwarcowego charakteryzują się ponad dwa rzędy mniejszą czułością na temperaturę w porównaniu z konwencjonalnymi ŚPP [14, 20, 22, 33]. Dwójłomność w światłowodach fotonicznych (ang. photonic crystal fibers – PC-PMFs) jest rezultatem przypadkowej asymetrii sieci otworów płaszczu lub celowego kształtowania rdzenia i/lub struktury płaszczu [29]. To celowe kształtowanie prowadzi do wytworzenia eliptycznego rdzenia i/lub niesymetrycznej struktury płaszczu. Większość światłowodów fotonicznych przenoszących polaryzację opisywanych w literaturze bazuje na heksagonalnej sieci przestrzennej. Przykłady struktur

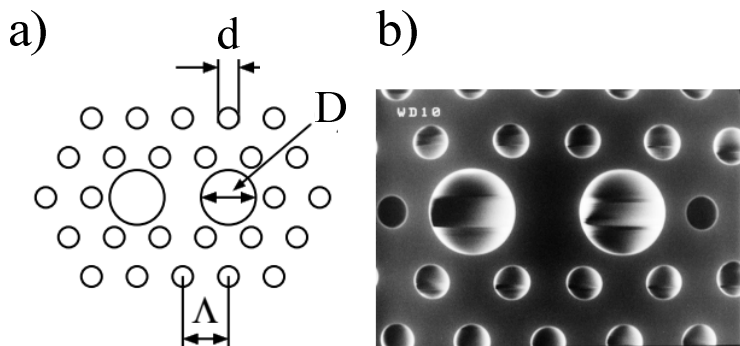
z niesymetrycznym płaszczem i eliptycznym rdzeniem ŚPP przedstawiono na rysunku 3.2–37. W światłowodzie z rysunku 3.2, zaburzenie symetrii płaszczu tworzy jeden rząd komórek heksagonalnych o mniejszym współczynniku wypełnienia niż pozostałe komórki płaszczu [3]. Także w światłowodzie z rysunku 3.3, położenie i geometria środkowego rzędu otworów zaburza symetrię struktury płaszczu [32], natomiast w światłowodzie z rysunku 3.4, brak symetrii struktury płaszczu wynika z dwóch otworów powietrznych w pobliżu rdzenia [35]. Zdjęcia przekroju poprzecznego światłowodów zamieszczone na rysunkach, wykonano elektronowym mikroskopem skaningowym (EMS).



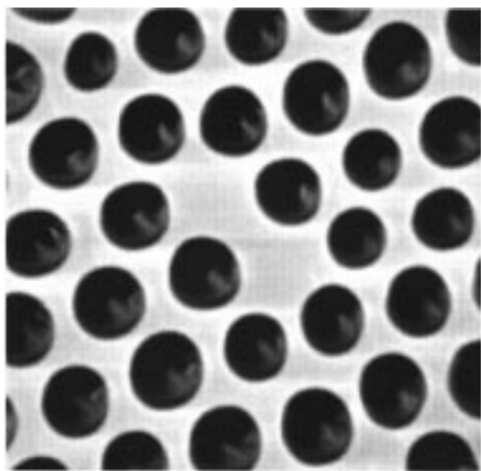
Rys. 3.2. Światłowod fotoniczny przenoszący polaryzację a) zdjęcie EMS, b) struktura idealna [3]



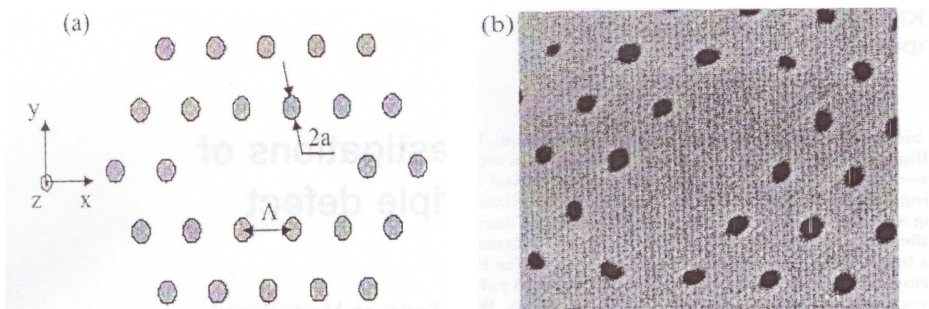
Rys. 3.3. Zdjęcie EMS przekroju poprzecznego światłowodu fotonicznego przenoszącego polaryzację [32]



Rys. 3.4. Światłowod fotoniczny przenoszący polaryzację a) struktura, b) zdjęcie EMS [35]

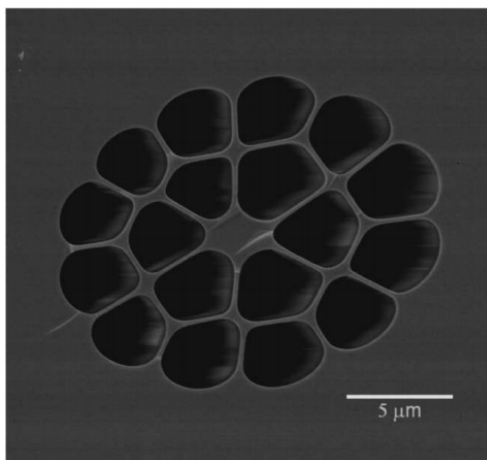


Rys. 3.5. Zdjęcie niesymetrycznego rdzenia światłowodu fotonicznego przenoszącego polaryzację [36]



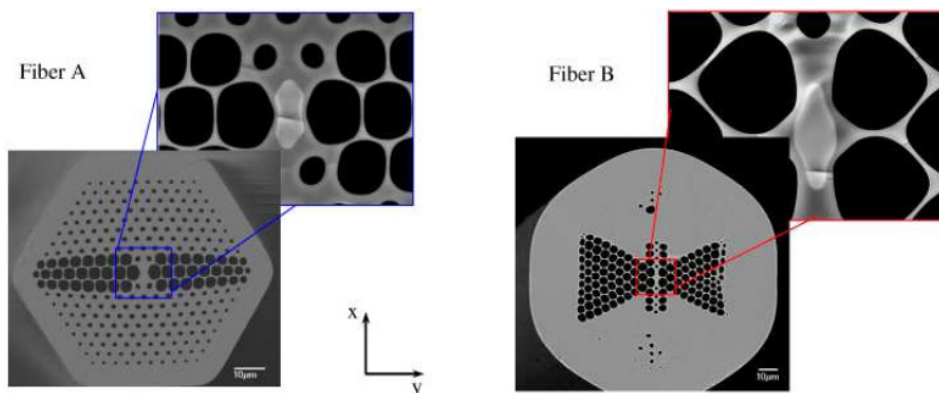
Rys. 3.6. a) Struktura światłowodu przenoszącego polaryzację z rdzeniem zawierającym potrójną wadę, b) zdjęcie wykonane EMS [13]

W światłowodzie z rysunku 3.5 eliptyczny rdzeń uzyskano dzięki pominięciu dwóch sąsiednich otworów powietrznych (podwójna wada) [36], natomiast w światłowodzie z rysunku 3.6 eliptyczność rdzenia uzyskano na skutek braku trzech otworów powietrznych w strukturze heksagonalnej światłowodu (potrójna wada) [13]. Światłowody o strukturach przedstawionych na rysunkach 3.2–3.6 mają grupową dwójłomność zawierającą się w przedziale  $9,3 \cdot 10^{-4}$  do  $3,7 \cdot 10^{-3}$ . W światłowodzie o strukturze przedstawionej na rysunku 3.7 uzyskano dwójłomność grupową większą niż  $3,7 \cdot 10^{-3}$ . Eliptyczny rdzeń w tym światłowodzie uzyskano przez wytworzenie eliptycznych otworów powietrznych struktury płaszczu [16]. Struktura przedstawiona na rysunku 3.4, według autorów [16], stała się standardem w tej nowej klasie struktur.



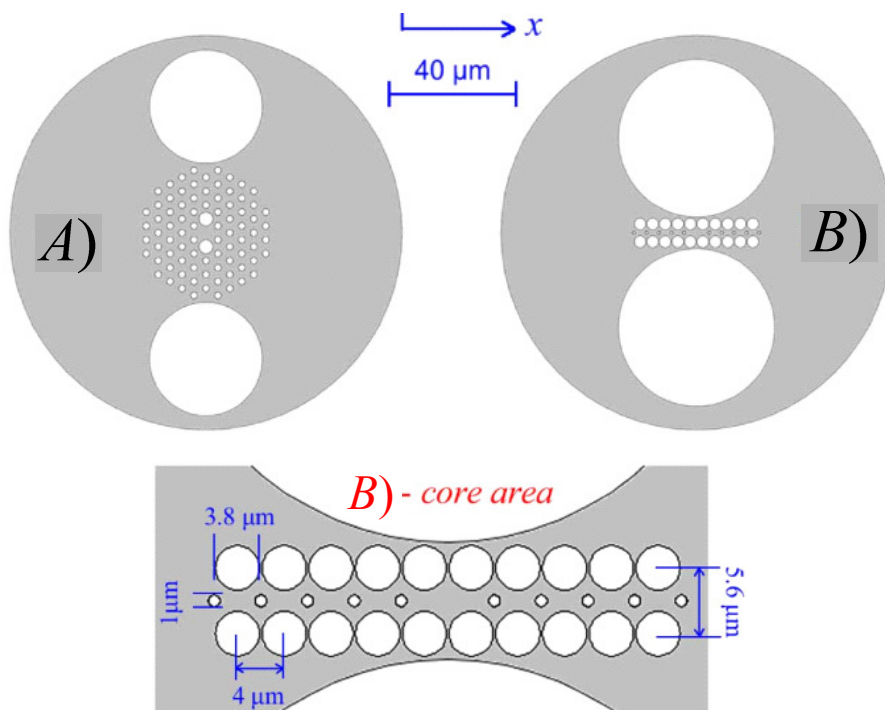
Rys. 3.7. Fotografia przekroju poprzecznego światłowodu wykonane EMS [36]

Możliwość uzyskiwania unikalnych charakterystyk światłowodów fotonicznych, dzięki właściwie zaprojektowanej ich strukturze [37], pozwala na wytwarzanie nowych rodzajów światłowodów stosowanych w urządzeniach optyki światłowodowej [38] i w czujnikach światłowodowych [39]. Poza tym, wytwarza się światłowody przeznaczone dla czujników wybranej wielkości fizycznej, na przykład ciśnienia. Na rysunku 3.8 przedstawiono dwie struktury fotonicznych ŚPP zaprojektowanych i wykonanych z przeznaczeniem do zastosowania w czujnikach ciśnienia. Światłowody mają domieszki germanu, w celu umożliwienia naświetlania siatek Bragga konwencjonalną metodą. Zmierzona polarymetryczna czułość na ciśnienie tych światłowodów wynosi  $K_p = -43$  rad/MPa·m dla długości fali 1,55 μm, a polarymetryczna czułość światłowodów bez pokrycia na temperaturę, wynosi  $K_T = -0,044$  rad/MPa·m oraz  $K_T = -0,08$  rad/MPa·m dla długości fali 1,55 μm [40].



Rys. 3.8. Zdjęcie EMS wytworzonych światłowodów ze zwiększoną czułością na ciśnienie [40]

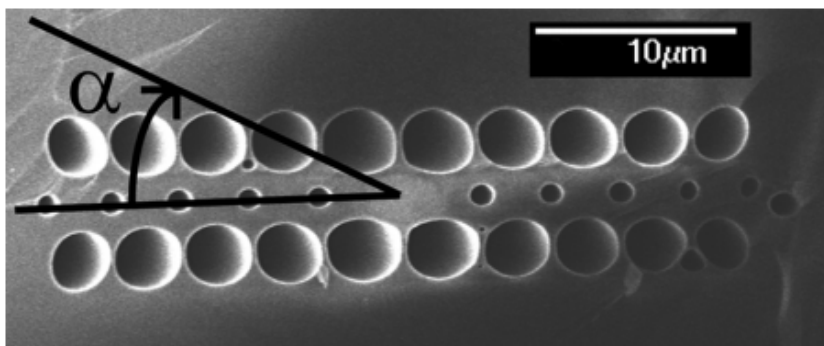
Wykorzystując właściwość wytwarzania dwójłowności indukowanej przez ciśnienie działające na standardowy światłowod side-hole [41] i światłowod przenoszący polaryzację side-hole [42], opracowano i wykonano fotoniczne światłowodów side-hole o zwiększonej polarymetrycznej czułości na ciśnienie rysunku 3.9 [43]. Światłowod o strukturze A z rysunku 3.9 badali autorzy pracy [44].



Rys. 3.9. Przekroje poprzeczne światłowodów. Białe obszary oznaczają kanały powietrzne, szare obszary oznaczają szkło kwarcowe [43]

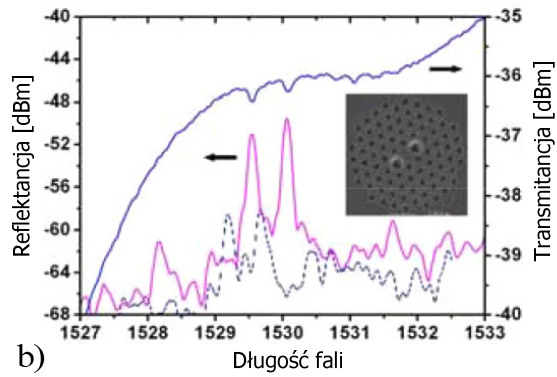
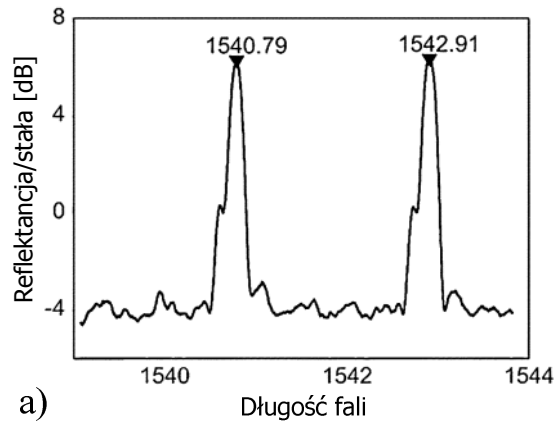
Czułość fazowej dwójłomności modowej na ciśnienie  $d\Delta n/dp$  i fazowa dwójłomność modowa  $\Delta n$  dla długości fali  $1,55\text{ }\mu\text{m}$  wynoszą odpowiednio dla światłowodu o strukturze A;  $-4,93 \cdot 10^{-6}\text{ MPa}^{-1}$  i  $5,45 \cdot 10^{-4}$  oraz dla światłowodu o strukturze B;  $-2,30 \cdot 10^{-5}\text{ MPa}^{-1}$  i  $2,34 \cdot 10^{-3}$ . Czułość  $d\Delta n/dp$  światłowodu o strukturze B jest o ponad 10 razy większa od czułości  $d\Delta n/dp$  fotonicznego światłowodu PM-1550-01 [34, 43].

Wykorzystując techniki naświetlania światłowodowych siatek Bragga (ŚSB) w konwencjonalnych światłowodach, wytwarza się także takie siatki w światłowodach fotonicznych. Stosuje się do tego celu konwencjonalną technikę wytwarzania siatek Bragga, oświetlając rdzeń światłowodu fotonicznego zawierający fotoczułe domieszki (np. german) wiązką promieniowania lasera impulsowego o długości fali  $248\text{ nm}$  [45], lub naświetlanie rdzenia światłowodu fotonicznego, bez domieszkowania, wiązką promieniowania lasera impulsowego o długości fali  $193\text{ nm}$  [46]. Trudności w naświetlaniu światłowodowych siatek Bragga w światłowodach fotonicznych wynikają ze zjawiska rozpraszania wiązki lasera na strukturze płaszcza, które utrudnia sprzężenie tej wiązki z rdzeniem [47]. Do wytwarzania siatek Bragga w fotonicznych ŚPP, wykorzystuje się zarówno technikę z domieszkowaniem rdzenia germanem i użyciem KrF ekscymerowego lasera o długości fali  $248\text{ nm}$  [48], jak i technikę bez domieszkowania rdzenia i oświetlaniem go światłem ArF ekscymerowego lasera o długości fali  $193\text{ nm}$  [49]. Strukturę fotonicznego ŚPP specjalnie zaprojektowaną do naświetlania siatek Bragga przedstawiono na rysunku 3.10.



Rys. 3.10. Zdjęcie EMS przekroju poprzecznego światłowodu mikrostrukturalnego. Kątowa orientacja światłowodu jest oznaczona przez  $\alpha$  [48]

Ze względu na dużą wartość dwójłomności fazowej fotonicznych światłowodów przenoszących polaryzację w widmach wytworzonych w nich ŚSB występują dwa ekstrema Bragga z odstępem zależnym od wartości tej dwójłomności, co pokazano na rysunku 3.11 [48].



Rys. 3.11. Zmierzone widma ŚŚB wytworzone w fonicznych ŚPP a) odbiciowe [48],  
b) odbiciowe i transmisyjne [49]

Duża różnica długości fal między tymi ekstremami sprawia, że takie ŚŚB są odpowiednie do zastosowań czujnikowych ze względu na możliwość łatwej identyfikacji obydwóch ekstremów w świetle niespolaryzowanym.

## **4. Metody pomiaru wielkości charakteryzujących właściwości optyczne światłowodów przenoszących polaryzację**

### **4.1. Wprowadzenie**

Rozwój sensoryki światłowodowej i telekomunikacji światłowodowej związany jest nierozdzielnie z rozwojem metod i narzędzi pomiarowych przeznaczonych dla tych technik, a w szczególności przeznaczonych do badań i pomiarów światłowodów stosowanych w tych technikach. ŚPP a w szczególności fotoniczne ŚPP są stosowane powszechnie w sensoryce światłowodowej, a także wykorzystywane w telekomunikacji światłowodowej, ze względu na możliwość kształtowania ich właściwości do konkretnych zastosowań. Projektowanie czujnika światłowodowego danej wielkości wymaga zaprojektowania światłowodu o odpowiedniej czułości nie tylko na tą wielkość, ale także na wielkości wpływające otoczenia, w szczególności temperaturę. W procesie tego projektowania niezbędnym etapem jest pomiar wielkości charakteryzujących zaprojektowany światłowod.

Zjawisko dyspersji polaryzacyjnej powoduje poszerzenie impulsów światła w liniach światłowodowych, jako rezultat istniejącej w nich resztkowej dwójłomności liniowej. Zjawisko to jest głównym ograniczeniem w wysoko przepustowych systemach telekomunikacji optycznej. Celem minimalizacji tego ograniczenia stosuje się kompensatory dyspersji polaryzacyjnej. W wielu układach tych kompensatorów wykorzystuje się ŚPP jako elementy kompensujące [50–52].

Pomiary wielkości charakteryzujących właściwości ŚPP w szczególności fotonicznych spełniają istotną rolę w rozwoju sensoryki światłowodowej i telekomunikacji światłowodowej.

### **4.2. Metody pomiaru fazowej dwójłomności modowej**

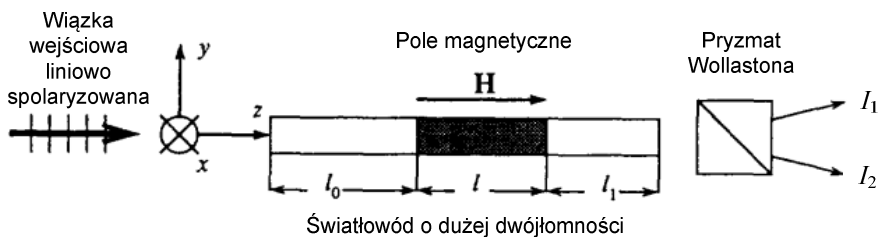
Wyznaczanie fazowej dwójłomności modowej ŚPP przeprowadza się zwykle na podstawie pomiaru jego drogi dudnień.

Obserwacja światłowodu świecącego w wyniku rozpraszania Rayleigh'a, jest podstawą prostej metody (pierwszej historycznie) pomiaru drogi dudnień [53]. Ponieważ dipol pola elektrycznego promieniuje w kierunku prostopadłym do swojej osi, zatem w momentach takiego ustawienia polaryzacji względem kierunku obserwacji, będziemy obserwować świecenie światłowodu w postaci jasnych i ciemnych prążków o okresie powtarzalności równym drodze dudnień. Ta metoda jest odpowiednia tylko dla konwencjonalnych światłowodów przenoszących polaryzację, w których można uzyskać odpowiedni kontrast prążków. Wykorzystywana dotychczas w świetle widzialnym. Wadą metody jest wymagana znaczna moc promieniowania wprowadzonego do badanego światłowodu, ze względu na niską moc światła rozproszonego [54].

Opracowano metody wyznaczania drogi dudnień światłowodów z wykorzystaniem znanych technik polaryzacyjnej optycznej reflektometrii światłowodowej w dziedzinie czasu (ang. polarization optical time-domain reflektometry – P-OTDR) i polaryzacyjnej optycznej reflektometrii światłowodowej w dziedzinie częstotliwości (ang. polarization optical frequency-domain reflektometry – P-OFDR). Obydwie te techniki bazują na wstecznym rozpraszaniu Rayleigh’a. Jeżeli na wejściu reflektometru OTDR jest polaryzator, a przed fotodoektorem umieści się ortogonalnie zorientowany analizator, to uzyskuje się reflektometr P-OTDR. Wyjściowy sygnał wstecznego rozpraszania w takim reflektometrze jest zmodulowany sygnałem periodycznym o drodze dudnień [55]. Informacje o drodze dudnień testowanego światłowodu z wykorzystaniem reflektometru P-OFDR, w którym jako analizator zastosowano sprzęgacz polaryzacyjny, uzyskuje się na podstawie analizy widmowej gęstości mocy sygnału wstecznego rozpraszania [29, 56, 57].

Wytworzenie lokalnego zaburzenie w testowanym światłowodzie, takiego jak lokalne oddziaływanie pola magnetycznego na skutek efektu Faraday’a, lub punktowy nacisk wywołujący zmianę dwójłomności światłowodu na skutek efektu elastooptycznego, jest podstawą metod pomiaru drogi dudnień światłowodów [58, 59].

Podstawowe elementy w pomiarze drogi dudnień światłowodu przenoszącego polaryzację metodą bazującą na magnetoptycznej modulacji polaryzacji w światłowodzie przedstawiano na rysunku 4.1 [58]. Liniowo spolaryzowana wiązka światła jest wprowadzona do światłowodu. Pole magnetyczne obraca płaszczyznę polaryzacji wiązki światła w sekcji światłowodu, na które działa to pole, na skutek efektu Faraday’a.



Rys. 4.1. Podstawowe elementy w pomiarze drogi dudnień światłowodu przenoszącego polaryzację [58]

Wiązka światła z wyjścia badanego światłowodu jest dzielona na dwie wiązki przez pryzmat Wollastona a następnie te dwie wiązki są przetwarzane przez fotodetektory na sygnały elektryczne. Drogi dudnień testowanego światłowodu można wyznaczyć na podstawie analizy sygnału elektrycznego układu przy przesuwaniu pola magnetycznego wzdłuż światłowodu. W tym celu, wyznacza się natężenie pola elektrycznego na wyjściu pryzmatu Wollastona, korzystając z metody macierzy Jonesa dla układu przedstawionego na rysunku 4.1.

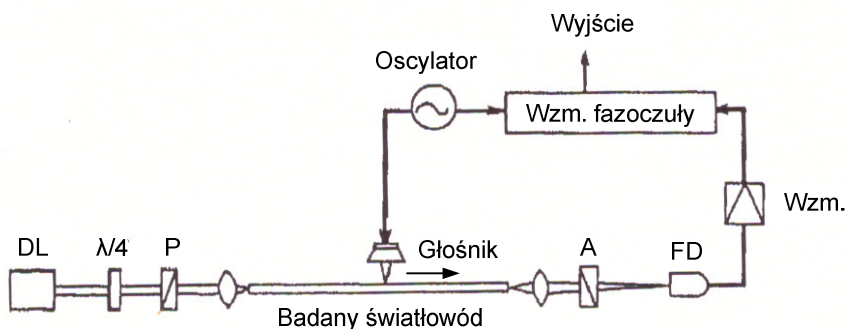
Elektryczny sygnał wyjściowy układu wyznaczony jako iloraz różnicy i sumy elektrycznych sygnałów proporcjonalnych do natężenia wiązek z wyjścia pryzmatu ma postać [58].

$$S = 2\Omega \frac{\sin(\Delta\varphi/2)}{\Delta\varphi/2} \cos(\Delta\varphi/2 + \Delta\varphi_1). \quad (4.1)$$

gdzie:  $\Omega$  oznacza kąt skręcenia płaszczyzny polaryzacji wiązki światła liniowo spolaryzowanego,  $\Delta\varphi$  oraz  $\Delta\varphi_1$  oznaczają różnice fazy modów polaryzacji na odcinkach  $l$  oraz  $l_1$  światłowodu, odpowiednio. Jeżeli natężenie pola magnetycznego  $H$  i jego rozkład przestrzenny są niezmiennie, przy utrzymaniu stałej długości  $l$  światłowodu, różnica fazy  $\Delta\varphi$  jest także niezmienna, zatem wartość wyrażenia  $2\Omega(\sin(\Delta\varphi/2)/(\Delta\varphi/2))$  jest także stała. Przesuwając pole magnetyczne wzdłuż osi światłowodu, utrzymując przy tym stałe jego natężenie i rozkład przestrzenny oraz długość  $l$  światłowodu, powoduje się zmianę  $\Delta\varphi_1$  wraz ze zmianą długości  $l_1$ . Sygnał wyjściowy jest zatem zmodulowany przebiegiem  $\cos(\Delta\varphi/2 + \Delta\varphi_1)$ , a jego amplituda jest stała. Zmiana długości światłowodu  $l_1$ , która wywoła zmianę różnicy faz  $\Delta\varphi_1$  o wartość  $2\pi$ , jest równa drodze dudnień testowanego światłowodu.

Bezwzględny błąd pomiaru tej metody jest mniejszy niż 0,03 mm, a jej rozdzielczość lepsza niż 0,01 mm. Podstawową zaletą metody jest jej bezdotykowa zasada działania. Relatywnie duży wymiar podłużny urządzenia ogranicza możliwości jego praktycznego zastosowania.

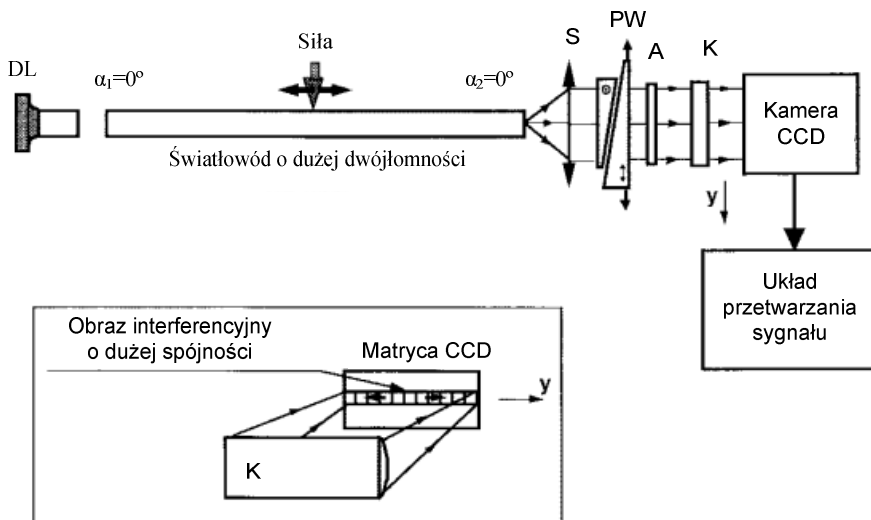
Duże znaczenie w praktyce pomiarowej uzyskała metoda pomiaru drogi dudnień ŚPP bazująca na lokalnym nacisku mechanicznym testowanego światłowodu. Pierwsze rozwiązanie układowe tej metody pokazuje rysunek 4.2. [59]. Układ zawiera mały głośnik z układem sprężynowym do zadawania nacisku na testowany światłowód z sinusoidalnie zmienną siłą z nałożoną składową stałą. Wiązka światła diody laserowej, po spolaryzowaniu, jest wprowadzona równolegle do jednej z osi polaryzacji światłowodu, to znaczy wzbudzony jest tylko jeden mod polaryzacji tego światłowodu. Drugi mod wzbudzony jest pod wpływem nacisku na światłowód. Wiązka światła z wyjścia światłowodu po przejściu przez analizator jest przetworzona na sygnał prądowy w fotodiodzie. Sygnał ten jest doprowadzony do wzmacniacza prądu, a następnie do wzmacniacza synchronicznego.



Rys. 4.2. Układ do pomiaru fazowej dwójłomności modowej metodą nacisku mechanicznego [59]

Jeżeli zarejestrować sygnał wyjściowy wzmacniacza synchronicznego w funkcji położenia punktu nacisku wzdłuż osi podłużnej światłowodu, to drogę dudnień wyznacza można bezpośrednio jako okres zarejestrowanego przebiegu. Metoda umożliwia pomiar fazowej dwójłomności modowej światłowodów bez pokrycia z błędem względnym 0,3% oraz światłowodów z pokryciem nylonowym z błędem 3%.

Jedną z modyfikacji powyższego układu do pomiaru fazowej dwójłomności modowej ŚPP przedstawiono na rysunku 4.3 [10]. Światło z diody laserowej spolaryzowane polaryzatorem światłowodowym jest wprowadzone wzdłuż jednej z osi polaryzacji testowanego światłowodu wzbudzając w nim jeden mod polaryzacji. Osie polaryzacji na wyjściu badanego światłowodu są równoległe do osi polaryzacji pryzmatu Wollastona, soczewka kolimacyjna jest rozogniskowana w celu powiększenia prążków interferencyjnych na matrycy CCD. W tym stanie przez wszystkie elementy polaryzacyjne układu propaguje tylko jeden mod polaryzacji, dlatego na matrycy CCD nie obserwuje się prążków interferencyjnych. Punktowo działająca siła, na boczną powierzchnię światłowodu badanego, wywołuje w nim sprzężanie modów polaryzacji. Największe sprzężenie uzyskuje się, gdy siła działa pod kątem  $45^\circ$  do osi polaryzacji światłowodu. Wzbudzony drugi mod polaryzacji propaguje od punktu sprzężenia wzdłuż światłowodu i interferuje z wzbudzonym modem polaryzacji po przejściu przez analizator. Prążki interferencyjne obserwuje się na monitorze połączonym z matrycą CCD.



Rys. 4.3. Układ do pomiaru drogi dudnień i fazowej dwójłomności modowej światłowodów przenoszących polaryzację [10]

Przesuwanie punktu działania siły wzdłuż światłowodu zmienia różnicę fazy między modami polaryzacji, co prowadzi do przemieszczania się prążków interferencyjnych na ekranie monitora. Jeżeli różnica fazy między modami polaryzacji wyniesie  $2\pi$ , to obraz interferencyjny przemieści się o jeden prążek, a przesunięcie punktu działania siły jest równe drodze dudnień światłowodu. Długość dudnień można obliczyć z zależności

$$L_B = \frac{\Delta L}{\Delta M} \quad (4.2)$$

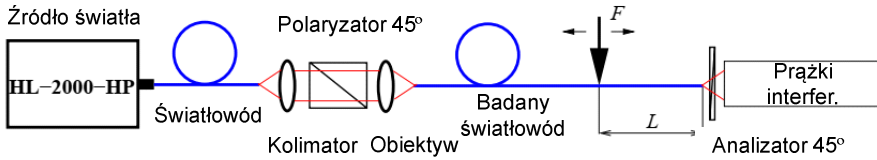
gdzie:  $\Delta L$  jest przesunięciem punktu działania siły wzdłuż światłowodu,  $\Delta M$  jest liczbą prążków interferencyjnych, o które przemieścił się obraz interferencyjny, odpowiadającą  $\Delta L$ .

Za modyfikację metody pomiaru drogi dudnień światłowodów przenoszących polaryzację, która bazuje na efekcie elastooptycznym można uznać sposób pomiaru przedstawiony w pracy [60]. Układ pomiarowy składa się z przestrajanego lasera oraz polarymetru jako miernika wyjściowego stanu polaryzacji badanego światłowodu. Przesuwany nacisk wzdłuż badanego światłowodu zrealizowano przy pomocy toczącego się po nim metalowego walca, z jednoczesną obserwacją wyjściowego stanu polaryzacji światłowodu na sferze Poincaré. Odległość między dwoma najbliższymi położeniami walca, przy której obserwowane przemieszczanie się wyjściowego stanu polaryzacji na sferze Poincaré wróci do stanu początkowego, odpowiada drodze dudnień testowanego światłowodu.

Metodę pomiaru fazowej dwójłomności modowej światłowodów przenoszących polaryzację w dziedzinie widma, która bazuje na efekcie elastooptycznym przedstawiono w pracy [12]. Na rysunku 4.4 przedstawiono schemat układu do pomiaru dwójłomności fazowej światłowodu tą metodą. W układzie zastosowano źródło światła białego i światłowodowy spektrometr do rejestracji widma interferencji modów polaryzacji. Widmo zarejestrowane przez spektrometr o Gaussowskiej funkcji odpowiedzi można zapisać w postaci wyrażenia [61, 62]

$$I(\lambda) = I_0(\lambda) \left\{ 1 + V(\lambda) \exp \left\{ - \left( \pi^2 / 2 \right) \left[ \Delta n_G(\lambda) L \Delta \lambda_R / \lambda^2 \right]^2 \right\} \cos \left[ (2\pi / \lambda) \Delta n(\lambda) L \right] \right\}. \quad (4.3)$$

gdzie:  $I_0(\lambda)$  jest widmem odniesienia (nie zmodulowanym),  $V(\lambda)$  jest widzialnością prążków interferencyjnych oraz  $\Delta \lambda_R$  jest szerokością funkcji odpowiedzi spektrometru.



Rys. 4.4. Układ do pomiaru fazowej dwójłomności modowej światłowodu w zależności od długości fali [12]

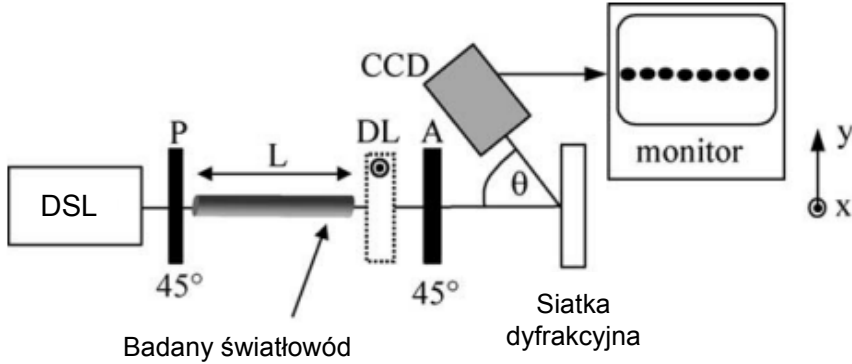
Odpowiedzią na przemieszczenie punktu sprzężenia wzdłuż testowanego światłowodu  $\Delta L = L_2 - L_1$ , jest obserwowane przesunięcie fazy widma (interferencyjnych prążków widma), z którego można wyznaczyć długość dudnień światłowodu zgodnie ze wzorem [12]

$$L_B(\lambda) = 2\pi \Delta L / \Delta \phi(\lambda), \quad (4.4)$$

gdzie:  $\Delta \phi(\lambda) = \phi_2(\lambda) - \phi_1(\lambda)$  jest zależną od długości fali zmianą fazy odpowiadającą dwóm funkcjom fazy  $\phi_2(\lambda)$  oraz  $\phi_1(\lambda)$  zrekonstruowanym z dwóch kolejnych widm. Dwuznaczność  $2m\pi$ , gdzie  $m$  jest liczbą całkowitą, w odtwarzaniu fazy z dwóch kolejnych zarejestrowanych widm można usunąć przy pomocy prostej procedury. W pierwszym kroku wybiera się w zarejestrowanym widmie ekstremum, które odpowiada specyficznej długości fali  $\lambda'$ . Następnie należy skontrolować przesunięcie widma w punkcie sprzęgania modów i w następnym kroku znaleźć takie przemieszczenie tego punktu  $\Delta L$ , dla którego inne ekstremum widma znajdzie się na długości fali  $\lambda'$  i zmiana fazy  $\Delta \phi(\lambda') = 2\pi$ . Podobnie kolejne zmiany fazy  $\Delta \phi(\lambda') = 2\pi, 2\pi, \dots$ , można wyznaczyć dla długości fali  $\lambda'$ . Drogę dudnień światłowodu wyznacza się z zależności (4.4).

### 4.3. Metody pomiaru grupowej dwójłomności modowej światłowodów

Interferometryczna metoda pomiaru grupowej dwójłomności modowej światłowodów, która bazuje na interferometrze polarymetrycznym, jest jedną z często stosowanych metod. Jedną z wersji układowych wykorzystywanych w tej metodzie przedstawiono na rysunku 4.5 [11].



Rys. 4.5. Schemat układu do pomiaru grupowej dwójłomności modowej światłowodu [11]

Jako szerokopasmowe źródło światła zastosowano diodę superluminescencyjną DSL. Polaryzator P i Analizator A są ustawione pod kątem  $45^\circ$  do osi polaryzacji testowanego światłowodu. Takie ich ustawienie powoduje wzbudzenie dwóch modów polaryzacji oraz ich interferencje po przejściu przez analizator. Siatka dyfrakcyjna rozczepia wyjściową wiązkę światła w kierunku horyzontalnym. W wyniku interferencji modów polaryzacji wyjściowe widmo jest modulowane przez prążki interferencyjne. Na podstawie pomiaru okresu  $\Lambda$  tego widma (odległości dwóch sąsiednich prążków interferencyjnych) można obliczyć moduł grupowej dwójłomności modowej badanego światłowodu [13]. Uwzględniając relacje na różnice fazy między modami polaryzacji, która ma postać

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi\Delta nL}{\lambda}, \quad (4.5)$$

zależność wiążącą przyrost różnicy fazy i przesunięcie widma

$$\frac{d\Delta\varphi}{d\lambda} \Lambda = \pm 2\pi, \quad (4.6)$$

gdzie znak  $\pm$  wskazuje, że nie znamy a priori czy rząd prążka rośnie czy maleje z długością fali, otrzymuje się na podstawie zależności (4.5) i (4.6) równanie

$$-\frac{2\pi L}{\lambda^2} \left( \Delta n - \lambda \frac{d\Delta n}{d\lambda} \right) \Lambda = \pm 2\pi. \quad (4.7)$$

Po prostym przekształceniu otrzymuje się wzór

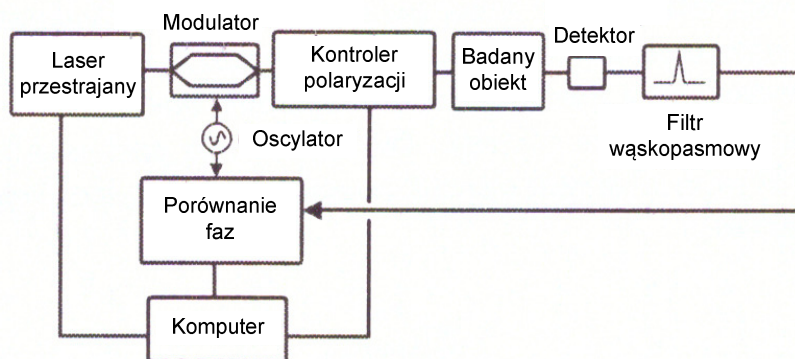
$$|\Delta n_G| = \frac{\lambda^2}{\Lambda L}. \quad (4.8)$$

gdzie  $L$  jest długością badanego światłowodu,  $\lambda$  jest średnią długością fali pomiędzy dwoma kolejnymi prążkami.

Kwarcowa płytką opóźniająca wprowadzona w wiązkę światła z wyjścia światłowodu pozwala wyznaczyć znak grupowej dwójłomności modowej, na podstawie obserwacji zmian odstępu między prążkami spektrogramu [11].

Wyznaczenia grupowej dwójłomności modowej światłowodu można dokonać wykorzystując do tego celu metody opracowane do pomiaru dyspersji polaryzacyjnej i zależność (3.9). Opracowano szereg metod pomiaru dyspersji polaryzacyjnej, z których przedstawione zostaną najczęściej wykorzystywane.

Metoda z modulacją nośnika i przesunięciem fazy sygnału modulującego częstotliwości radiowej [63]. Schemat układu pomiarowego stosowanego w tej metodzie przedstawiono na rysunku 4.6.



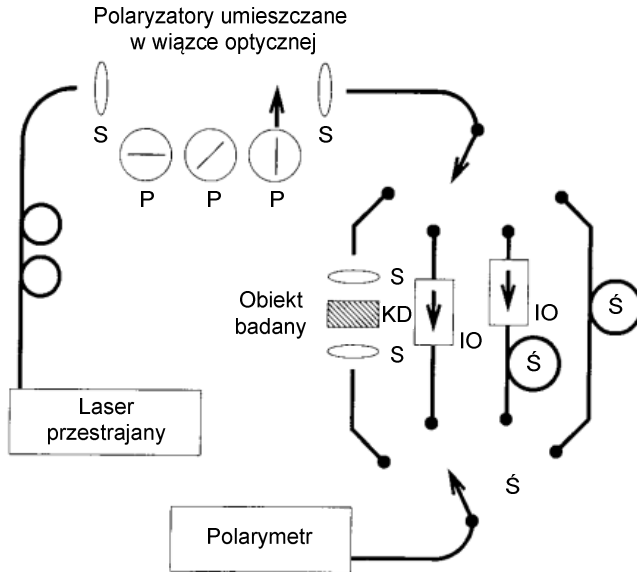
Rys. 4.6. Schemat układu do pomiaru przesunięcia fazy sygnału modulującego w metodzie z modulacją nośnika i przesunięciem fazy [63]

Przestrajany laser jest modulowany amplitudowo sygnałem z częstotliwością  $\Omega$ , (rzędu GHz). Zmodulowana wiązka światła po przejściu przez badany światłowód jest demodulowana przez fotodetektor. Przesunięcie fazy powodowane światłowodem wyznacza się na podstawie porównania fazy sygnału modulującego laser i sygnału wyjściowego z fotodetektora. Przesunięcie fazy jest związane z czasem przejścia wiązki światła przez światłowód. Zatem jeżeli wejściowy stan polaryzacji ulega zmianie, to można zmierzyć minimalną i maksymalną wartość przesunięcia fazy  $\Delta\varphi$  i wykorzystać je do wyznaczenia minimalnej i maksymalnej wartości opóźnienia propagacji przez światłowód. Ich różnica pozwala wyznaczyć różnicowe opóźnienie grupowe z zależności

$$\Delta\tau = \frac{\Delta\varphi_{\max} - \Delta\varphi_{\min}}{360 \cdot f_m} \quad (4.9)$$

gdzie  $f_m$  jest częstotliwością sygnału modulującego,  $\Delta\varphi$  jest wyrażane w stopniach.

Metoda analizy macierzy Jonesa. Metoda polega na wyznaczeniu macierzy Jonesa badanego światłowodu dla wybranych długości fali [64]. Podstawowe elementy tworzące układ do pomiaru grupowego opóźnienia różnicowego  $\Delta\tau$  światłowodu tą metodą pokazano na rysunku 4.7. Są nimi: przestrajany laser, przełączany polaryzator i polarymetr oraz dwójłomne kryształy i izolatory światłowodowe o znanych wartościach  $\Delta\tau$ , użyte do weryfikacji dokładności metody.



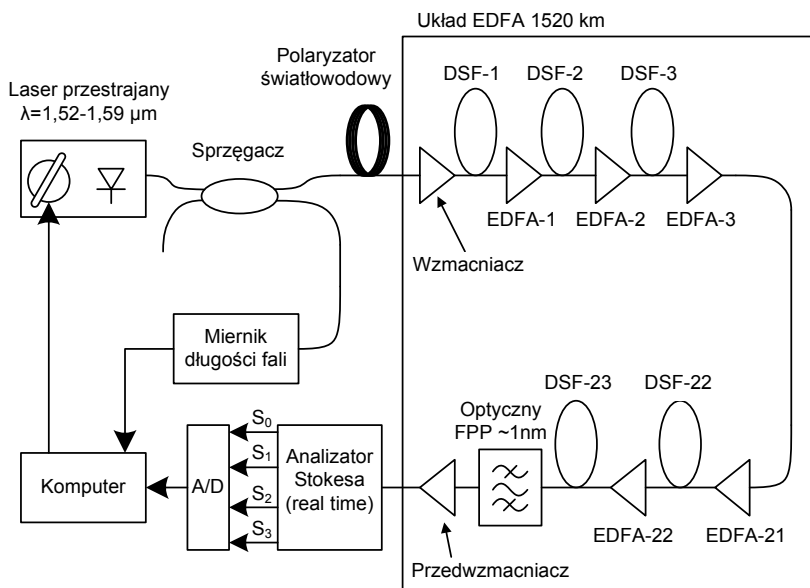
Rys. 4.7. Schemat układu do pomiaru przesunięcia fazy sygnału modulującego w metodzie z modulacją nośnika i przesunięciem fazy [63] Urządzenia użyte w pomiarze dyspersji polaryzacyjnej bazującym na analizie macierzy Jonesa. Oznaczenia: S – soczewki, P – polaryzator liniowy, KD – kryształ dwójłomny, IO – izolator optyczny, Ś – światłowod [64]

W czasie pomiaru wyznacza się elementy macierzy Jonesa dla ustalonych wartości długości fali. Różnicowe opóźnienie grupowe dla długości fali  $\lambda$  oblicza się na podstawie pary zmierzonych macierzy Jonesa dla dwóch bliskich długości fali  $\lambda_1$  i  $\lambda_2$  jednakowo odległych od długości  $\lambda$  na podstawie zależności [64]

$$\Delta\tau = \left| \tau_{g,1} - \tau_{g,2} \right| = \left| \frac{\text{Arg}(\rho_1 / \rho_2)}{d\omega} \right|, \quad (4.10)$$

gdzie:  $\tau_{g,1}$  i  $\tau_{g,2}$  oznaczają opóźnienia grupowe związane z głównymi stanami polaryzacji dla długości fali  $\lambda_1$  i  $\lambda_2$ , natomiast  $\rho_1$  i  $\rho_2$  są wartościami własnymi iloczynu  $[J(\omega+\Delta\omega)][J(\omega)]^{-1}$ , przy czym  $[J(\omega)]^{-1}$  jest odwrotną macierzą Jonesa;  $Arg$  oznacza argument funkcji. Dla uzyskania poprawnych wyników pomiarów powinien być spełniony warunek dostatecznie małej wartości wyrażenia  $\tau \Delta\omega$ , a mianowicie  $\tau \Delta\omega < \pi$ .

Metoda wykorzystująca zmianę stanu polaryzacji. Metoda bazuje na wykorzystaniu zmiany stanu polaryzacji spolaryzowanej wiązki światła w zależności od częstotliwości (długości fali) w światłowodzie [65]. Zmianie tej odpowiadają zmiany parametrów Stokesa, które przedstawiają stan polaryzacji na sferze Poincare. Przykład układu, który wykorzystano do pomiaru różnicowego opóźnienia grupowego sieci telekomunikacyjnej ze wzmacniaczami światłowodowymi tą metodą przedstawiono na rysunku 4.8.



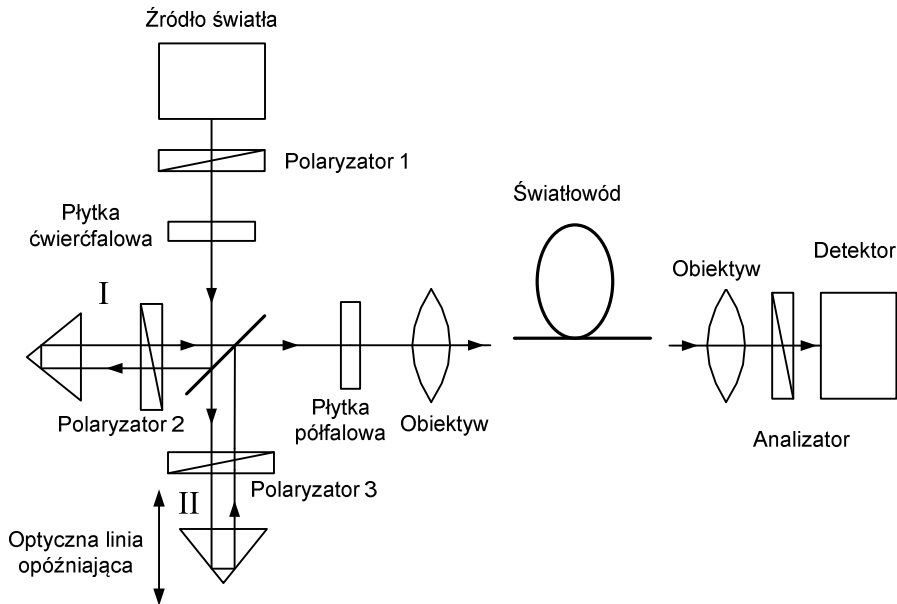
Rys. 4.8. Schemat układu do pomiar dyspersji polaryzacyjnej systemu telekomunikacyjnego [65]

Laser przestrajany służy jako źródło światła. Wiązka światła z lasera jest dzielona na dwie wiązki światła w sprzągaczu światłowodowym. Jedna z wiązek jest doprowadzona do miernika długości fali, a druga doprowadzona przez polaryzator światłowodowy do testowanego światłowodu, służy do pomiaru różnicowego opóźnienia grupowego. Na podstawie uzyskanych z pomiarów parametrów Stokesa dla wybranych długości fali na sferze Poincaré można prześledzić ewolucję stanu polaryzacji. Różnicowe opóźnienie grupowe można wyznaczyć z zależności [65]:

$$\Delta\tau = \Delta\phi / \Delta\omega = \frac{\Delta\phi\lambda^2}{2\pi c\Delta\lambda}, \quad (4.11)$$

gdzie:  $\Delta\phi$ ,  $\Delta\omega$ ,  $\Delta\lambda$ ,  $\lambda$ ,  $c$  oznaczają kolejno; różnice fazy (wektora Stokesa na sferze Poincare), zmianę częstotliwości kołowej, zmianę długości fali, centralną długość fali, prędkość światła w wolnej przestrzeni.

Metoda z wykorzystaniem interferometru Michelsona [66, 67]. Schemat układu do pomiaru różnicowego opóźnienia grupowego przedstawiono na rysunku 4.9. Wiązka światła z szerokopasmowego źródła jest dzielona na dwie wiązki przez pryzmat dzielący. Obie wiązki ortogonalnie spolaryzowane przez polaryzatory P2 i P3 są odbite przez pryzmaty i wracają do pryzmatu dzielącego, gdzie ich część się łączy. Przesuwając linie opóźniającą doprowadza się do równości długości dróg optycznych I i II. Przy pomocy płytki półfalowej dwie liniowo spolaryzowane wiązki światła, przez obrót ich płaszczyzny polaryzacji, wprowadza się do badanego światłowodu zgodnie z jego osiami polaryzacji.



Rys. 4.9. Schemat układu do pomiaru dyspersji polaryzacyjnej [66]

Dwie wiązki światła z wyjścia światłowodu i przejściu przez analizator mają polaryzację równoległą i mogą interferować, jeżeli różnicowy czas opóźnienia między nimi mieści się w czasie koherencji źródła. Na podstawie mocy optycznej sygnału interferencyjnego w funkcji względnej różnicy długości opóźnienia optycznego, różnicowe opóźnienie grupowe można wyznaczyć z zależności [67]:

$$\Delta\tau = \frac{2d}{c}, \quad (4.12)$$

gdzie:  $d$  oznacza odległość o jaką przesunięto optyczną linię opóźniającą od położenia w którym drogi optyczne I i II były równe.

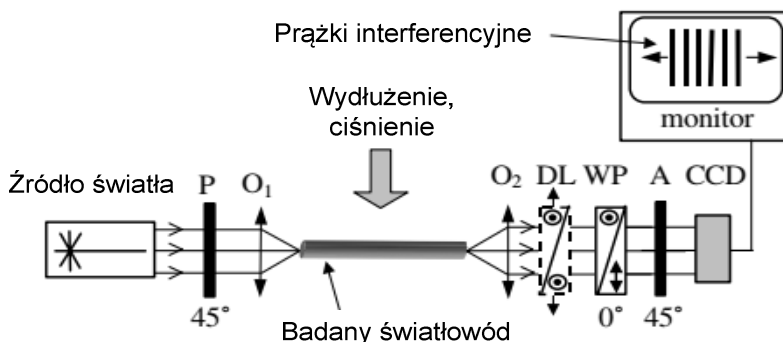
Metoda krótkich impulsów optycznych [63, 68]. W tej metodzie, krótkie impulsy optyczne z dużą częstotliwością powtarzania, o liniowej polaryzacji, są wprowadzane do ŚPP pod kątem  $45^\circ$  do jego osi polaryzacji. Każdy wejściowy impuls światła wzbudza w światłowodzie dwa mody polaryzacji o różnych prędkościach propagacji. W efekcie na wyjściu światłowodu pojawiają się oddzielne impulsy światła lub oddzielne maksima w jednym impulsie. Interwał czasowy między impulsami (lub między maksimami) jest odpowiednikiem różnicowego opóźnienia grupowego światłowodu.

#### **4.4. Metody pomiaru czułości dwójłomności modowej światłowodów przenoszących polaryzację na wielkości zewnętrzne**

##### **4.4.1. Metody pomiaru czułości dwójłomności fazowej na wielkości zewnętrzne.**

Układy pomiarowe stosowane w pomiarach czułości dwójłomności modowej światłowodów przenoszących polaryzację na wielkości zewnętrzne są podobne do układów wykorzystywanych w pomiarach dwójłomności modowej światłowodów.

Często stosowany w pomiarach czułości fazowej dwójłomności modowej ŚPP na wielkości zewnętrzne (temperaturę, ciśnienie i odkształcenie względne) układ interferometru polarymetrycznego, przedstawiony na rysunku 4.10, jest podobny do zmodyfikowanego układu wykorzystywanego w pomiarach fazowej dwójłomności modowej a przedstawionego na rysunku 4.5. Różnica polega jedynie na tym, że azymut polaryzatora jest ustawiony pod kątem  $45^\circ$  względem osi polaryzacji badanego światłowodu, co zapewnia jednakowe pobudzenie jego modów polaryzacji.



Rys. 4.10. Schemat układu do pomiaru czułości fazowej dwójłomności modowej na temperaturę, ciśnienie i odkształcenie względne światłowodów przenoszących polaryzację [11]

Wielkość wejściowa działając na odcinek  $L_b$  badanego światłowodu wywołuje wzrost różnicy fazy między modami polaryzacji co skutkuje przesuwaniem się prążków interferencyjnych. Czułość fazowej dwójłomności modowej na temperaturę oblicza się z zależności [17]

$$\frac{\partial \Delta n}{\partial T} = \frac{\lambda}{L_b} \frac{\Delta M}{\Delta T}, \quad (4.13)$$

gdzie:  $\Delta T$  jest zmianą temperatury która działa na odcinek  $L_b$  badanego światłowodu,  $\Delta M$  jest przesunięciem obrazu interferencyjnego, wywołanego zmianą temperatury, a wyrażonego liczbą prążków interferencyjnych.

Czułość fazowej dwójłomności modowej na ciśnienie oblicza się z zależności [11, 17]

$$\frac{\partial \Delta n}{\partial p} = \frac{\lambda}{L_b} \frac{\Delta M}{\Delta p}, \quad (4.14)$$

gdzie:  $\Delta p$  jest przyrostem ciśnienia działającego na odcinek  $L_b$  badanego światłowodu,  $\Delta M$  jest liczbą prążków interferencyjnych wyrażającą przesunięcie obrazu interferencyjnego wywołane przyrostem ciśnienia. Wzory (4.13) i (4.14) nie uwzględniają zmian długości odcinka  $L_b$  światłowodu pod wpływem działania temperatury i ciśnienia odpowiednio na czułość temperaturową oraz ciśnieniową fazowej dwójłomności modowej światłowodu.

Czułość fazowej dwójłomności modowej na odkształcenie względne oblicza się z zależności [11, 17]

$$\frac{\partial \Delta n}{\partial \epsilon} = \frac{\lambda}{L_b} \frac{\Delta M}{\Delta \epsilon} - \Delta n, \quad (4.15)$$

gdzie:  $\Delta\epsilon$  jest przyrostem odkształcenia odcinka  $L_b$  badanego światłowodu,  $\Delta M$  jest liczbą prążków interferencyjnych wyrażającą przesunięcie obrazu interferencyjnego wywołane przyrostem odkształcenia. Zależność (4.15) uwzględnia wpływ odkształcenia światłowodu na zmianę czułości odkształceniowej fazowej dwójłomności modowej światłowodu.

Czułość fazowej dwójłomności modowej na wielkość zewnętrzną można także wyznaczyć w układzie przestrajany laser-badany światłowód-polarymetr z obserwacji stanu polaryzacji wiązki wyjściowej ze światłowodu na sferze Poincaré [29, 60]. Jeżeli pod wpływem działania na światłowód wielkości zewnętrznej obserwowane przemieszczanie się wyjściowego stanu polaryzacji na sferze Poincaré wróci do stanu początkowego, to odpowiada zmianie różnicy fazy między modami badanego światłowodu o  $2\pi$ . Na tej podstawie oblicza się moduł zmiany fazy a następnie moduł czułości polarymetrycznej na temperaturę [29] i na odkształcenie [60] światłowodów przenoszących polaryzację. Do wyznaczenia znaku temperaturowej czułości polarymetrycznej tych światłowodów wykorzystano pomiar drogi dudnień w zależności od temperatury przy pomocy techniki polarymetrycznej reflektometrii częstotliwościowej [29].

Czułość polarymetryczną  $K_X$  światłowodów przenoszących polaryzację na wymuszenie  $X$  można wyznaczyć w dziedzinie widma wykorzystując interferometr polarymetryczny, w którym wraz ze światłowodem badanym umieszczono kryształ dwójłomny o grupowej dwójłomności modowej  $\Delta n_{Gk}$  jak pokazano na rysunku 4.2. Natężenie widma na wyjściu interferometru, w którym polaryzator i analizator zorientowano pod kątem  $45^\circ$  względem osi polaryzacji światłowodu, dla  $\Delta n_G < 0$  oraz  $\Delta n_{Gk} > 0$  określa zależność [18, 19]:

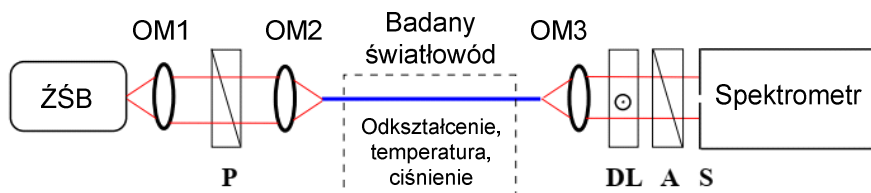
$$I(L, \lambda) = I_0 \{1 + V(L, \lambda) \cos\{(2\pi/\lambda)[\Delta n_k(\lambda)L_k + \Delta n(\lambda)L]\}\}, \quad (4.16)$$

gdzie:  $\Delta n$  i  $\Delta n_k$  oznaczają odpowiednio fazową dwójłomność modową badanego światłowodu i kryształu dwójłomnego,  $I_0(\lambda)$  jest natężeniem odniesienia widma oraz  $V(L, \lambda)$  oznacza człon widzialności określony zależnością

$$V(L, \lambda) = \exp\left\{-\left(\pi^2/2\right)\left\{[\Delta n_{Gk}(\lambda)L_k + \Delta n_G(\lambda)L]\Delta\lambda_R/\lambda^2\right\}^2\right\}. \quad (4.17)$$

Z zależności tej wynika że widzialność prążków interferencyjnych widma ma największą wartość dla tzw. długości fali wyrównania (equalization wavelength)  $\lambda_0$ , która spełnia równanie

$$\Delta n_{Gk}(\lambda_0)L_k = -\Delta n_G(\lambda_0)L. \quad (4.18)$$



Rys. 4.11. Schemat układu do pomiaru czułości polarymetrycznej światłowodów na odkształcenie, temperaturę i ciśnienie [19]

Podstawowymi elementami układu z rysunku 4.11, oprócz światłowodu badanego, są: źródło światła białego ŻŚB, obiektywy mikroskopowe OM1-3, polaryzator P, analizator A oraz szczelina S. Z zarejestrowanych widm z długością fali wyrównania przy działaniu na światłowód wielkości  $X$  można odtworzyć różnice fazy między modami polaryzacji w funkcji długości fali  $\Delta\varphi(\lambda) = \varphi_x(\lambda) - \varphi_y(\lambda)$ . Na tej podstawie wyznacza się czułość polarymetryczną  $K_X$  zgodnie z jej równaniem definicyjnym.

#### 4.4.2. Metody pomiaru czułości grupowej dwójłomności modowej na wielkość zewnętrzną

Czułość grupowej dwójłomności modowej na wielkość zewnętrzną  $d\Delta n_G/dX$  oblicza się często na podstawie zmierzonej czułości fazowej dwójłomności modowej na tę wielkość w funkcji długości fali  $d\Delta n/dX = f(\lambda)$ . Po dopasowaniu wielomianu do uzyskanej z pomiarów zależności  $d\Delta n/dX = f(\lambda)$  oblicza się czułość  $d\Delta n_G/dX$  na podstawie równania definicyjnego (3.14) [11, 17, 34].

Wyznaczenie czułości  $d\Delta n_G/dX$  światłowodów przenoszących polaryzację można wykonać bezpośrednio na podstawie pomiaru czułości funkcji kontrastu na wielkość zewnętrzną [69] lub pomiaru czułości różnicy dróg optycznych modów polaryzacji na wielkość zewnętrzną [11] w układzie interferometru polarymetrycznego ze źródłem światła białego. Wyznaczenie czułości  $d\Delta n_G/dX$  światłowodów przenoszących polaryzację można wykonać pośrednio na podstawie pomiaru czułości różnicowego opóźnienia grupowego modów polaryzacji na wielkość zewnętrzną w układach stosowanych do pomiaru tego opóźnienia.

Wyznaczenie czułości ciśnieniowej grupowej dwójłomności modowej na podstawie pomiaru różnicy dróg optycznych modów polaryzacji w zależności od ciśnienia  $R(p) = d\Delta n_G L$  przeprowadzono w układzie przedstawionym na rysunku 4.5 [11]. Różnicę dróg optycznych  $R(p)$  wyznacza się z zależności

$$R(p) = \frac{\lambda_0^2}{\Lambda(p)}. \quad (4.19)$$

gdzie:  $\lambda_0$  jest centralną długością fali wiązki światła emitowanej przez diodę SLED,  $\Lambda(p)$  jest odstępem między prążkami interferencyjnymi zależnym od ciśnienia  $p$ . Czułość ciśnieniową grupowej dwójłomności modowej badanego światłowodu oblicza się z zależności

$$\frac{d\Delta n_G}{dp} = \frac{1}{L_b} \frac{dR(p)}{dp}. \quad (4.20)$$

gdzie:  $dR(p)/dp$  jest ciśnieniową czułością różnicy dróg optycznych modów polaryzacji, którą wyznacza się jako nachylenie zmierzonej charakterystyki  $R = f(p)$ . Znak czułości  $d\Delta n_G/dp$  wyznaczono na podstawie znaku różnicy dróg optycznych dla ciśnienia  $p = 0$  oraz charakteru zmiany wartości bezwzględnej  $R$  przy wzroście ciśnienia.

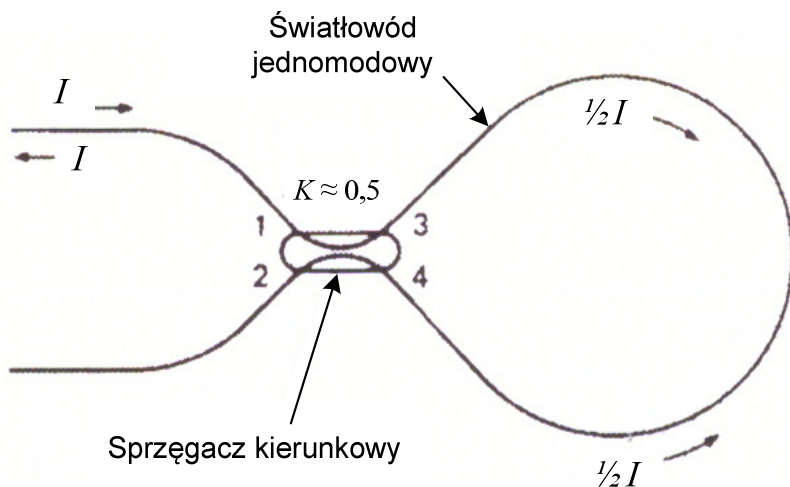
Temperaturową czułość różnicowego opóźnienia grupowego modów polaryzacji światłowodów przenoszących polaryzację przeprowadzono wykorzystując metodę macierzy Jonesa dla różnych stopni skręcenia badanego światłowodu [29, 64]

Odształceniową czułość różnicowego opóźnienia grupowego modów polaryzacji światłowodów przenoszących polaryzację przeprowadzono w pracy [60] wykorzystując metodę analizy macierzy Jonesa.

## 5. Światłowodowy interferometr pętlowy

### 5.1. Interferometr pętlowy ze światłowodem jednomodowym

Światłowodowy interferometr pętlowy (SIP) znany także jako światłowodowy interferometr Sagnaca, jest interferometrem dwuwiązkowym. Jeżeli pętla w tym interferometrze jest utworzona z jednomodowego światłowodu połączonego poprzez sprzęgacz 3 dB-owy, którego wejścia służą odpowiednio do wprowadzenia i odbioru sygnału, to jest to światłowodowy reflektor pętlowy (ang. fiber loop mirror) rysunku 5.1 [70]. Wiązka światła ze źródła jest dzielona w sprzęgaczu na dwie równe amplitudowo wiązki, które są wprowadzone do końców jednomodowego światłowodu uformowanego w pętlę. Wiązki te propagują w pętli, jedna zgodnie, a druga przeciwnie do ruchu wskazówek zegara. Wiązka światła sprzęgnięta z falowodem opóźnia się w fazie o  $\pi/2$  w stosunku do wiązki propagującej wzdłuż falowodu. Natężenie wiązki transmitującej w ramieniu 2 sprzęgacza jest sumą wiązki propagującej zgodnie ze ruchem wskazówek zegara o fazie  $\varphi$ , i wiązki propagującej przeciwnie, o fazie  $\varphi - \pi$ ; natężenia tych wiązek są równe. W rezultacie natężenie wiązki transmisyjnej jest równe zero.



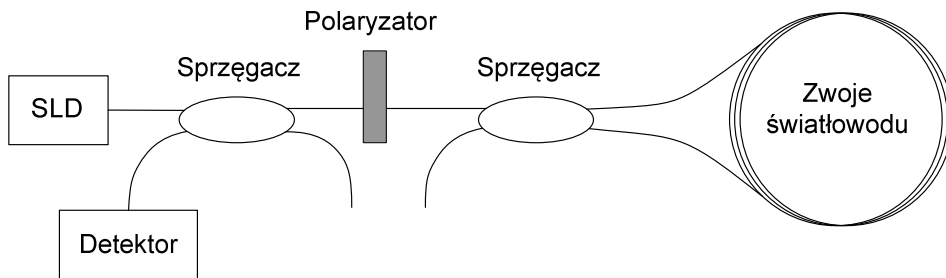
Rys. 5.1. Światłowodowy reflektor pętlowy [70]

Światłowodowy reflektor pętlowy przy współczynniku sprzężenia sprzęgacza różnym od 0,5 może pełnić funkcje przełącznika optycznego [71, 72]. Światłowodowe reflektory pętlowe wykorzystuje się w budowie laserów światłowodowych [73] i laserowych czujników światłowodowych [74–77].

Większość wielkości zewnętrznych działających na pętlę interferometru jednakowo wpływa na obydwie wiązki, wywołując jednakową zmianę ich fazy.

Zatem interferometr ten jest czuły jedynie na te wielkości zewnętrzne, które powodują złamanie jego symetrii.

Jedną z wielkości, która nie jednakowo działa na obydwie wiązki światła interferometru Sagnaca, a zatem może być nim przetwarzana, jest prędkość kątowna obrotu. Bardzo ważnym zastosowaniem interferometru Sagnaca jest żyroskop światłowodowy, którego zasada działania bazuje na tak zwanym efekcie Sagnaca: dwie fale świetlne, które propagują po tej samej zamkniętej drodze optycznej w przeciwnych kierunkach, wykazują różnice w czasie przejścia, a zatem różnice faz proporcjonalną do prędkości kątowej obrotu drogi optycznej. Czułość efektu Sagnaca jest bardzo mała, co wymaga ekstremalnej redukcji szumów w jego układzie optycznym poprzez stosowanie tzw. konfiguracji minimalnej. Minimalną konfigurację żyroskopu światłowodowego przedstawiono na rysunku 5.2.



Rys. 5.2. Żyroskop światłowodowy w konfiguracji minimalnej [78]

Natężenie światła na detektorze i przesunięcie fazy Sagnaca  $\Delta\varphi_s$  wynoszą [78]

$$I = I_0 [1 + \cos(\Delta\varphi_s)], \quad \Delta\varphi_s = \left( \frac{4\pi RL}{\lambda c} \right) \cdot \Omega \quad (5.1)$$

gdzie:  $I_0$  jest średnią wartością natężenia światła,  $L$  jest długością światłowodu w pętli,  $R$  jest promieniem pętli,  $c$  oznacza prędkość światła w próżni,  $\lambda$  jest długością fali, zaś  $\Omega$  jest prędkością kątową obrotu.

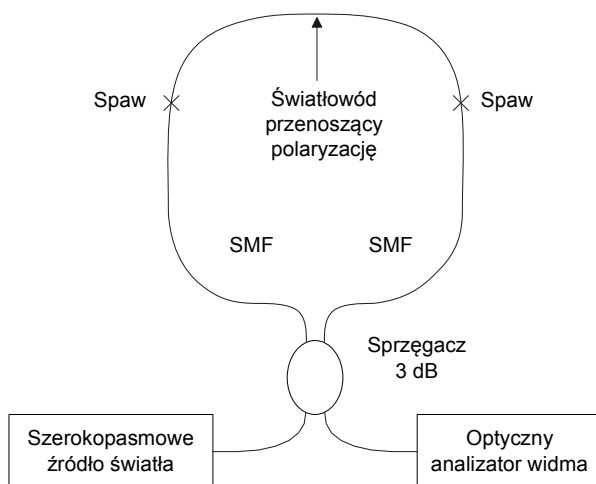
Po pierwszej propozycji światłowodowego żyroskopu w 1976 roku [79] powstały ich kolejne generacje. Żyroskopy światłowodowe produkowane seryjnie przez wiele firm znalazły zastosowanie w nawigacji lotniczej, morskiej i raketowej oraz do stabilizacji obiektów [80, 81]. Właściwości metrologiczne i użytkowe tych czujników są dalej intensywnie doskonalone, wykorzystując do tego celu, między innymi specjalnie optymalizowane światłowody mikrostrukturalne [82, 83].

Ważnym zastosowaniem interferometru Sagnaca jest czujnik natężenia prądu elektrycznego, w którym wykorzystuje się efekt Faradaya. Pole magnetyczne, równoległe do kierunku propagacji fali świetlnej w światłowodzie, wytwarza

w nim kołową dwójłomność optyczną. Przesunięcie fazy liniowo spolaryzowanej fali świetlnej (zmienionej z polaryzacji kołowej) z wyjścia pętli czujnika jest proporcjonalne do natężenia prądu płynącego w przewodniku, który obejmuje pętlę. Do odtwarzania magneto-optycznego przesunięcia fazy w czujnikach prądu elektrycznego wykorzystuje się techniki opracowane dla żyroskopów światłowodowych [84, 85]. Czujniki prądu elektrycznego wykorzystujące interferometr pętlowy wykazują lepszą stabilność czułości i zera oraz mniejszą wrażliwość na drgania niż polarymetryczne czujniki bazujące na efekcie Faradaya [86–88]. Właściwości metrologiczne i użytkowe tych czujników pozwalają na ich zastosowanie w energetyce i w przemyśle metalowym.

## 5.2. Interferometr pętlowy ze światłowodem przenoszącym polaryzację

Analityczny opis działania interferometru pętlowego ze światłowodem przenoszącym polaryzację podano w pracach [70, 89]. Tutaj przedstawiono zasadnicze wyniki tego opisu. Na rysunku 5.3 przedstawiono jego schemat.



Rys. 5.2. Interferometr pętlowy ze światłowodem przenoszącym polaryzację

Zaniedbując tłumienność 3-dB sprzęgacza, tłumienie światłowodu przenoszącego polaryzację i tłumienie światłowodu jednomodowego w pętli, funkcja transmisji i funkcja odbicia interferometru są opisane zależnościami:

$$T = \sin^2\left(\frac{\Delta\phi}{2}\right) = \frac{1}{2}[1 - \cos(\Delta\phi)], \quad (5.2)$$

$$R = \cos^2\left(\frac{\Delta\phi}{2}\right) = \frac{1}{2}[1 + \cos(\Delta\phi)], \quad (5.3)$$

gdzie  $\Delta\varphi = \varphi_x - \varphi_y$  jest różnicą faz pomiędzy modami polaryzacji  $x$  i  $y$ , propagującymi w ŚPP, którą określa zależność

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi \cdot L \cdot \Delta n}{\lambda}, \quad (5.4)$$

gdzie  $\Delta n$ ,  $L$ ,  $\lambda$  oznaczają odpowiednio dwójłomność fazową i długość ŚPP oraz długość fali.  $R$  i  $T$  są w przybliżeniu periodycznymi funkcjami długości fali.

Maksima transmisji widmowej pojawiają się przy spełnieniu warunku

$$2\pi\Delta nL / \lambda = (2m + 1)\pi, \quad (5.5)$$

gdzie  $m$  jest liczba całkowita.

Należy podkreślić, że oscylacje w widmie interferometru są związane z grupową dwójłomnością modową światłowodu  $\Delta n_G$ , co można pokazać obliczając pochodną różnicy faz względem długości fali

$$\frac{d\Delta\varphi}{d\lambda} = \frac{2\pi L}{\lambda^2} \left[ \lambda \frac{d\Delta n}{d\lambda} - \Delta n \right] = \frac{2\pi L}{\lambda^2} (-\Delta n_g). \quad (5.6)$$

Jeden okres oscylacji widma  $\Lambda$ , to jest odległość dwóch kolejnych maksimów lub minimów, odpowiada zmianie fazy  $\Delta\varphi = 2\pi$ , zatem na podstawie zależności (5.6) okres widma można zapisać w postaci wyrażenia

$$\Lambda = \frac{\lambda^2}{L \cdot \Delta n_G}, \quad (5.7)$$

a moduł grupowej dwójłomności modowej światłowodu przenoszącego polaryzację jest dany wzorem

$$|\Delta n_G| = \frac{\lambda^2}{\Lambda \cdot L}. \quad (5.8)$$

Zależność (5.8) umożliwia pomiar grupowej dwójłomności modowej światłowodu, na podstawie pomiaru okresu widma interferometru, w którego pętli jest zainstalowany badany światłowód.

Interferometr pętlowy ze ŚPP należy do grupy interferometrów modowych, w których interferencja zachodzi między modami w jednym włóknie światłowodowym. Interferometry modowe są powszechnie wykorzystywane w budowie czujników pomiarowych wielkości fizycznych i chemicznych, ze względu na zwartą budowę i szeroki zakres długości fal, w którym funkcjonują. Interferometry te, ze światłowodami fonicznymi charakteryzuje dodatkowo mała czułość temperaturowa i duża stabilność w czasie [90–94].

Działanie wielkości zewnętrznej  $X$  na ŚPP wywołuje zmianę różnicy faz pomiędzy modami polaryzacji  $x$  i  $y$ , propagującymi w tym światłowodzie. Zmianę tę, na podstawie zależności (5.4), wyraża równanie:

$$d\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \left[ L \frac{\partial \Delta n}{\partial X} dX + \Delta n \frac{\partial L}{\partial X} dX \right]. \quad (5.9)$$

Jeżeli ŚPP poddany działaniu wielkości  $X$ , jest włączony w pętlę interferometru, to wskutek zmiany różnicy faz  $d\Delta\varphi$  następuje przesunięcie widma interferometru  $d\lambda$  określone relacją  $d\lambda = (\lambda/2\pi)d\Delta\varphi$ . W ten sposób interferometr pętlowy ze ŚPP staje się światłowodowym przetwornikiem pomiarowym, przetwarzającym wielkość mierzoną – mezurand w przesunięcie jego widma.

Interferometr pętlowy z fonicznym ŚPP, jako przetwornik pomiarowy, jest wykorzystywany w budowie czujników pomiarowych quasi statycznych i zmiennych w czasie szeregu wielkości fizycznych i wybranych wielkości chemicznych: odkształcenia [95–99], ciśnienia [100–104], temperatury [105–108], siły [109], kąta skręcenia [110–113], zginania [114], parametrów drgań mechanicznych [115], poziomu cieczy [116] i glukozy [117, 118]. Interferometr pętlowy z fonicznym ŚPP jest stosowany także jako dyskryminator długości fali czujników z siatkami Bragga [119–122], oraz jako filtr grzebieniowy dla systemów zwielokrotniania falowego w telekomunikacji optycznej [123].



## **6. Światłowodowy interferometr pętlowy jako narzędzie do pomiaru wielkości charakteryzujących właściwości światłowodów przenoszących polaryzację**

### **6.1. Wprowadzenie**

Światłowodowy interferometr pętlowy (SIP) jest wszechstronnie wykorzystywanym układem światłowodowym zarówno w sensoryce światłowodowej jak i telekomunikacji optycznej. SIP ze światłowodem jednomodowym jest zwierciadłem światłowodowym, które umożliwia budowę laserów światłowodowych i światłowodowych czujników laserowych. SIP ze sprzęgaczem o sprzężeniu różnym od 0,5 może być wykorzystany jako przełącznik optyczny. Ważnymi zastosowaniami tego interferometru są opisane wcześniej żyroskop światłowodowy i czujnik natężenia prądu elektrycznego. SIP ze światłowodem przenoszącym polaryzację jest nie tylko powszechnie stosowanym czujnikiem wielu wielkości fizycznych, dyskriminatorem długości fali i filtrem grzebieniowym, ale jest także układem światłowodowym wykorzystywanym, w ograniczonym zakresie, do pomiaru wielkości charakteryzujących ŚPP. W szczególności umożliwia on pomiar modułu dwójłomności grupowej tych światłowodów. W przypadku konwencjonalnych ŚPP, dla których znany jest znak ich grupowej i fazowej dwójłomności modowej, umożliwia pomiar tych dwójłomności zarówno dla światłowodów o dwójłomności naprężeniowej jak i dwójłomności grupowej dla światłowodów z dwójłomnością kształtu. Procedura wyznaczania znaku dwójłomności grupowej ŚPP z wykorzystaniem interferometru pętlowego zaproponowana przez autora umożliwia przy jego pomocy pomiar dwójłomności grupowej tych światłowodów.

Interferometr pętlowy, z pewnymi modyfikacjami, pozwala także na pomiar dwójłomności modowej światłowodów o małej dwójłomności. Poniżej przedstawiono dwie metody tego pomiaru.

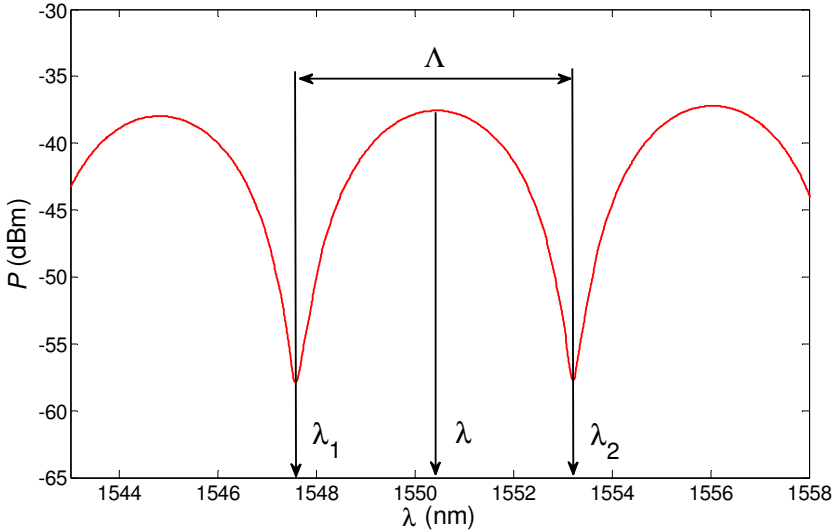
### **6.2. Pomiar dwójłomności modowych światłowodów z wykorzystaniem światłowodowego interferometru pętlowego.**

#### **6.2.1. Metoda pomiaru dwójłomności modowych światłowodów przenoszących polaryzację**

Wzór (5.8) jest równaniem definicyjnym pomiaru modułu dwójłomności grupowej światłowodu przenoszącego polaryzację mierzonej pośrednio. Moduł dwójłomności grupowej światłowodu wyznacza się na podstawie pomiaru okresu widma  $\Lambda$  interferometru z badanym światłowodem, długości tego światłowodu  $L$  i długości fali  $\lambda$ . Rysunek 6.1, na którym przedstawiono wycinek widma transmisyjnego interferometru pętlowego z odcinkiem światłowodu fotonicznego PM-1550-01 przenoszącego polaryzację o długości  $L = 350$  mm, ilustruje ten pomiar.

Okres widma  $\Lambda$  wyznacza się z zależności

$$\Lambda = \lambda_2 - \lambda_1, \quad (6.1)$$



Rys. 6.1. Zmierzony wycinek widma transmisyjnego interferometru pętlowego z odcinkiem światłowodu przenoszącego polaryzację

Pomiar długości odcinka badanego światłowodu wykonuje się zwykle przy pomocy przymiaru liniowego lub taśmy mierniczej. Światłowód badany, ze względów praktycznych, jest zazwyczaj ułożony swobodnie w pętlę i połączony ze sprzęgaczem i kontrolerem polaryzacji. W takim przypadku należy uwzględnić w pomiarze dwójłomność indukowaną światłowodu wywołaną jego zginaniem. Dwójłomność wyznaczona z zależności (5.8) jest sumą dwójłomności wewnętrznej i dwójłomności indukowanej wywołanej zginaniem światłowodu. Dwójłomność światłowodu kwarcowego o zewnętrznej średnicy  $2r$  zginanego w okrąg o promieniu  $R$  można wyznaczyć z zależności [124]

$$\Delta n_{zg} = 0,093 \left( \frac{r}{R} \right)^2, \quad (6.2)$$

Dla światłowodów o średnicy zewnętrznej  $250 \mu\text{m}$  zwiniętych w pętlę o promieniu  $8 \text{ cm}$  dwójłomność indukowana zginaniem wynosi  $\Delta n_{zg} = 2.3 \cdot 10^{-7}$ . W pomiarach konwencjonalnych światłowodów przenoszących polaryzację typu Bow-tie i Panda oraz fonicznych z pełnym rdzeniem, których wartości dwójłomności są większe od  $3 \cdot 10^{-4}$  efekt ich zginania w pętlę o promieniu zgięcia większym niż  $8 \text{ cm}$  można zaniedbać. Poza tym konwencjonalne ŚPP

z dwójłomnością naprężeniową Panda i Bow-tie mają wartości dwójłomności fazowej i dwójłomności grupowej prawie takie same [10, 29].

Zakłada się, że zależność fazowej dwójłomności modowej fotonicznych światłowodów przenoszących polaryzację z pełnym rdzeniem od długości fali można opisać empiryczną zależnością potęgową o postaci

$$\Delta n = \alpha \lambda^k, \quad (6.3)$$

gdzie  $\alpha$  i  $k$  są stałymi wyznaczanymi z pomiarów. Powyższe założenie ma wsparcie w literaturze [3, 32, 33, 125]. Jeżeli zależność (6.3) podstawić do równania definicyjnego na grupową dwójłomność modową (3.6), to otrzymuje się

$$\Delta n_G = -\alpha(k-1)\lambda^k. \quad (6.4)$$

Stałe  $\alpha$  i  $k$  mogą być wyznaczone na podstawie pomiarów zależności grupowej dwójłomności modowej światłowodu od długości fali i dopasowania do tej zależności funkcji potęgowej. Fazowa dwójłomność światłowodu może być obliczona na podstawie jego dwójłomności grupowej ze wzoru

$$\Delta n = -\Delta n_G / (k-1). \quad (6.5)$$

Wzór (6.5) wskazuje, że grupowa dwójłomność modowa różni się od fazowej dwójłomności modowej nie tylko amplitudą, ale dla wartości  $k = 2 \div 3$ , które są typowe dla światłowodów fotonicznych przenoszących polaryzację z pełnym rdzeniem [3, 32, 33, 125], także znakiem. Zatem biorąc pod uwagę fazową dwójłomność modową i grupową dwójłomność modową światłowodu jego osie polaryzacji szybka i wolna ulegają odwróceniu [16, 126].

#### **6.2.1.1. Procedura wyznaczania znaku grupowej dwójłomności modowej światłowodów przenoszących polaryzację z wykorzystaniem interferometru pętlowego**

W tym celu łączy się zgodnie z osiami polaryzacji dwa odcinki światłowodów przenoszących polaryzację jeden o długości  $L_1$  i dwójłomności grupowej  $\Delta n_{G1}$  o znanym znaku i wartości dwójłomności i drugi o długości  $L_2$  i dwójłomności grupowej  $\Delta n_{G2}$  o nieznanym znaku dwójłomności i znanej wartości absolutnej dwójłomności. Z obydwóch odcinków światłowodów tworzymy pętle Sagnaca. Różnica fazy między modami polaryzacji połączonych odcinków światłowodów wynosi

$$\Delta \varphi = \frac{2\pi \cdot L_1 \cdot \Delta n_1}{\lambda} + \frac{2\pi \cdot L_2 \cdot \Delta n_2}{\lambda} \quad (6.6)$$

Obliczając pochodną różnicy faz względem długości fali i uwzględniając równanie definicyjne grupowej dwójłomności modowej otrzymuje się

$$\frac{d\Delta\varphi}{d\lambda} = -\frac{2\pi(L_1\Delta n_G^1 + L_2\Delta n_G^2)}{\lambda^2} \quad (6.7)$$

Okres widma interferometru pętlowego z tak połączonymi odcinkami światłowodów wynosi

$$\Lambda_{12} = \frac{\lambda^2}{L_1\Delta n_G^1 + L_2\Delta n_G^2} \quad (6.8)$$

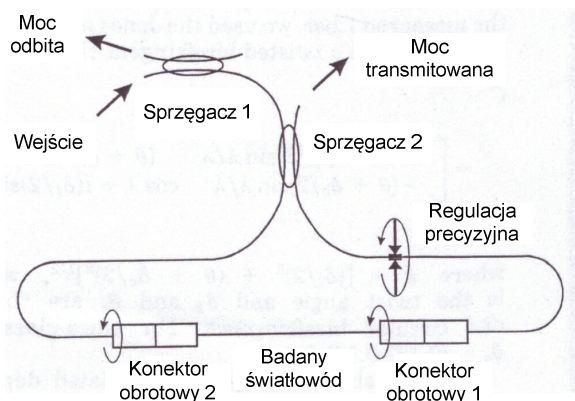
Z zależności (6.8) widać, że jeżeli znak grupowej dwójłomności modowej odcinka  $L_2$  jest taki sam jak znak grupowej dwójłomności modowej odcinka  $L_1$ , to okres widma  $\Lambda_{12}$  interferometru pętlowego z połączonymi odcinkami światłowodów ma wartość mniejszą (jest krótszy) niż okres widma z poszczególnymi odcinkami światłowodów. Natomiast jeśli znaki grupowej dwójłomności modowej odcinków światłowodów są różne to okres widma  $\Lambda_{12}$  interferometru pętlowego z połączonymi odcinkami światłowodów ma wartość większą (jest dłuższy) niż okres widma z poszczególnymi odcinkami światłowodów. Znając znak grupowej dwójłomności modowej jednego z odcinków światłowodów można łatwo w ten sposób wyznaczyć znak (nieznany) grupowej dwójłomności modowej drugiego z odcinków światłowodów.

Należy zauważyć, że dla dwóch odcinków światłowodów wykonanych z tego samego typu światłowodu, a zatem o tej samej wartości grupowej dwójłomności modowej, połączonymi zgodnie z ich osiami polaryzacji, zależność (6.8) przyjmuje postać zależności (5.8). Połączenie dwóch odcinków światłowodów przenoszących polaryzację zgodnie z ich osiami polaryzacji wykonuje się przy pomocy spawarki do światłowodów.

### **6.2.2. Metody pomiaru dwójłomności modowych światłowodów o małej dwójłomności**

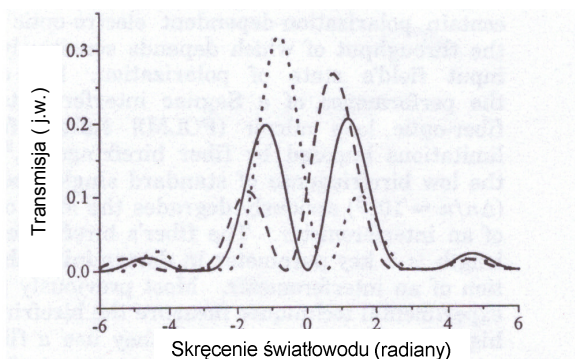
W pomiarach dwójłomności światłowodów o małej dwójłomności okres widma interferometru pętlowego ma dużą wartość dla krótkiego odcinka badanego światłowodu. Wymaga to stosowania źródła światła o ekstremalnie szerokim widmie i dużej stabilności oraz odpowiedniej procedury wyznaczania wartości okresu widma transmisyjnego interferometru zapewniającej wymaganą niepewność pomiaru. Dla znaczącego zmniejszenia okresu widma można zastosować odpowiednio długi odcinek badanego światłowodu. Jednak długi światłowod jest uciążliwy przy wykonywaniu pomiarów, a możliwe jego naprężenia i odkształcenia na szpuli są źródłem dodatkowej niepewności pomiaru okresu widma [124]. Opracowano kilka metod pomiaru dwójłomności światłowodów o małej dwójłomności, w których wyeliminowano powyższe niedogodności. Dwie z nich, wykorzystujące interferometr Sagnaca, przedstawiono poniżej.

Jedna z nich bazuje na skręcaniu badanego światłowodu zainstalowanego w pętli interferometru i obserwacji mocy sygnału na jego wyjściu transmisyjnym [127]. Do wejścia interferometru doprowadzono wiązkę światła laserowego o długości fali 1548 nm. Dodatkowo zastosowano dokładne justowanie układu przez wytworzenie małej dwójłomności w kilku milimetrowym odcinku światłowodu i skręcaniu osi polaryzacji tego odcinka rysunku 6.2.



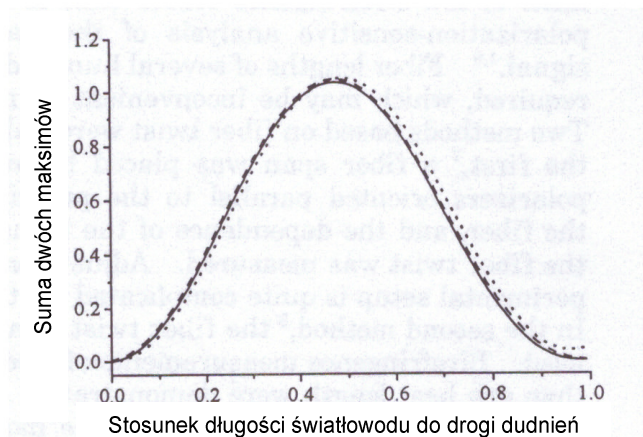
Rys. 6.2. Układ interferometru Sagnaca zastosowany w pomiarze dwójłomności światłowodu, który bazuje na skręcaniu światłowodu [127]

Wykorzystując macierz Jonesa dla portów sprzęgacza połączonych ze skręconym światłowodem obliczono zależność znormalizowanej mocy światła na wyjściu transmisyjnym interferometru od skręcenia światłowodu. Zależność taką dla długości światłowodu równej połowie drogi dudnień przedstawiono na rysunku 6.3. Krzywa przedstawiająca tę zależność ma dwa maksima o równej amplitudzie, gdy skręcenie obu końców światłowodu jest jednakowe oraz dwa maksima o różnej amplitudzie, gdy to skręcenie nieznacznie się różni.



Rys. 6.3. Obliczona typowa zależność znormalizowanej mocy światła na wyjściu transmisyjnym interferometru w zależności od skręcenia jego światłowodu. Krzywa ciągła odpowiada równemu skręceniu o  $\pi$  obydwu końców światłowodu; krzywa kropkowa –  $1,1\pi$  lewy port i  $\pi$  prawy port; krzywa kreskowa –  $\pi$  lewy port i  $1,1\pi$  prawy port [127]

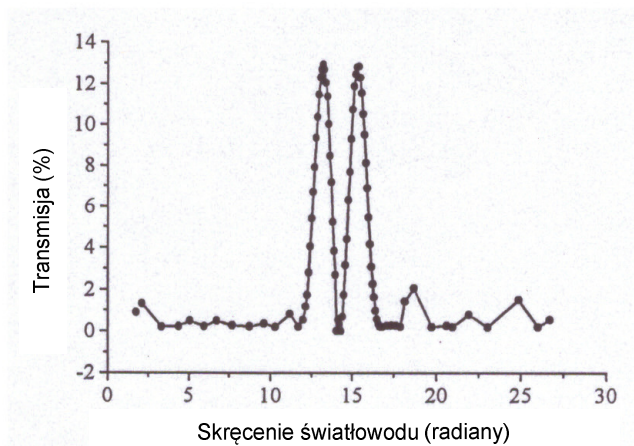
Rysunek 6.4 przedstawia zależność sumy dwóch maksimów od stosunku długości światłowodu i drogi dudnień, dla przypadku gdy ten stosunek jest taki sam (równy 0,5) i takie same warunki justowania, które użyto jak dla rysunku 6.3. Krzywa wykreślona linią ciągłą przedstawia przypadek dobrego justowania układu, gdy dwójłomność portów wyjściowych sprzęgacza jest taka sama. Linia kropkowana i przerywana reprezentują krzywe odpowiadające nie jednakowym skręceniom końców światłowodu z rysunku. 6.3. Z rysunku 6.4 widać, że te trzy krzywe są prawie identyczne.



Rys. 6.4. Obliczona znormalizowana moc optyczna na wyjściu transmisyjnym interferometru Sagnacaa w zależności od stosunku długości światłowodu i drogi dudnień.  
Krzywe jak na rysunku 6.3 [127]

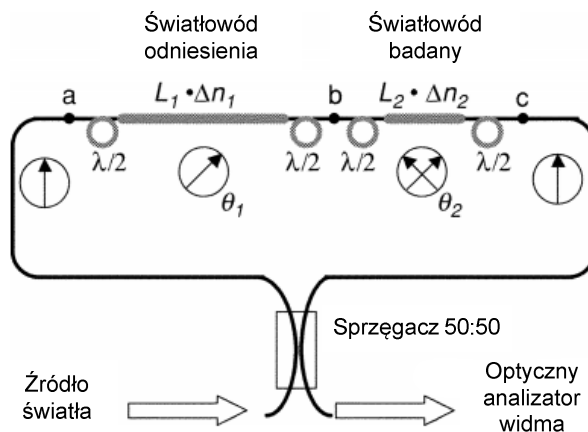
Na podstawie obliczeń ustalono, że amplituda maksimum zależy od stosunku długości światłowodu i drogi dudnień co wykorzystuje się do wyznaczenia dwójłomności światłowodu W pomiarach należy tylko znaleźć warunki, przy których występują w sygnale wyjścia transmisyjnego dwa maksima. Wykorzystując proponowaną metodę dokonano pomiaru dwójłomności światłowodu SMF-28 (Corning). Wykres z dwoma dobrze zdefiniowanymi maksimumami uzyskanymi przy pomiarze 2,1 m odcinka światłowodu przedstawia rysunek 6.5.

Porównanie zmierzonych maksimów z obliczonymi daje wartość drogi dudnień równą 15,7 m z dokładnością lepszą niż 10%. Wyznaczonej drodze dudnień odpowiada dwójłomność światłowodu równa  $9,86 \cdot 10^{-8}$ . Metoda umożliwia pomiar dwójłomności światłowodów, których droga dudnień zawiera się w zakresie 0,05–100 m.



Rys. 6.5. Zmierzona zależność znormalizowanej mocy transmisyjnej interferometru od skręcenia światłowodu. Długość światłowodu 2,1 m [127]

Druga z metod bazuje na połączeniu w pętli interferometru dwóch odcinków światłowodów: jednego jako światłowodu odniesienia o dużej dwójłomności i drugiego światłowodu badanego o małej dwójłomności [128]. W pętli interferometru zastosowano światłowodowe kontrolery polaryzacji działające jak półfalówki, które umożliwiają przestrajanie okresu widma interferometru. Schemat układu interferometru Lyot-Sagnaca przedstawia rysunek 6.6.



Rys. 6.6. Układ światłowodowego interferometru Lyot-Sagnaca. Strzałki wewnątrz okręgu przedstawiają kąty  $\theta_1$  i  $\theta_2$  szybkich osi polaryzacji każdego ze światłowodów i pętli interferometru [128].

Funkcja transmisyjna filtra Lyot-Sagnaca wyznaczona z wykorzystaniem macierzy Jonesa ma postać [128]

$$T(\theta_1, \theta_2) = \left[ \begin{aligned} &\sin\left(\frac{\pi}{\lambda}(\Delta n_1 \cdot L_1 + \Delta n_2 \cdot L_2)\right) \sin\left(\frac{\theta_1 + \theta_2}{2}\right) \cos\left(\frac{\theta_1 - \theta_2}{2}\right) + \\ &+ \sin\left(\frac{\pi}{\lambda}(\Delta n_1 \cdot L_1 - \Delta n_2 \cdot L_2)\right) \cos\left(\frac{\theta_1 + \theta_2}{2}\right) \sin\left(\frac{\theta_1 - \theta_2}{2}\right) \end{aligned} \right]^2. \quad (6.9)$$

Z zależności (6.9) widać, że gdy osie szybkie osie polaryzacji światłowodów ustawione przy pomocy półfalówek są takie same  $\theta_1 = \theta_2$ , efektywna wartość  $\Delta nL$  interferometru wynosi  $\Delta n_1 L_1 + \Delta n_2 L_2$ . W przypadku ustawienia szybkich osi polaryzacji światłowodów prostopadle  $\theta_1 - \theta_2 = 90^\circ$  efektywna wartość  $\Delta nL$  interferometru wynosi  $\Delta n_1 L_1 - \Delta n_2 L_2$ . Tym dwóm efektywnym wartościom  $\Delta nL$  interferometru odpowiadają dwie wartości okresu jego widma  $\Lambda_{S,L}$  określone zależnościami

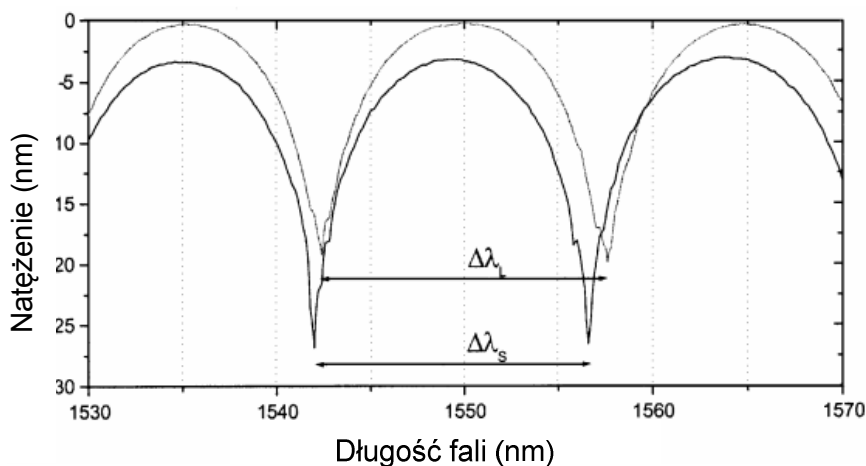
$$\Lambda_{S,L} = \frac{\lambda^2}{\Delta n_1 L_1 \pm \Delta n_2 L_2}, \quad (6.10)$$

gdzie  $\Lambda_S$  oznacza okres widma odpowiadający sumie iloczynów dwójłomności i długości światłowodów a  $\Lambda_L$  oznacza okres widma odpowiadający różnicy tych iloczynów. Z zależności (6.10) można wyznaczyć wzór na dwójłomność światłowodu badanego, który ma postać

$$\Delta n_2 = \frac{\lambda^2}{2L_2} \left( \frac{1}{\Lambda_S} - \frac{1}{\Lambda_L} \right). \quad (6.11)$$

Należy zauważyć, że wartości  $\Delta n_1$  oraz  $L_1$  światłowodu odniesienia nie są wymagane do obliczenia dwójłomności światłowodu badanego. Przedstawioną metodę zastosowano do pomiaru dwójłomności dostępnego w handlu światłowodu telekomunikacyjnego SMF-LS (Corning). W pomiarze użyto odcinek światłowodu Panda (Fujikura) o długości 0,43 m jako światłowód odniesienia, a odcinek SMF-LS o długości 30 m stanowił światłowód testowany.

Z pomiarów widma transmisyjnego, przedstawionego na rysunku 6.7 wyznaczono dwie wartości okresu widma  $\Lambda_S = 14,6$  nm oraz  $\Lambda_L = 15,2$  nm. Obliczona dwójłomność światłowodu SMF-LS z zależności (6.11) wynosi  $1,08 \cdot 10^{-7}$ . Wynik ten dobrze koresponduje z rezultatem podanym w pracy [127]. Przedstawiona metoda umożliwia pomiar dwójłomności w szerokim zakresie, w którym iloczyn  $\Delta nL$  zawiera się w przedziale od  $10^{-3}$  m do  $10^{-6}$  m.

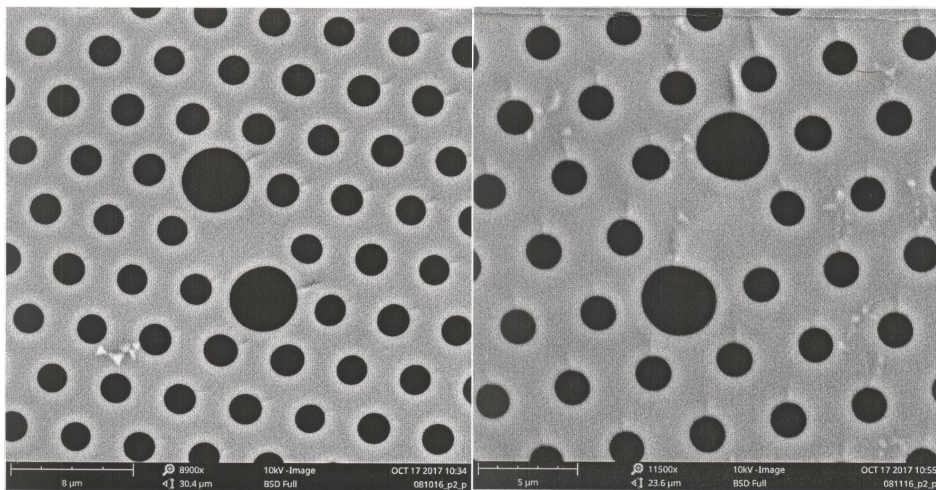


Rys. 6.7. Dwa periodyczne widma transmisyjne światłowodowego interferometru Lyot-Sagnaca uzyskane w pomiarze światłowodu SMF-LS [128]

### 6.2.3. Pomiary fazowej i grupowej dwójłomności modowej światłowodów przenoszących polaryzację – konwencjonalnych i fotonicznych z pełnym rdzeniem

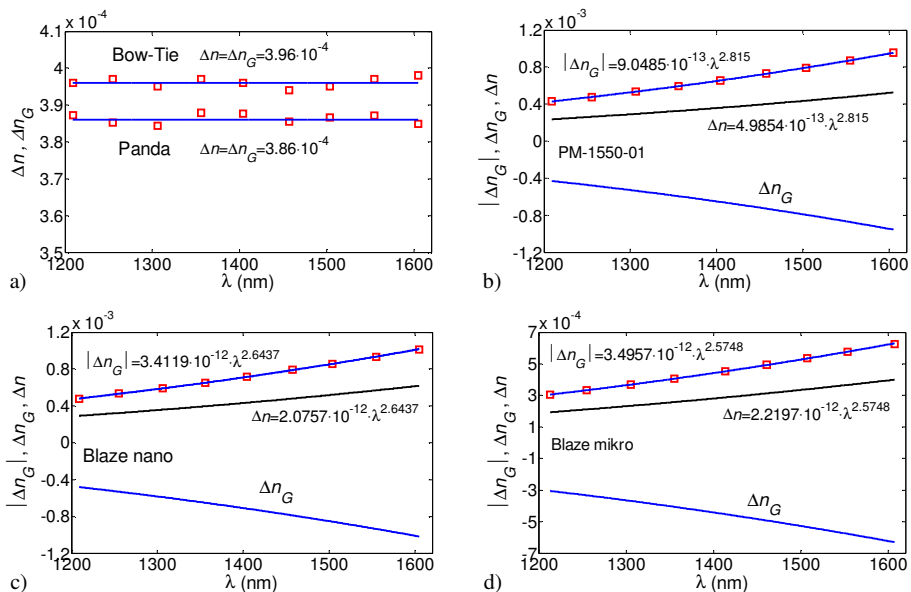
Pomiary przeprowadzono w układzie takim, jak przedstawiony na rysunku 5.2. Wykonano pomiary fazowej i grupowej dwójłomności modowej następujących typów światłowodów przenoszących polaryzację: konwencjonalnych typu Panda (SM15-PS-U25A) i Bow-tie (HB1500T) oraz fotonicznych ze stałym rdzeniem (PM-1550-01), Blaze mikro i Blaze nano, w zakresie długości fal 1250–1600 nm. Światłowody Blaze mikro i Blaze nano z rdzeniem domieszkowanym Er, Al, Ge, i F wytworzono w Pracowni Technologii Światłowodów Uniwersytetu Marii-Curie Skłodowskiej w Lublinie. Szkło, z którego wykonano rdzeń światłowodów wytworzono metodą MCVD. Poziom domieszkowania jest następujący: Er – 1000 ppm, Al – 5000 ppm, Ge – 3,1% molowego. Z wytworzonej preformy wyciągnięto pręciki. Przez złożenie 331 pręcików wytworzono pręt, który po przewężeniu wykorzystano jako materiał rdzenia światłowodu Blaze nano. Rozmiary obszarów domieszkowanego szkła w rdzeniu tego światłowodu są rzędu kilku nanometrów. W światłowodzie Blaze mikro rdzeń został wykonany z odpowiednio przewężonej preformy. Średnie wymiary parametrów struktury wynoszą: dla światłowodu Blaze mikro:  $d = 1,8 \mu\text{m}$ ,  $D = 3,7 \mu\text{m}$ ,  $\Lambda = 4,7 \mu\text{m}$ , dla światłowodu Blaze nano  $d = 2,1 \mu\text{m}$ ,  $D = 4,4 \mu\text{m}$ ,  $\Lambda = 4,4 \mu\text{m}$ . Strukturę obydwu światłowodów przedstawiono na rysunku 6.8. Pozostałe światłowody są dostępne w handlu. W nawiasach podano ich nazwy handlowe. Jako szerokopasmowe źródło światła zastosowano dwie diody SLED firmy Thorlabs S5FC1021S i S5FC1550S-A2 o centralnej długości fali

1310 nm i 1550 nm, 3-dB paśmie 85 nm i 90 nm oraz mocy optycznej odpowiednio 12,5 mW i 2,5 mW. Obydwie diody generują światło niespolaryzowane. Połączenie odcinków badanych światłowodów ze światłowodem SMF 28 przy tworzeniu pętli interferometru wykonano przez spawanie. Do tego celu zastosowano standardową spawarkę z łukiem elektrycznym. Dla poprawy współczynnika ekstynkcji w pętli interferometru włączono kontroler polaryzacji. Pomiar widma transmisyjnego interferometru przeprowadzono przy pomocy optycznego analizatora widma ANDO AQ-6315A. Wyniki pomiarów w postaci wykresów fazowej i grupowej dwójłomności modowej w funkcji długości fali badanych światłowodów przedstawiono na rysunku 6.9.



Rys. 6.8. Zdjęcie EMS przekroju poprzecznego światłowodów fotonicznych przenoszących polaryzację: Blaze nano (z lewej) i Blaze mikro (z prawej)

Znak grupowej dwójłomności modowej światłowodów Blaze mikro i Blaze nano wyznaczono stosując podaną powyżej procedurę, w której światłowod Panda wykorzystano jako światłowod o znanej wartości dwójłomności grupowej. Wyznaczony znak dwójłomności grupowej obydwóch testowanych światłowodów jest ujemny.



Rys. 6.9. Zmierzona charakterystyka modułu grupowej dwójłomności modowej w zależności od długości fali i obliczone charakterystyki grupowej dwójłomności modowej i fazowej dwójłomności modowej światłowodów a) Panda i Bow-tie, b) PM-1550-01, c) Blaze mikro, d) Blaze nano

Znak grupowej dwójłomności modowej światłowodów Blaze mikro i Blaze nano wyznaczono stosując podaną powyżej procedurę, w której światłowod Panda wykorzystano jako światłowod o znanej wartości dwójłomności grupowej. Wyznaczony znak dwójłomności grupowej obydwóch testowanych światłowodów jest ujemny.

### 6.2.3.1. Niepewność rozszerzona pomiaru dwójłomności

Wyznaczenie wartości dwójłomności modowej na podstawie zależności (5.8) przeprowadza się dokonując kilkukrotnych pomiarów  $\lambda$ ,  $\lambda_1$  i  $\lambda_2$  i obliczając ich wartości średnie arytmetyczne. Na podstawie zależności (6.1) oblicza się średnią arytmetyczną okresu widma. Do zależności (5.8) wstawia się obliczone wartości średnie arytmetyczne  $\Lambda = \overline{\Lambda}$ ,  $\lambda = \overline{\lambda}$ . Przyjęto, że wielkości  $\Lambda$  i  $\lambda$  nie są skorelowane, choć mierzone są tym samym przyrządem, ze względu na sekwencyjny pomiar tych wielkości. Pomiaru długości  $L$  odcinka światłowodu dokonuje się jednorazowo.

Niepewność rozszerzoną pomiaru dwójłomności modowej oszacowano metodą przybliżoną szacowania pomiarów pośrednich podaną w pracy [129]. Metoda ta odbiega od metody obliczania niepewności pomiarów zgodnej z przewodnikiem [130], ale ze względu na znacznie mniejszą pracochłonność i zachowanie wystarczającej zgodności wyników niepewności w obu metodach, można uznać ją za prawidłową. W metodach przybliżonych oddzielnie określa

się współczynnik rozszerzenia dla niepewności typu A i współczynnik rozszerzenia dla niepewności typu B. Niepewność rozszerzoną typu A dla każdej zmierzonej bezpośrednio wartości średniej wielkości wejściowej  $\bar{x}_j$  oblicza się z zależności

$$U_A(\bar{x}_j) = k_{Aj} u_A(\bar{x}_j), \quad (6.12)$$

w której  $k_{Aj} = t_{p,\nu}$  jest współczynnikiem rozszerzenia, równym kwantylowi  $t_{p,\nu}$  rozkładu t-Studenta, którego wartość zależy od poziomu ufności  $p$  i liczby stopni swobody  $\nu = n-1$  ( $n$  – liczba odczytów wyniku pomiarów);  $u(\bar{x}_j) = s_A(\bar{x}_j)$  jest niepewnością standardową typu A wartości średniej wielkości wejściowej  $\bar{x}_j$ , równą odchyleniu standardowemu tej wartości.

Analogicznie niepewność rozszerzona typu B wyraża się zależnością

$$U_B(\bar{x}_j) = k_{Bj} u_B(\bar{x}_j), \quad (6.13)$$

w której  $k_{Bj}$  jest współczynnikiem rozszerzenia dla niepewności typu B,  $u_B(\bar{x}_j)$  jest niepewnością standardową typu B wartości średniej wielkości wejściowej  $\bar{x}_j$ . Dla przyjętego poziomu ufności  $p = 0,95$  współczynnik rozszerzenia  $k_{Aj}$  przyjmuje wartość 2 dla dostatecznie dużej liczby wyników powtarzanych pomiarów i normalnego rozkładu ich błędów. Niepewności typu B wynikają głównie z niedokładności przyrządów pomiarowych, określonych błędami granicznymi, dla których przyjmuje się rozkład prostokątny. Dla rozkładu prostokątnego, współczynnik rozszerzenia  $k_{Bj} = p \cdot \sqrt{3}$  i dla  $p = 0,95$  jego wartość wynosi  $k_{Bj} = 1,65$ .

Niepewność rozszerzoną pomiaru wielkości  $y = f(x_j)$  na poziomie ufności  $p = 0,95$  dla przypadku gdy niepewności typu A są większe niż niepewności typu B, można oszacować na podstawie zależności [129]

$$U(y) = \sqrt{\sum_{j=1}^m c_j^2 [U_A^2(\bar{x}_j) + U_B^2(\bar{x}_j)]} = \sqrt{\sum_{j=1}^m c_j^2 [U_A^2(\bar{x}_j) + (\Delta_g \bar{x})^2]}, \quad (6.14)$$

gdzie  $c_j = \frac{\partial y}{\partial x_j}$  są współczynnikami wrażliwości,  $\Delta_g(\bar{x}_j)$  oznaczają błędy

graniczne przyrządów pomiarowych.

Ponieważ w pomiarze dwójłomności modalnej bazującej na interferometrze pętlowym niepewności typu A są większe od niepewności typu B, to niepewność rozszerzona na poziomie ufności 0,95 można oszacować na podstawie zależności (4.22), która dla dodatniej grupowej dwójłomności modowej danej zależnością (5.8) przyjmie postać

$$U(\Delta n_G) = \sqrt{c_\lambda^2 U^2(\lambda) + c_\Lambda^2 U^2(\Lambda) + c_L^2 U^2(L)}, \quad (6.15)$$

gdzie poszczególne współczynniki wrażliwości są określone zależnościami

$$c_\lambda = \frac{\partial \Delta n_G}{\partial \lambda} = \frac{2\lambda}{\Lambda L}, \quad c_\Lambda = \frac{\partial \Delta n_G}{\partial \Lambda} = -\frac{\lambda^2}{\Lambda^2 L}, \quad c_L = \frac{\partial \Delta n_G}{\partial L} = -\frac{\lambda^2}{\Lambda L^2}. \quad (6.16)$$

Dla dwójłomności ujemnej znaki współczynników wrażliwości określone zależnościami (6.16) mają znaki przeciwne. Okres widma wyznacza się z zależności (6.1) zatem niepewność okresu widma określa wzór

$$U(\Lambda) = \sqrt{c_{\lambda_2}^2 U^2(\lambda_2) + c_{\lambda_1}^2 U^2(\lambda_1)}, \quad (6.17)$$

w którym współczynniki wrażliwości wynoszą

$$c_{\lambda_1} = \frac{\partial \Lambda}{\partial \lambda_1} = -1, \quad c_{\lambda_2} = \frac{\partial \Lambda}{\partial \lambda_2} = 1. \quad (6.18)$$

Długość fali  $\lambda$  mierzy się kilkakrotnie analizatorem widma. Na podstawie wzoru (6.12) niepewność rozszerzona typu A wartości średniej długości fali wynosi

$$U_A(\bar{\lambda}) = k_{A\lambda} u_A(\bar{\lambda}), \quad (6.19)$$

gdzie  $k_{A\lambda} = t_{p,\nu}$  jest współczynnikiem rozszerzenia dla niepewności typu A pomiarów długości fali  $\lambda$ , równym kwantylowi rozkładu t-Studenta,  $u_A(\bar{\lambda})$  jest niepewnością standardową typu A wartości średniej długości fali.

Niepewność rozszerzoną pomiaru długości fali oblicza się z zależności

$$U(\bar{\lambda}) = \sqrt{U_A^2(\bar{\lambda}) + (\Delta_g \bar{\lambda})^2}, \quad (6.20)$$

w której  $\Delta_g \bar{\lambda}$  jest błędem granicznym analizatora widma światła użytego do pomiaru długości fali  $\lambda$ . Na błąd graniczny analizatora w pomiarze długości fali  $\lambda$  składa się błąd podstawowy pomiaru długości fali. Przy zastosowanym analizatorze  $\Delta_g \bar{\lambda} = 0,5 \text{ nm}$ .

Długość fali  $\lambda_1$  i  $\lambda_2$  mierzy się, jak poprzednio, analizatorem widma światła – kilkakrotnie. Niepewność rozszerzoną typu A wartości średnich długości fali  $\lambda_1$  i  $\lambda_2$  oblicza się ze wzorów

$$U(\bar{\lambda}) = \sqrt{U_A^2(\bar{\lambda}) + (\Delta_g \bar{\lambda})^2}, \quad (6.21)$$

w których  $k_{A\lambda_1}, k_{A\lambda_2}$  – współczynniki rozszerzenia dla niepewności typu A pomiarów długości fali odpowiednio  $\lambda_1$  i  $\lambda_2$ ,  $u_A(\bar{\lambda}_1)$ ,  $u_A(\bar{\lambda}_2)$  – niepewności standardowe typu A wartości średnich długości fali  $\lambda_1$  i  $\lambda_2$  odpowiednio.

Niepewność rozszerzoną pomiaru długości fali  $\lambda_1$  i  $\lambda_2$  wyznacza się z zależności

$$U(\bar{\lambda}) = \sqrt{U_A^2(\bar{\lambda}) + (\Delta_g \bar{\lambda})^2}, \quad (6.22)$$

gdzie  $\Delta_g \bar{\lambda}_1$  i  $\Delta_g \bar{\lambda}_2$  są błędami granicznymi analizatora widma użytego pomiaru długości odpowiednio fali  $\lambda_1$  i  $\lambda_2$ . Na błędy te składają się błąd nieliniowości i rozdzielczość odczytu (przedział próbkowania) analizatora. Nieliniowość użytego analizatora wynosi 0,020 nm w zakresie 40 nm. Pomiary wykonywano w przedziale długości fali (span) 20 nm. Zatem błąd nieliniowości w mierzonym przedziale przyjęto 0,010 nm. Za błąd rozdzielczości odczytu przyjęto połowę przedziału próbkowania, zakładając że przetwornik analogowo cyfrowy z mikroprocesorem zastosowany w analizatorze wykonuje poprawnie operacje zaokrąglania wyników pomiaru. Błąd rozdzielczości odczytu wynosi 0,010 nm. Zatem błędy graniczne  $\Delta_g \bar{\lambda}_1$  i  $\Delta_g \bar{\lambda}_2$  wynoszą dla zastosowanego analizatora  $\Delta_g \bar{\lambda}_1 = \Delta_g \bar{\lambda}_2 = 0,020$  nm.

Pomiary długości odcinków badanych światłowodów dwójłomnych wykonano jednorazowo liniałem mierniczym z błędem granicznym  $\Delta_g L = 0,5$  mm. Na niepewność pomiaru miała wpływ tylko niepewności typu B, która na poziomie ufności  $p = 0,95$  wynosi

$$U(L) = U_B(L) \cong \Delta_g L = 0,5 \text{ mm},$$

Bilans obliczeń niepewności rozszerzonej na poziomie ufności  $p = 0,95$  pomiaru dwójłomności modowej światłowodu fotonicznego PM-1550-01 dla długości fali 1550 nm przedstawiono w tabelach 6.1–6.5.

Tabela 6.1. Wyniki pomiarów długości fali  $\lambda$  i obliczeń jej niepewności rozszerzonej

| $j$ | $\lambda_j$<br>(m)·10 <sup>-9</sup> | $\bar{\lambda}$<br>(m)·10 <sup>-9</sup> | $u_A(\bar{\lambda})$<br>(m)·10 <sup>-9</sup> | $k_{A\lambda}$ | $U_A(\bar{\lambda})$<br>(m)·10 <sup>-9</sup> | $\Delta_g(\bar{\lambda})$<br>(m)·10 <sup>-9</sup> | $U(\bar{\lambda})$<br>(m)·10 <sup>-9</sup> |
|-----|-------------------------------------|-----------------------------------------|----------------------------------------------|----------------|----------------------------------------------|---------------------------------------------------|--------------------------------------------|
| 1   | 1549,920                            | 1549,960                                | 0,018                                        | 2,78           | 0,050                                        | 0,5                                               | 0,502                                      |
| 2   | 1549,920                            |                                         |                                              |                |                                              |                                                   |                                            |
| 3   | 1549,960                            |                                         |                                              |                |                                              |                                                   |                                            |
| 4   | 1550,00                             |                                         |                                              |                |                                              |                                                   |                                            |
| 5   | 1550,00                             |                                         |                                              |                |                                              |                                                   |                                            |

Tabela 6.2. Wyniki pomiarów długości fali  $\lambda_1$  i obliczeń jej niepewności rozszerzonej

| $j$ | $\lambda_{1j}$<br>(m)·10 <sup>-9</sup> | $\bar{\lambda}_1$<br>(m)·10 <sup>-9</sup> | $u_A(\bar{\lambda}_1)$<br>(m)·10 <sup>-9</sup> | $k_{A\lambda}$ | $U_A(\bar{\lambda}_1)$<br>(m)·10 <sup>-9</sup> | $\Delta_g(\bar{\lambda}_1)$<br>(m)·10 <sup>-9</sup> | $U(\bar{\lambda}_1)$<br>(m)·10 <sup>-9</sup> |
|-----|----------------------------------------|-------------------------------------------|------------------------------------------------|----------------|------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|----------------------------------------------|
| 1   | 1546,160                               | 1546,152                                  | 0,015                                          | 2,78           | 0,042                                          | 0,020                                               | 0,047                                        |
| 2   | 1546,120                               |                                           |                                                |                |                                                |                                                     |                                              |
| 3   | 1546,120                               |                                           |                                                |                |                                                |                                                     |                                              |
| 4   | 1546,200                               |                                           |                                                |                |                                                |                                                     |                                              |
| 5   | 1546,160                               |                                           |                                                |                |                                                |                                                     |                                              |

Tabela 6.3. Wyniki pomiarów długości fali  $\lambda_2$  i obliczeń jej niepewności rozszerzonej

| $j$ | $\lambda_{2j}$<br>(m)·10 <sup>-9</sup> | $\bar{\lambda}_2$<br>(m)·10 <sup>-9</sup> | $u_A(\bar{\lambda}_2)$<br>(m)·10 <sup>-9</sup> | $k_{A\lambda}$ | $U_A(\bar{\lambda}_2)$<br>(m)·10 <sup>-9</sup> | $\Delta_g(\bar{\lambda}_2)$<br>(m)·10 <sup>-9</sup> | $U(\bar{\lambda}_2)$<br>(m)·10 <sup>-9</sup> |
|-----|----------------------------------------|-------------------------------------------|------------------------------------------------|----------------|------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|----------------------------------------------|
| 1   | 1554,080                               | 1554,080                                  | 0,013                                          | 2,78           | 0,036                                          | 0,020                                               | 0,041                                        |
| 2   | 1554,080                               |                                           |                                                |                |                                                |                                                     |                                              |
| 3   | 1554,120                               |                                           |                                                |                |                                                |                                                     |                                              |
| 4   | 1554,040                               |                                           |                                                |                |                                                |                                                     |                                              |
| 5   | 1554,080                               |                                           |                                                |                |                                                |                                                     |                                              |

Tabela 6.4. Bilans niepewności pomiaru okresu widma amplitudowego interferometru pętlowego ze światłowodem dwójłomnym

| Mierzona wielkość<br>$X_j$                | Wartość średnia<br>$\bar{x}_j$ | Współczynnik wrażliwości<br>$c_j$ | Niepewność rozszerzona<br>$U(\bar{x}_j)$                          | $c_j^2 \cdot U^2(\bar{x}_j)$              |
|-------------------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|
| Długość fali $\lambda_1$                  | 1546,152·10 <sup>-9</sup> m    | -1                                | 0,047·10 <sup>-9</sup> m                                          | 0,002209·10 <sup>-18</sup> m <sup>2</sup> |
| Długość fali $\lambda_2$                  | 1554,080·10 <sup>-9</sup> m    | 1                                 | 0,041·10 <sup>-9</sup> m                                          | 0,001681·10 <sup>-18</sup> m <sup>2</sup> |
| Okres widma $\Lambda$                     | 7,928·10 <sup>-9</sup> m       |                                   | $\sum c_j^2 U^2(\bar{x}_j) = 0,003890 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$ |                                           |
| Niepewność pomiaru okresu widma $\Lambda$ |                                |                                   | $U(\Lambda) = 0,062 \cdot 10^{-9} \text{ m}$                      |                                           |

Tabela 6.5. Bilans niepewności rozszerzonej pomiaru dwójłomności modowej

| Mierzona wielkość<br>$X_j$                                                                                        | Wartość średnia<br>$\bar{x}_j$     | Współczynnik wrażliwości<br>$c_j$    | Niepewność rozszerzona<br>$U(\bar{x}_j)$          | $c_j^2 \cdot U^2(\bar{x}_j)$ |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------------------|------------------------------|
| Długość fali $\lambda$                                                                                            | $1549,960 \cdot 10^{-9} \text{ m}$ | $1,117 \cdot 10^3 \text{ m}^{-1}$    | $0,502 \cdot 10^{-9} \text{ m}$                   | $0,314 \cdot 10^{-12}$       |
| Okres widma $\Lambda$                                                                                             | $7,928 \cdot 10^{-9} \text{ m}$    | $1,092 \cdot 10^5 \text{ m}^{-1}$    | $0,062 \cdot 10^{-9} \text{ m}$                   | $46,36 \cdot 10^{-12}$       |
| Długość światłowodu $L$                                                                                           | 0,350 m                            | $2,474 \cdot 10^{-3} \text{ m}^{-1}$ | $0,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}$                     | $1,53 \cdot 10^{-12}$        |
| Dwójłomność<br>$\Delta n_G$                                                                                       | $-8,657 \cdot 10^{-4}$             |                                      | $\sum c_j^2 U^2(\bar{x}_j) = 48,2 \cdot 10^{-12}$ |                              |
| Niepewność rozszerzona pomiaru dwójłomności modowej $U(\Delta n_G) = 6,9 \cdot 10^{-6}$ $U_r(\Delta n_G) = 0,8\%$ |                                    |                                      |                                                   |                              |

W tabelach 6.6 i 6.7 zamieszczono wyniki pomiarów grupowej dwójłomności modowej i wyniki obliczeń niepewności tych pomiarów przeprowadzonych dla dwóch typów światłowodów: fotonicznego PM-1550-01 oraz konwencjonalnego Panda SM15-PS-U25A. Pomiary przeprowadzono dla trzech długości fali 1,55  $\mu\text{m}$ , 1,49  $\mu\text{m}$  i 1,31  $\mu\text{m}$ .

Tabela 6.6. Wyniki pomiarów grupowej dwójłomności modowej światłowodu PM-1550-01 oraz obliczeń niepewności

| Mierzona wielkość<br>$X_j$               | Wartość średnia<br>$\bar{x}_j$     |                                         |                                    |
|------------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------------|------------------------------------|
| Długość fali $\lambda$                   | $1549,960 \cdot 10^{-9} \text{ m}$ | $1400,052 \cdot 10^{-9} \text{ m}^{-1}$ | $1309,956 \cdot 10^{-9} \text{ m}$ |
| Okres widma $\Lambda$                    | $7,928 \cdot 10^{-9} \text{ m}$    | $8,588 \cdot 10^{-9} \text{ m}^{-1}$    | $9,116 \cdot 10^{-9} \text{ m}$    |
| Długość światłowodu $L$                  | 0,350 m                            | 0,350 m                                 | 0,350 m                            |
| Dwójłomność $\Delta n_G$                 | $-8,657 \cdot 10^{-4}$             | $-6,521 \cdot 10^{-4}$                  | $-5,378 \cdot 10^{-4}$             |
| Niepewność rozszerzona $U(\Delta n_G)$   | $6,9 \cdot 10^{-6}$                | $4,8 \cdot 10^{-6}$                     | $4,2 \cdot 10^{-6}$                |
| Niepewność rozszerzona $U_r(\Delta n_G)$ | 0,8%                               | 0,74%                                   | 0,78%                              |

Tabela 6.7. Wyniki pomiarów dwójłomności modowej światłowodu SM15-PS-U25A oraz obliczeń niepewności

| Mierzona wielkość<br>$X_j$               | Wartość średnia<br>$\bar{x}_j$     |                                         |                                    |
|------------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------------|------------------------------------|
| Długość fali $\lambda$                   | $1549,980 \cdot 10^{-9} \text{ m}$ | $1400,038 \cdot 10^{-9} \text{ m}^{-1}$ | $1309,972 \cdot 10^{-9} \text{ m}$ |
| Okres widma $\Lambda$                    | $7,343 \cdot 10^{-9} \text{ m}$    | $5,985 \cdot 10^{-9} \text{ m}^{-1}$    | $5,275 \cdot 10^{-9} \text{ m}$    |
| Długość światłowodu $L$                  | 0,845 m                            | 0,845 m                                 | 0,845 m                            |
| Dwójłomność $\Delta n_G$                 | $3,872 \cdot 10^{-4}$              | $3,876 \cdot 10^{-4}$                   | $3,848 \cdot 10^{-4}$              |
| Niepewność rozszerzona $U(\Delta n_G)$   | $3,2 \cdot 10^{-6}$                | $3,5 \cdot 10^{-6}$                     | $3,1 \cdot 10^{-6}$                |
| Niepewność rozszerzona $U_r(\Delta n_G)$ | 0,83%                              | 0,9%                                    | 0,81%                              |

Niepewność rozszerzona względna pomiaru fazowej dwójłomności modowej światłowodu fotonicznego PM-1550-01, zgodnie z prawem propagacji niepewności względnych i uwzględnieniu zależności (6.5), jest równa względnej niepewności rozszerzonej pomiaru grupowej dwójłomności modowej.

Z przeprowadzonych pomiarów i obliczonych niepewności wynika, że metoda pomiaru dwójłomności bazująca na interferometrze pętlowym z użyciem optycznego analizatora widma pozwala wyznaczyć dwójłomność modową światłowodów dwójłomnych z rozszerzoną niepewnością względną mniejszą niż 1% na poziomie ufności  $p = 0,95$ . Głównym składnikiem niepewności pomiaru dwójłomności tą metodą jest niepewność pomiaru okresu widma, który jest wyznaczany z pomiarów różnicy dwóch wielkości (długości fal) mierzonych bezpośrednio o wartościach niezbyt odległych od siebie. Należy zatem tak dobierać długość badanego światłowodu, aby okres widma był możliwie duży, mając na uwadze fakt, że przy zwiększaniu zakresu pomiaru optycznego analizatora widma maleje jego rozdzielczość odczytu danych (zwiększa się przedział próbkowania) i rośnie błąd nieliniowości oraz rośnie składowa niepewności pomiaru długości światłowodu. Zastosowany w pomiarze optyczny analizator widma powinien charakteryzować się dobrą rozdzielczością odczytu danych i małą nieliniowością. W pomiarach światłowodów dwójłomnych, których dwójłomność zależy od długości fali przy minimalizacji niepewności pomiaru dwójłomności przez zwiększanie okresu widma należy uwzględniać wpływ efektu uśredniania za okres widma.

Uzyskane wyniki pomiaru grupowej dwójłomności modowej światłowodów: fotonicznego PM-1550-01  $\Delta n_G = -8,657(69) \cdot 10^{-4}$  i Panda  $\Delta n_G = 3,872(32) \cdot 10^{-4}$  dla długości fali 1550 nm są zgodne, (co do modułu dla światłowodu fotonicznego), z wynikami pomiarów dwójłomności tego światłowodu uzyskanymi metodą skanowania długości fali i zamieszczonymi w pracach [14, 121]. Podane tam wartości grupowych dwójłomności modowych tych samych

typów światłowodów wynoszą odpowiednio  $8,65 \cdot 10^{-4}$  i  $3,85 \cdot 10^{-4}$ . Uzyskany wynik pomiaru dwójłomności  $\Delta n_G = 3,96 \cdot 10^{-4}$  światłowodu Bow-tie jest zgodny z wynikiem uzyskanym na podstawie drogi dudnień tego światłowodu  $L_B = 3,9$  mm dla  $1,55 \mu\text{m}$  [60].

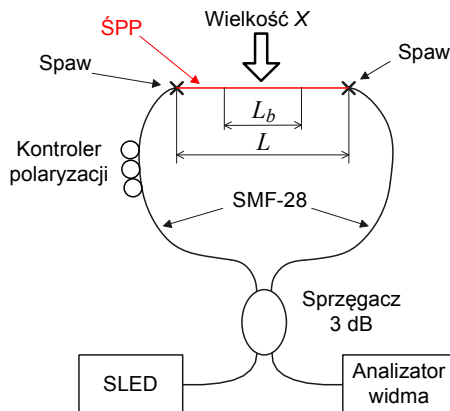
Wyniki pomiarów dwójłomności modowej światłowodów fotonicznych Blaze micro i Blaze nano potwierdzają, że dwójłomność modową światłowodów fotonicznych z pełnym rdzeniem przenoszących polaryzację w zależności od długości fali można opisywać zależnością potęgową. Wyniki pomiarów konwencjonalnych światłowodów dwójłomnych typu Panda oraz Bow-tie potwierdzają, że grupowa dwójłomność modowa tych światłowodów nie zależy od długości fali.

### 6.3. Pomiar czułości dwójłomności modowej światłowodów przenoszących polaryzację na wielkość zewnętrzną

#### 6.3.1. Pomiar czułości fazowej dwójłomności modowej światłowodów przenoszących polaryzację na wielkość zewnętrzną

##### 6.3.1.1. Metoda pomiaru

Na rysunku 6.9 przedstawiono schemat układu interferometru pętlowego do pomiaru czułości dwójłomności fazowej na wielkość zewnętrzną  $d\Delta n/dX$ . Działaniu wielkości zewnętrznej poddana jest tylko część odcinka badanego światłowodu przenoszącego polaryzację (ŚPP).



Rys. 6.9. Schemat układu pomiarowego

Widmo transmisyjne interferometru pętlowego jest prawie okresową funkcją długości fali mianowicie

$$T = [1 - \cos(2\pi \Delta n L / \lambda)] / 2, \quad (6.23)$$

gdzie  $\Delta n = n_x - n_y$  jest dwójłomnością fazową ŚPP, a  $n_x$  i  $n_y$  są współczynnikami załamania ŚPP w osi  $x$  i  $y$ ,  $L$  jest długością ŚPP zastosowanego w pętli

interferometru, i  $\lambda$  jest długością fali. Minima widma transmisyjnego pojawiają się dla długości fal kiedy spełniony warunek fazy

$$2\pi\Delta nL/\lambda = 2\pi m, \quad (6.24)$$

gdzie  $m$  jest liczbą całkowitą. Przyjmuje się, że tylko na część ŚPP o długości  $L_b$  zastosowanego w pętli interferometru działa wielkość zewnętrzna  $X$ . Zatem odcinek ŚPP, na który nie działa wielkość zewnętrzna wynosi  $L_a = L - L_b$ . Warunek fazy wymagany dla pojawienia się minimów w widmie transmisyjnym takiego interferometru można zapisać jako

$$(\Delta nL_a + \Delta nL_b)/\lambda = m, \quad (6.25)$$

Dla wyznaczenia czułości  $d\Delta n/dX$  oblicza się pochodną obu stron równania (6.25) względem wymuszenia  $X$ . Wynikiem tych obliczeń jest równanie o postaci

$$L_a \frac{d\lambda}{dX} \left[ \Delta n(\lambda) - \lambda \frac{d\Delta n(\lambda)}{d\lambda} \right] + L_b \frac{d\lambda}{dX} \left[ \Delta n(\lambda, X) - \lambda \frac{d\Delta n(\lambda, X)}{dX} \right] - \lambda L_b \frac{d\Delta n(\lambda, X)}{dX} - \lambda \frac{dL_b}{dX} \Delta n(\lambda, X) = 0 \quad (6.26)$$

Uwzględniając zależność na grupową dwójłomność modową

$$\Delta n_G = \Delta n - \lambda \frac{d\Delta n}{d\lambda}, \quad (6.27)$$

po wykonaniu prostych przekształceń otrzymujemy wzór

$$\frac{d\Delta n}{dX} = \frac{(1+\eta) \frac{d\lambda}{dX} \Delta n_G}{\lambda} - \frac{1}{L_b} \frac{dL_b}{dX} \Delta n, \quad (6.28)$$

gdzie:  $\eta = L_a/L_b$  oraz  $(1/L_b)(dL_b/dX)$  określa zmianę długości odcinka  $L_b$  światłowodu pod wpływem wielkości  $X$ . Wzór (6.28) stanowi podstawę do wyznaczenia czułości  $d\Delta n/dX$  światłowodu przenoszącego polaryzację, na podstawie pomiaru czułości przesunięcia widma  $k_{sX} = d\lambda/dX$  interferometru pętlowego z częścią tego światłowodu, poddaną działaniu wielkości mierzonej  $X$ , przy znanej jego dwójłomności fazowej  $\Delta n$  i dwójłomności grupowej  $\Delta n_G$ . W przypadku działania wielkości  $X$  na cały odcinek światłowodu,  $L_a = 0$ , zależność (6.28) przyjmuje postać

$$\frac{d\Delta n}{dX} = \frac{\frac{d\lambda}{dX} \Delta n_G}{\lambda} - \frac{1}{L} \frac{dL}{dX} \Delta n, \quad (6.29)$$

Mając wyznaczoną czułość dwójłomności fazowej światłowodu na wielkość zewnętrzną w funkcji długości fali, jego czułość dwójłomności grupowej na tą wielkość można obliczyć z jej zależności definicyjnej (3.12).

Zależności (6.28) i (6.29) przyjmują następującą postać: dla czułości dwójłomności fazowej na temperaturę  $d\Delta n/dT$

$$\frac{d\Delta n}{dT} = \frac{(1+\eta)\frac{d\lambda}{dT}\Delta n_G}{\lambda} - \alpha \cdot \Delta n, \quad (6.30)$$

$$\frac{d\Delta n}{dT} = \frac{\frac{d\lambda}{dT}\Delta n_G}{\lambda} - \alpha \cdot \Delta n, \quad (6.31)$$

gdzie  $\alpha$  jest liniowym współczynnikiem rozszerzalności temperaturowej światłowodu, dla czułości dwójłomności fazowej na odkształcenie  $d\Delta n/d\epsilon$

$$\frac{d\Delta n}{d\epsilon} = \frac{(1+\eta)\frac{d\lambda}{d\epsilon}\Delta n_G}{\lambda} - \Delta n, \quad (6.32)$$

$$\frac{d\Delta n}{d\epsilon} = \frac{\frac{d\lambda}{d\epsilon}\Delta n_G}{\lambda} - \Delta n, \quad (6.33)$$

oraz dla czułości dwójłomności fazowej na ciśnienie  $d\Delta n/dp$

$$\frac{d\Delta n}{dp} = \frac{(1+\eta)\frac{d\lambda}{dp}\Delta n_G}{\lambda}, \quad (6.34)$$

$$\frac{d\Delta n}{dp} = \frac{\frac{d\lambda}{dp}\Delta n_G}{\lambda}, \quad (6.35)$$

przy założeniu, że zmiana długości światłowodu wywołana działaniem na niego ciśnienia jest do pominięcia ( $dL_b \approx 0$ ).

Wzory (6.30)–(6.35) są równaniami definicyjnymi pomiaru pośredniego czułości fazowej dwójłomności modowej światłowodów przenoszących polaryzację odpowiednio na temperaturę, względne odkształcenie rozciągające i ciśnienie.

Na podstawie pomiaru czułości przesunięcia widma interferometru pętlowego na wielkość zewnętrzną można wyznaczyć czułość polarymetryczną (fazową)  $K_X$  światłowodu na wielkość zewnętrzną, która jest definiowana

zależnością (3.13), a może być także wyrażona przez relację (3.14). Na podstawie zależności (3.14) czułość  $d\Delta n/dX$  światłowodu wynosi

$$\frac{d\Delta n}{dX} = \frac{\lambda K_X}{2\pi} - \frac{\Delta n}{L} \frac{dL}{dX}. \quad (6.36)$$

Porównując zależności (6.28) i (6.36) otrzymuje się

$$K_X = \frac{2\pi(1+\eta)\Delta n_G}{\lambda^2} k_{sX}, \quad (6.37)$$

gdzie  $k_{sX} = d\lambda/dX$  jest czułością przesunięcia widma interferometru pętlowego na wielkość mierzoną  $X$ . Uwzględniając zależność  $\Delta n_G = \lambda^2/(L\Lambda)$  wzór (6.37) przyjmuje postać

$$K_X = \frac{2\pi(1+\eta)}{L\Lambda} k_{sX}, \quad (6.38a)$$

Jeżeli cały światłowód w pętli interferometru jest poddany działaniu wielkości zewnętrznej, to znaczy  $L_a = 0$ , zależność (6.38a) ma postać

$$K_X = \frac{2\pi}{L\Lambda} k_{sX}, \quad (6.38b)$$

W zależnościach (6.38a) i (6.39b)  $L$  jest jednostkową długością światłowodu 1 m, a  $\Lambda$  okresem widma interferometru pętlowego z jednostkową długością światłowodu w jego pętli. Znak czułości  $K_X$  wyznacza się na podstawie znaku dwójłomności grupowej światłowodu i znaku czułości  $k_{sX}$  korzystając z zależności (6.37).

Wykorzystując światłowodowy interferometr Sagnaca w pracy [20] wyznaczono moduł czułości dwójłomności fazowej na temperaturę światłowodów przenoszących polaryzację, dla długości fali 1550  $\mu\text{m}$ , na podstawie zależności

$$\frac{d\lambda}{dT} = \frac{\Lambda}{\lambda} L \frac{d\Delta n}{dT}. \quad (6.39)$$

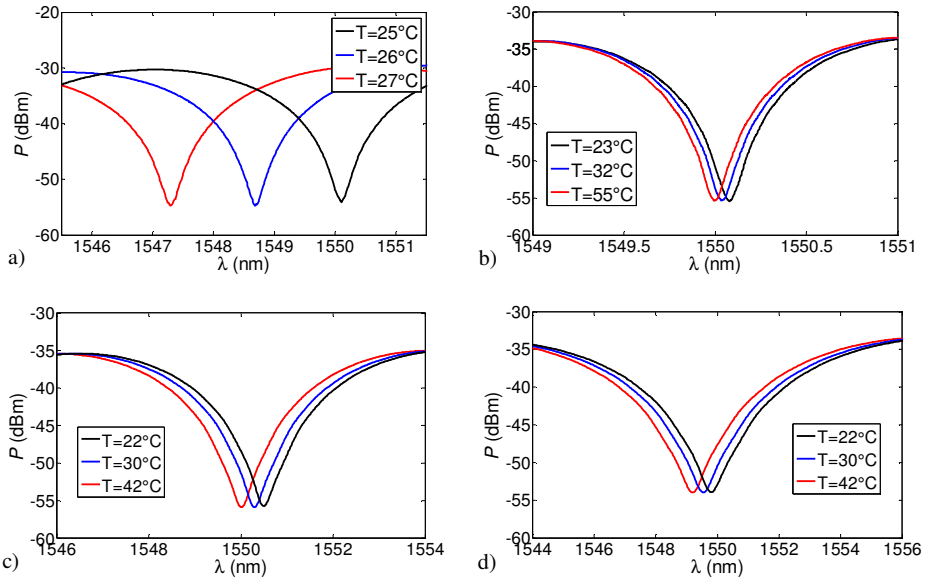
Zależność powyższa nie uwzględnia wpływu zmian długości badanego światłowodu wywołanej temperaturą na czułość temperaturową fazowej dwójłomności modowej.

### **6.3.1.2. Pomiary czułości fazowej dwójłomności modowej światłowodów przenoszących polaryzację na temperaturę, odkształcenie i ciśnienie**

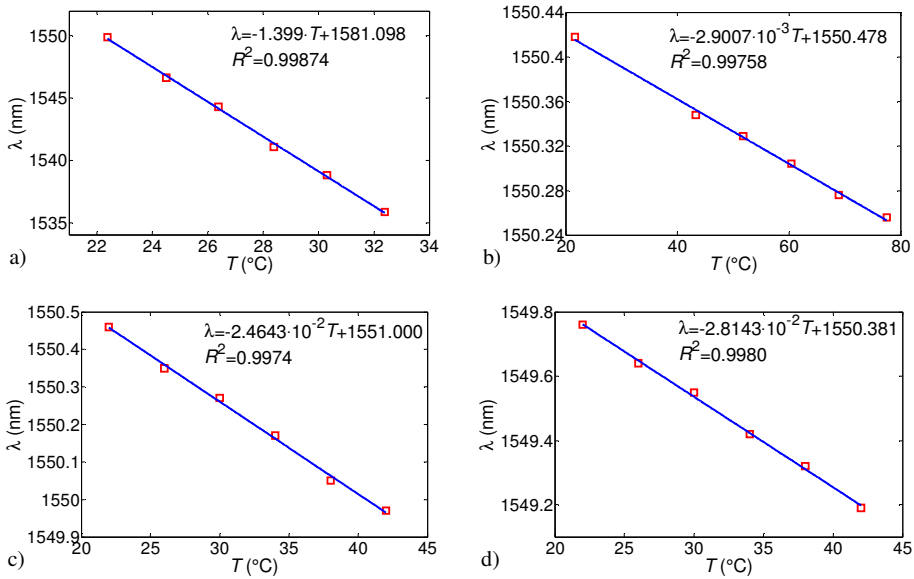
Wykorzystując przedstawioną metodę pomiaru wykonano pomiary czułości fazowej dwójłomności modowej konwencjonalnych i fotonicznych światłowo-

dów przenoszących polaryzację wymienionych w pkt. 6.2.3 na temperaturę, odkształcenie i ciśnienie w zakresie długości fal 1250–1600 nm. Pomiar przeprowadzono w układzie przedstawionym na rysunku 6.9. Jako szerokopasmowe źródło światła zastosowano dwie diody SLED o centralnej długości fali 1320 nm i 1563 nm, 3 dB pasmo i moc optyczna wynoszą dla pierwszej 45 nm i 4 mW, a dla drugiej 40 nm i 2 mW. Wiązki obydwu diod były niespolaryzowane. Połączenie odcinków badanych światłowodów ze światłowodem SMF 28 przy tworzeniu pętli interferometru wykonano przez spawanie. Do tego celu zastosowano standardową spawarkę wykorzystującą łuk elektryczny. Dla poprawy współczynnika ekstynkcji w pętli interferometru włączono kontroler polaryzacji. Pomiar widma transmisyjnego interferometru przeprowadzono przy pomocy optycznego analizatora widma o rozdzielczości 50 pm.

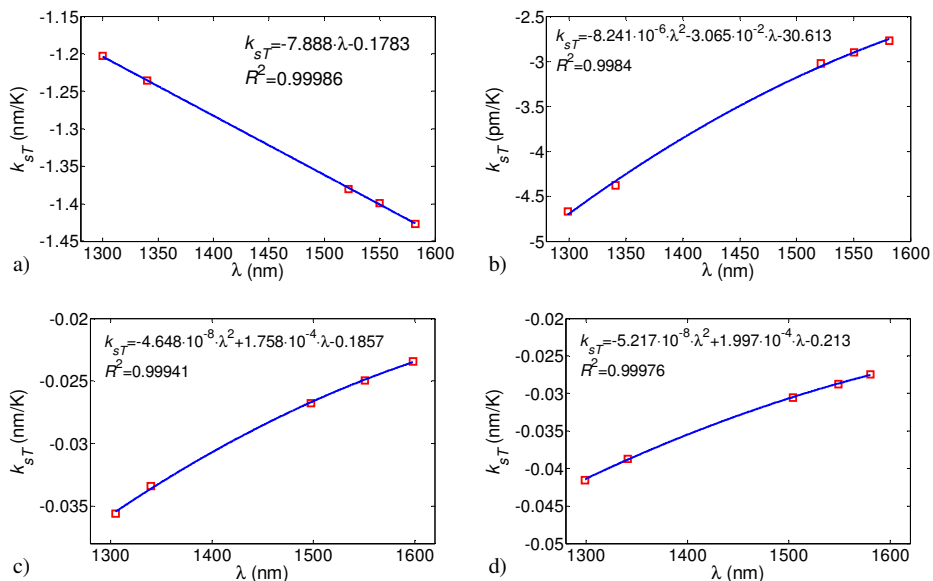
W pomiarach czułości fazowej dwójłomności modowej na temperaturę wykorzystano następujące odcinki badanych światłowodów: Panda  $L = 1145$  mm  $L_b = 984$  mm, PM-PCF PM-1550-01  $L = 1350$  mm  $L_b = 1026$  mm, Blaze nano  $L = 320$  mm  $L_b = 280$  mm, Blaze micro  $L = 270$  mm  $L_b = 230$  mm. Część każdego z tych odcinków światłowodów o długości  $L_b$  umieszczono suszarce o kontrolowanej temperaturze w zakresie od 20 °C do 70 °C. W pierwszej kolejności dokonano pomiaru czułości temperaturowej interferometru z badanym światłowodem. W tym celu dokonano pomiaru przesunięcia minimów widma transmisyjnego interferometru, które odpowiadają wybranym długościom fali pod wpływem zwiększenia temperatury odcinka  $L_b$  badanego światłowodu. W wyniku otrzymuje się pary liczb  $\lambda_i$ ,  $T_i$  odpowiadające punktom, które układają się wokół pewnej prostej. Nachylenie  $d\lambda/dT$  dopasowanej do tych punktów prostej jest czułością temperaturową przesunięcia widma interferometru  $k_{sT} = d\lambda/dT$  z badanym światłowodem. Na rysunku 6.10 przedstawiono wycinki widma transmisyjnego interferometru pętlowego dla różnych wartości temperatury jego światłowodów przenoszących polaryzację. Widać z nich, że ze wzrostem temperatury następuje przesunięcie widma w kierunku fal krótszych, zatem czułość temperaturowa przesunięcia widma interferometru  $k_{sT}$  zarówno ze światłowodami fotonicznymi jak i ze światłowodem Panda jest ujemna. Zależności przesunięcia minimum widma interferometru odpowiadającego długości fali 1550 nm od temperatury odcinków  $L_b$  jego światłowodów i dopasowane do tych zależności proste wyznaczone metodą najmniejszych kwadratów przedstawiono na rysunku 6.11. Współczynnik nachylenia tych prostych jest czułością temperaturową przesunięcia widma interferometru z badanymi światłowodami. Wyznaczone w ten sposób wartości czułości temperaturowej przesunięcia widma interferometru pętlowego dla wybranych minimów tego widma przedstawiono na rysunku 6.12.



Rys. 6.10. Wycinki widma transmisyjnego interferometru pętlowego dla różnych temperatur czynnych odcinków jego światłowódów: a) Panda, b) PM-1550-01, c) Blaze nano, d) Blaze mikro

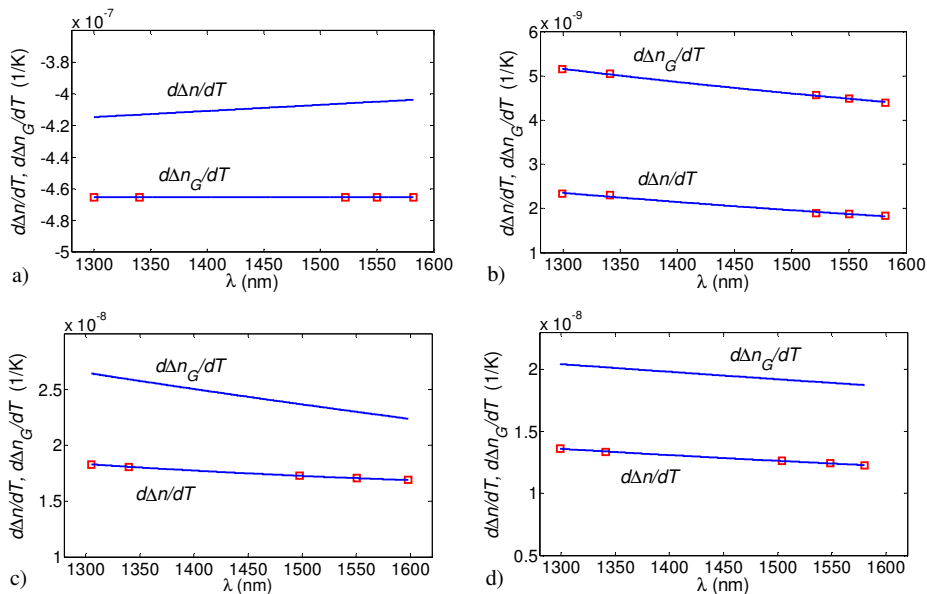


Rys. 6.11. Przesunięcie minimum widna odpowiadającego 1550 nm interferometru pętlowego w zależności od temperatury części jego światłowodu o długości  $L_b$ : a) Panda, b) PM-1550-01, c) Blaze nano, d) Blaze mikro



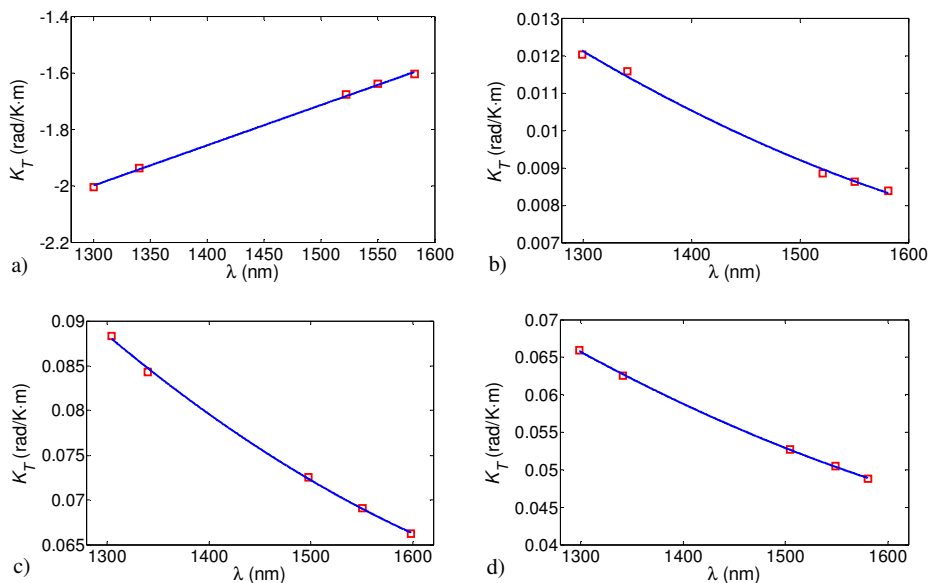
Rys. 6.12. Czułość temperaturowa przesunięcia widma interferometru pętlowego ze światłowodem przenoszącym polaryzację typu: a) Panda, b) PM-1550-01, c) Blaze nano, d) Blaze micro w zależności od długości fali

Wykorzystując wyniki zmierzonej spektralnej czułości na temperaturę interferometru pętlowego z badanymi światłowodami oraz wyznaczone zależności na fazową i grupową dwójłomność modową badanych światłowodów (pkt. 6.2.3), czułość temperaturową  $d\Delta n/dT$  w funkcji długości fali obliczono z zależności (6.30). W obliczeniach tych przyjęto następujące wartości współczynnika  $\alpha = 5,5 \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-1}$  dla PM-1500-01,  $\alpha = 4,3 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  dla światłowodu Panda [131], oraz  $\alpha = 8,9 \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-1}$  dla światłowodu fotonicznego Blaze mikro i  $\alpha = 8,2 \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-1}$  dla światłowodów Blaze nano i Blaze mikro [40]. Należy zauważyć, że wartość drugiego składnika zależności (6.30) uwzględniono jedynie przy obliczeniach czułości światłowodów fotonicznego PM-1550-01, ze względu na jego znaczącą wartość w porównaniu do wartości pierwszego składnika tej zależności, natomiast w obliczeniach czułości światłowodu Panda i światłowodów Blaze mikro i Blaze nano składnik ten można zaniedbać. Czułość dwójłomności grupowej na temperaturę  $d\Delta n_G/dT$  badanych światłowodów obliczono z zależności (3.12). W tym celu do obliczonej czułości  $d\Delta n/dT$  względem długości fali dopasowano najpierw wielomian drugiego stopnia, a potem zróżniczkowano go względem długości fali. Znak obliczonej czułości  $d\Delta n/dT$  oraz czułości  $d\Delta n_G/dT$  wynikają wprost z zależności odpowiednio (6.30) i (3.12). Rezultaty obliczeń czułości światłowodów  $d\Delta n/dT$  i  $d\Delta n_G/dT$  przedstawiono na rysunku 6.13.



Rys. 6.13. Czułość dwójłomości fazowej na temperaturę i czułość dwójłomości grupowej na temperaturę światłowodów przenoszących polaryzację: a) Panda, b) PM-1550-01, c) Błaze nano, d) Błaze mikro

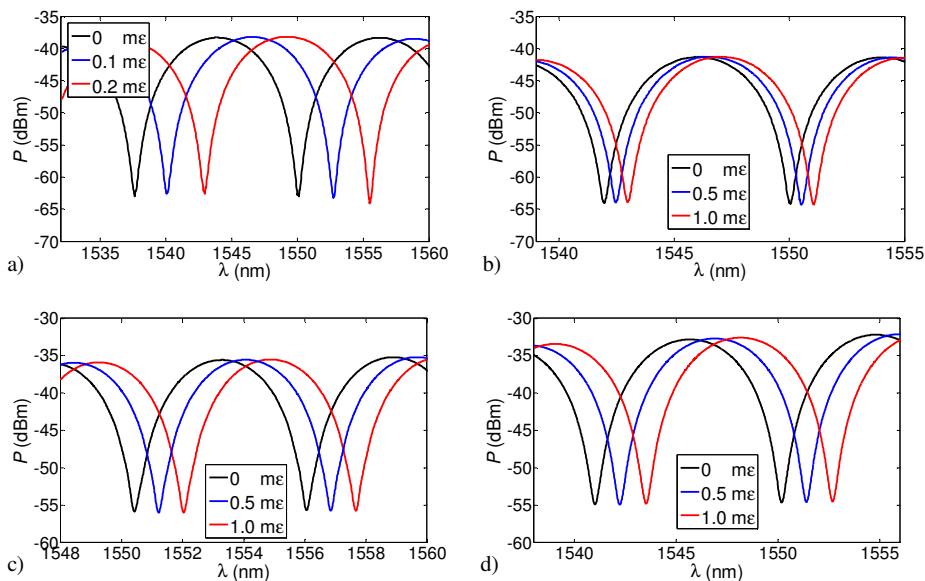
Czułość polarymetryczną na temperaturę  $K_T$  badanych światłowodów w zależności od długości fali, wyznaczoną na podstawie ich zmierzonej czułości  $k_{sT}$  korzystając ze wzoru (6.38a), przedstawiono na rysunku 6.14. Znak czułości  $K_T$  wyznaczony na podstawie zależności (6.37) jest ujemny dla światłowodu Panda, gdyż jego dwójłomość  $\Delta n_G$  jest dodatnia, a czułość  $k_{sT}$  jest ujemna, natomiast dla światłowodów fonicznych znak  $K_T$  jest dodatni gdyż ich dwójłomość  $\Delta n_G$  jest ujemna, i czułość  $k_{sT}$  jest także ujemna. Znak czułości  $K_T$  badanych światłowodów jest taki sam jak znak ich czułości  $d\Delta n/dT$ .



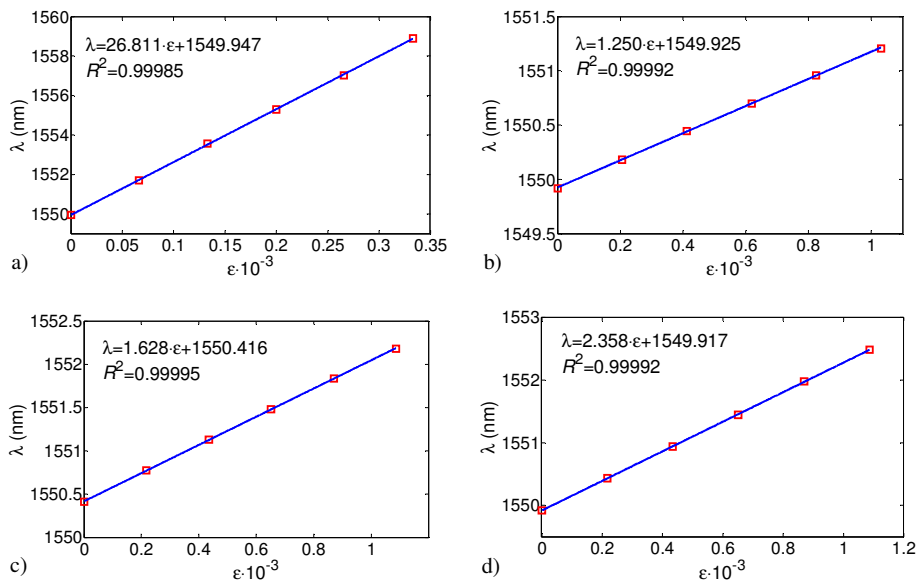
Rys. 6.14. Czułość polarymetryczna na temperaturę światłowodów: a) Panda, b) PM-1550-01, c) Blaze nano, d) Blaze mikro, w zależności od długości fali.

Pomiary czułości dwójłomności fazowej na odkształcenie względne przeprowadzono dla światłowodu konwencjonalnego Bow-tie i fotonicznych: PM-1550-01, Blaze nano, Blaze mikro. Odcinki badanych światłowodów zainstalowane w pętli interferometru odkształcano na całej długości to znaczy  $L = L_b$ . Długości tych odcinków wynosiły odpowiednio 465 mm, 485 mm, 460 mm. W pierwszej kolejności wykonano pomiary czułości przesunięcia widma interferometru pętlowego z badanym światłowodem na odkształcenie względne. W tym celu badane odcinki światłowodów przymocowano do przygotowanych płytek metalowych klejem epoksydowym. Punkty mocowania znajdowały się przed punktami spawania badanych światłowodów (w odniesieniu do ich środka) i światłowodu SMF-28, aby uniknąć działania siły rozciągającej na połączenia spawane. Następnie płytki mocowano przy pomocy śrub do precyzyjnych stolików przesuwnych, które pozwalały na zadawanie odkształceń bezwzględnych światłowodów z rozdzielczością 10  $\mu\text{m}$ .

Zadawane wartości odkształceń względnych wyznaczano jako stosunek zadawanych odkształceń bezwzględnych do długości światłowodu. Na rysunku 6.15 przedstawiono wycinki widma transmisyjnego interferometru pętlowego dla różnych wartości względnego odkształcenia rozciągającego jego ŚPP. Widać z nich, że ze wzrostem odkształcenia następuje przesunięcie widma w kierunku fal dłuższych, zatem czułość odkształceniowa przesunięcia widma interferometru  $k_{se}$ , zarówno ze światłowodami fonicznymi, jak i ze światłowodem Bow-tie, ma znak dodatni.

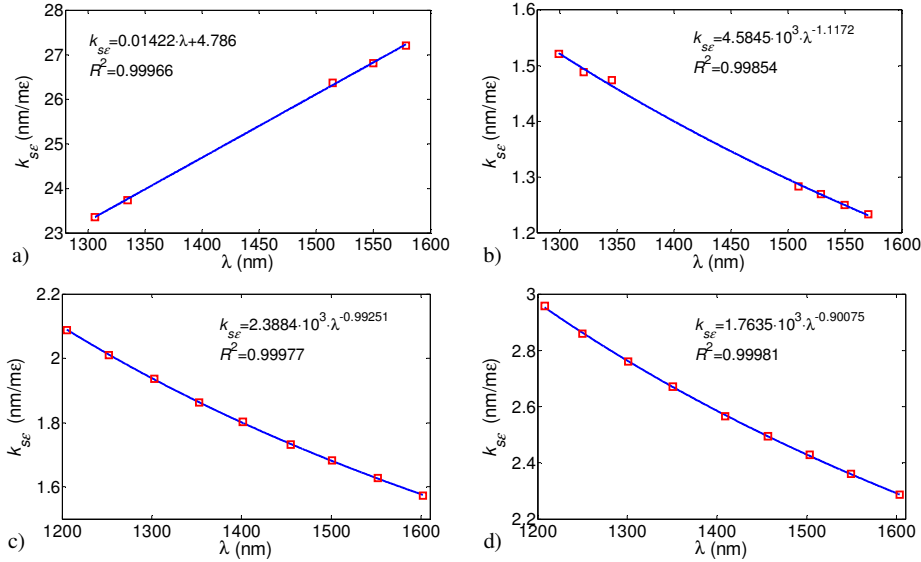


Rys. 6.15. Wycinki widma transmisyjnego interferometru dla różnych wartości względnego odkształcenia rozciągającego jego światłowód: a) Bow-tie, b) PM-1550-01, c) Blaze nano, d) Blaze mikro



Rys. 6.16. Przesunięcie minimum widna odpowiadające 1550 nm interferometru Sagnaca, w zależności od odkształcenia względnego jego światłowodu: a) Bow-tie, b) PM-1550-01, c) Blaze nano, d) Blaze mikro

Zależności przesunięcia minimum widma transmisyjnego interferometru pętlowego, odpowiadające długości fali 1550 nm, od odkształcenia względnego jego światłowodów oraz dopasowane do tych zależności proste najmniejszych kwadratów przedstawiono na rysunku 6.16. Współczynnik nachylenia prostych regresji jest czułością odkształceniową przesunięcia widma interferometru z badanym światłowodem  $k_{se} = d\lambda/d\varepsilon$ . Wyznaczoną w ten sposób czułość  $k_{se}$  dla minimum widma transmisyjnego, które odpowiadają wybranym długościom fali, dla badanych światłowodów przedstawiono na rysunku 6.17.

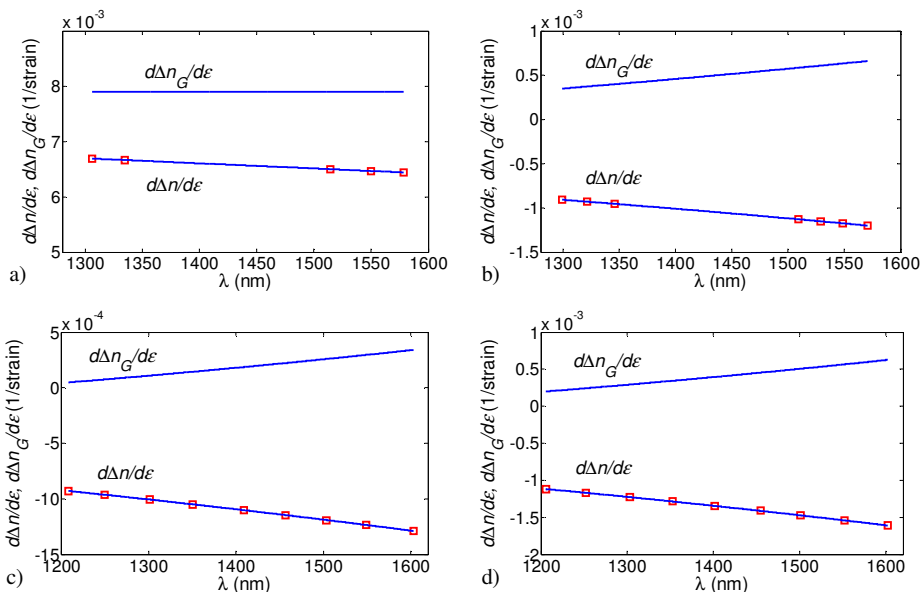


Rys. 6.17. Czułość odkształceniowa przesunięcia widma interferometru Sagnaca ze światłowodem przenoszącym polaryzację typu: a) Panda, b) PM-1550-01, c) Blaze nano, d) Blaze mikro, w zależności od długości fali.

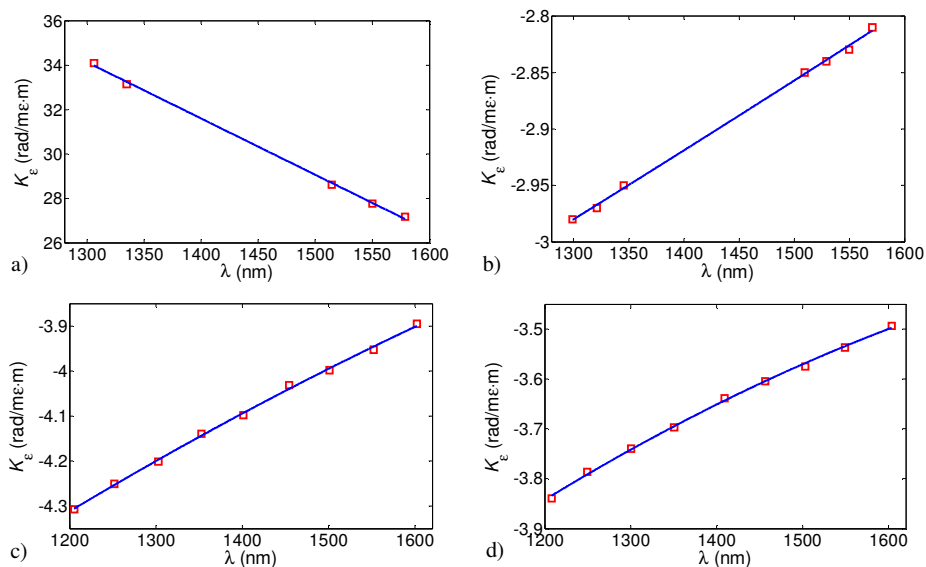
Wykorzystując wyniki zmierzonej czułości  $k_{sT}$  badanych światłowodów oraz wyznaczoną ich dwójłomność grupową i fazową (pkt. 6.2.3), czułość  $d\Delta n/d\varepsilon$  w funkcji długości fali obliczono z zależności (6.33). Czułość dwójłomności grupowej na odkształcenie  $d\Delta n_G/d\varepsilon$  badanych światłowodów obliczono na podstawie wzoru (3.12). Wykorzystano do tego celu wyznaczoną czułość  $d\Delta n/d\varepsilon$  badanych światłowodów i jej aproksymację wielomianem drugiego stopnia. Wyniki obliczeń czułości  $d\Delta n/d\varepsilon$  oraz czułości  $d\Delta n_G/d\varepsilon$  badanych światłowodów przedstawiono w postaci wykresów na rysunku 6.18.

Czułość polarymetryczną na odkształcenie  $K_\varepsilon$  badanych światłowodów w zależności od długości fali, wyznaczoną na podstawie ich zmierzonej czułości  $k_{se}$  korzystając ze wzoru (6.38b), przedstawiono na rysunku 6.19. Znak czułości  $K_\varepsilon$  wyznaczony na podstawie zależności (6.37) jest dodatni dla światłowodu Bow-tie, gdyż jego dwójłomność  $\Delta n_G$  jest dodatnia i czułość  $k_{sT}$  jest dodatnia, natomiast dla światłowodów PM-1550-01, Blaze nano, Blaze mikro znak  $K_\varepsilon$  jest

ujemny gdyż ich dwójłomność  $\Delta n_G$  jest ujemna a czułość  $k_{sT}$  jest dodatnia. Znak czułości  $K_\epsilon$  badanych światłowodów jest taki sam jak znak ich czułości  $d\Delta n/d\epsilon$ .



Rys. 6.18. Czułość dwójłomności fazowej na odkształcenie względne i czułość dwójłomności grupowej na odkształcenie względne światłowodów przenoszących polaryzację: a) Panda, b) PM-1550-01, c) Blaze nano, d) Blaze mikro, w zależności od długości fali



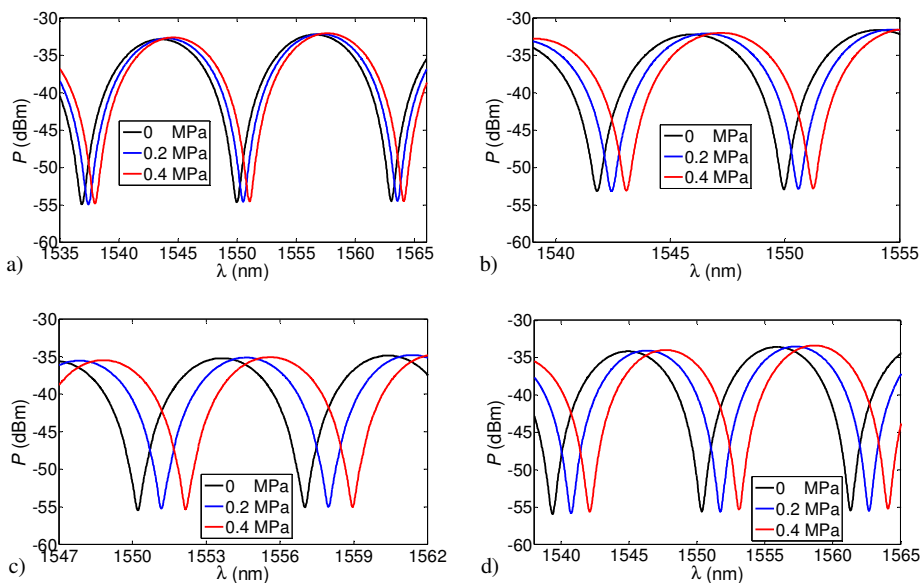
Rys. 6.19. Czułość polarymetryczna na odkształcenie światłowodów: a) Bow-tie, b) PM-1550-01, c) Blaze nano, d) Blaze mikro, w zależności od długości fali

Podobną procedurę, jak w pomiarze czułości temperaturowej i odkształceniowej dwójłomności modowej światłowodów, zastosowano w pomiarze czułości ciśnieniowej dwójłomności. Pomiary czułości ciśnieniowej dwójłomności fazowej wykonano dla tych samych rodzajów światłowodów przenoszących polaryzację, dla których wykonano pomiary czułości odkształceniowej  $d\Delta n/d\varepsilon$ . Długości badanych światłowodów były następujące: Bow-Tie 470 mm, PM-1550-01 350 mm, Blaze nano 380 mm, Blaze mikro 380 mm. Badane odcinki światłowodów umieszczano w przewodzie pneumatycznym, do którego doprowadzano sprężone powietrze z pompy (pneumatycznej) powietrznej obustronnego działania typu PPH-25. W przypadku badań odcinka światłowodu fotonicznego jeden koniec przewodu pneumatycznego zamocowano do zaworu wyjściowego pompy, natomiast w drugim instalowano przepust uszczelniający, przez który wyprowadzono odcinki światłowodu SMF-28, przyspawane do końców odcinka światłowodu PM-PCF. Wyprowadzone końce światłowodu SMF-28 uszczelniono klejem epoksydowym.

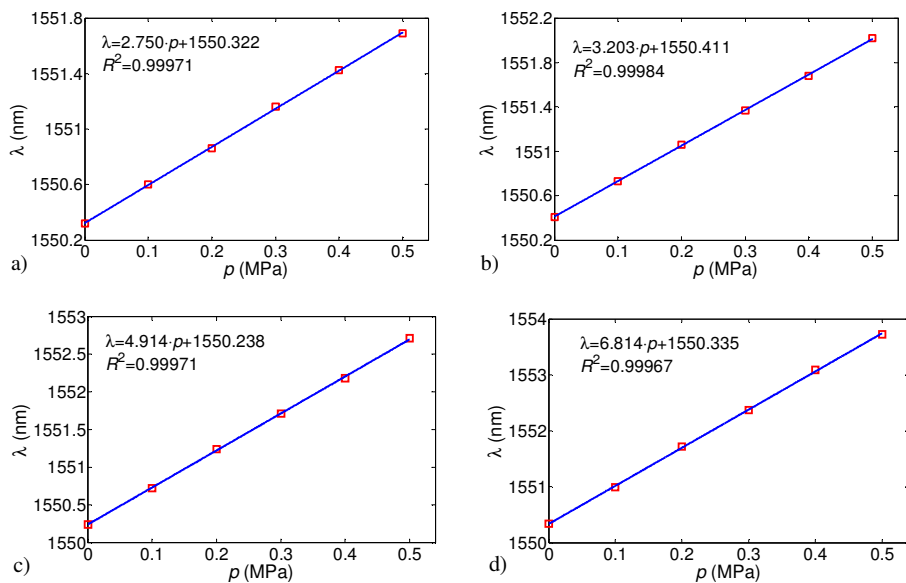
W przypadku badania światłowodu Bow-tie w zaworze wyjściowym pompy zainstalowano rozdzielacz poczwórny, w którym do przeciwległych wyjść zamocowano odcinki przewodów pneumatycznych. Pozwoliło to na umieszczenie badanego odcinka światłowodu w przewodach pneumatycznych bez jego zginania. Wyprowadzenia światłowodu i uszczelnienia końców przewodów pneumatycznych wykonano tak samo jak w przypadku światłowodu PM-1550-01.

Na rysunku 6.20 przedstawiono wycinki widma transmisyjnego interferometru pętlowego dla różnych wartości ciśnienia działającego na jego ŚPP. Widać z nich, że ze wzrostem ciśnienia następuje przesunięcie widma w kierunku fal dłuższych, zatem czułość ciśnieniowa przesunięcia widma interferometru  $k_{sp}$  zarówno ze światłowodami fonicznymi, jak i ze światłowodem Bow-tie ma znak dodatni.

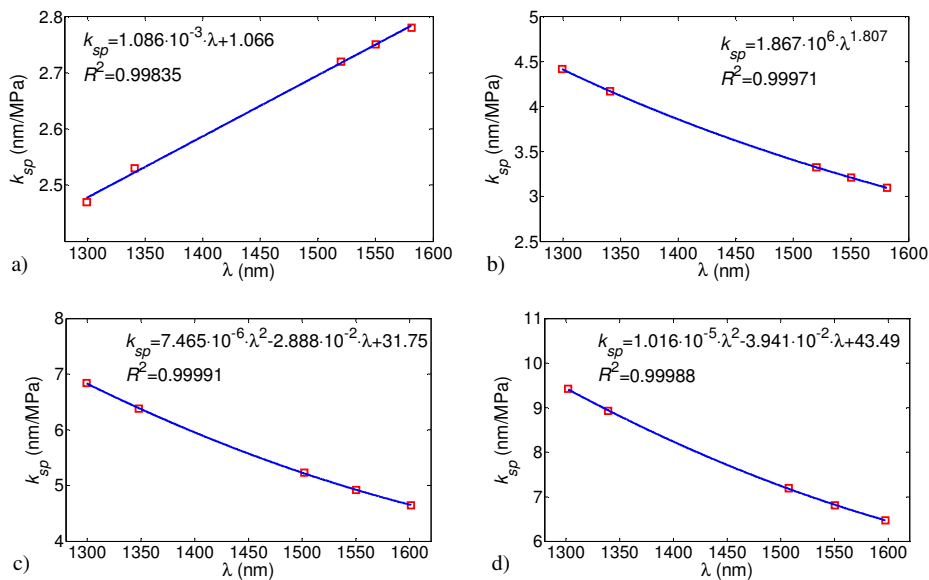
Zależności przesunięcia minimum widma transmisyjnego interferometru pętlowego, odpowiadającego długości fali 1550 nm, od ciśnienia działającego na jego światłowody oraz proste dopasowane do tych zależności metodą najmniejszych kwadratów przedstawiono na rysunku 6.21.



Rys. 6.20. Wycinki widma transmisyjnego interferometru dla różnych wartości ciśnienia działającego na jego światłowody: a) Bow-tie, b) PM-1550-01, c) Błaze nano, d) Błaze mikro



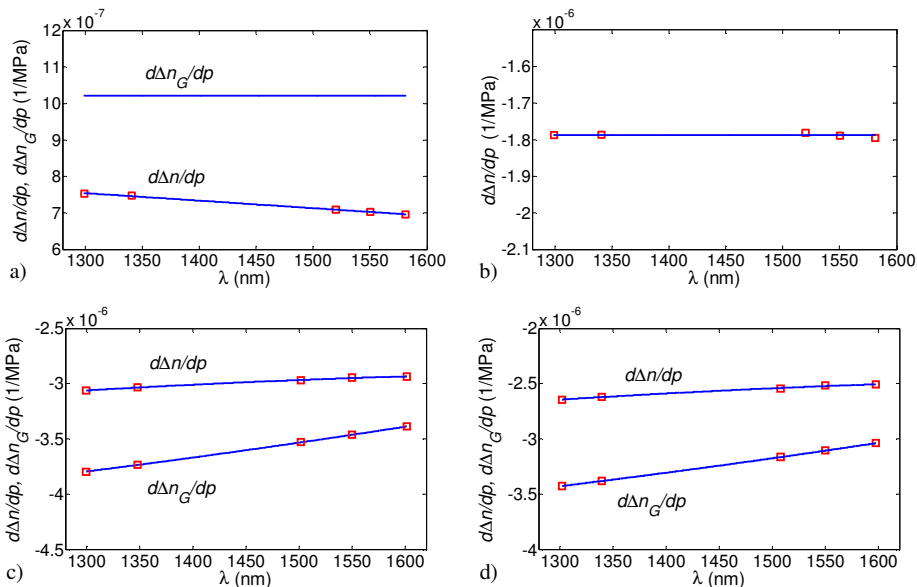
Rys. 6.21. Przesunięcie minimum widma transmisyjnego odpowiadającego 1550 nm interferometru Sagnaca w zależności od ciśnienia, które działa na jego światłowód: a) Bow-tie, b) PM-1550-01, c) Błaze nano, d) Błaze mikro



Rys. 6.22. Czułość ciśnieniowa przesunięcia widma interferometru pętlowego ze światłowodem przenoszącym polaryzację typu: a) Bow-tie, b) PM-1500-01, c) Błaze nano, d) Błaze mikro, w zależności od długości fali

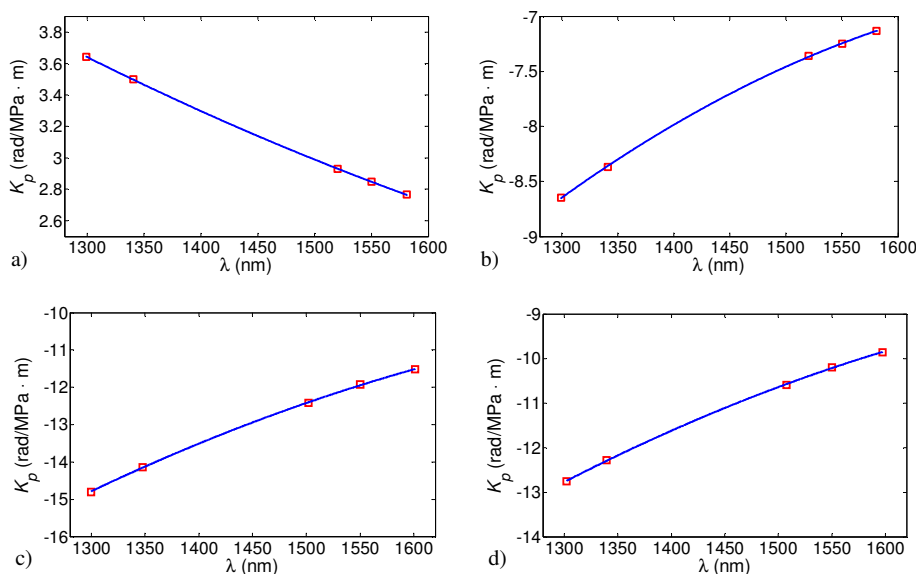
Współczynnik nachylenia prostych najmniejszych kwadratów jest czułością ciśnieniową przesunięcia widma interferometru z badanym światłowodem  $k_{sp} = d\lambda/dp$ . Wyznaczoną w ten sposób czułość  $k_{sp}$  dla minimów widma transmisyjnego, które odpowiadają wybranym długościom fali, dla badanych światłowodów przedstawiono na rysunku 6.22.

Wykorzystując wyniki zmierzonej czułości  $k_{sp} = f(\lambda)$  oraz dwójłomności grupowej badanych światłowodów (pkt. 6.2.3), ich czułość  $d\Delta n/dp$  w funkcji długości fali obliczono z zależności (6.35). Czułość  $d\Delta n_G/dp$  badanych światłowodów obliczono na podstawie wzoru (3.12). Wykorzystano do tego celu wyznaczoną czułość  $d\Delta n/dp$  badanych światłowodów i jej aproksymację wielomianem drugiego stopnia. Wyniki obliczeń czułości  $d\Delta n/dp$  oraz czułości  $d\Delta n_G/dp$  badanych światłowodów przedstawiono w postaci wykresów na rysunku 6.23.



Rys. 6.23. Czułość dwójłomności fazowej na ciśnienie i czułość dwójłomności grupowej na ciśnienie światłowodów przenoszących polaryzację: a) Bow-tie, b) PM-1550-01, c) Blaze nano, d) Blaze mikro

Czułość polarymetryczną na ciśnienie  $K_p$  badanych światłowodów w zależności od długości fali, wyznaczoną na podstawie ich zmierzonej czułości  $k_{sp}$  korzystając ze wzoru (6.35), przedstawiono na rysunku 6.24. Znak czułości  $K_p$  wyznaczony na podstawie zależności (6.37) jest dodatni dla światłowodu Bow-tie, gdyż jego dwójłomność  $\Delta n_G$  jest dodatnia i czułość  $k_{sp}$  jest dodatnia, natomiast dla światłowodów PM-1550-01, Blaze nano, Blaze mikro znak  $K_p$  jest ujemny gdyż ich dwójłomność  $\Delta n_G$  jest ujemna a czułość  $k_{sp}$  jest dodatnia. Znak czułości  $K_p$  badanych światłowodów jest taki sam jak ich czułości  $d\Delta n/dp$ .



Rys. 6.24. Czułość polarymetryczna na ciśnienie światłowodów: a) Bow-tie, b) PM-1550-01, c) Blaze nano, d) Blaze mikro, w zależności od długości fali

Uzyskane wyniki pomiarów czułości fazowej dwójłomności oraz czułości polarymetrycznej na temperaturę, odkształcenie i ciśnienie badanych światłowodów wykazują dobrą zgodność z wynikami pomiarów tych parametrów dla tych samych typów światłowodów, które uzyskano innymi metodami pomiaru i zmieszczonymi w różnych źródłach literaturowych. Na przykład czułość polarymetryczna na ciśnienie światłowodu fotonicznego PM-1550-01 wyznaczona ze wzoru (6.38b) wynosi dla  $\lambda = 1550$  nm  $K_p = 7,24$  rad/MPa·m a jej wartość podana w pracy [40] wynosi  $K_p = -7,5$  rad/MPa·m i uzyskana została z wykorzystaniem interferometru polarymetrycznego. Czułość polarymetryczna na odkształcenie dla tego samego typu światłowodu wyznaczona ze wzoru (6.38b) wynosi dla  $\lambda = 1550$  nm  $K_\varepsilon = -2,83$  rad/mę·m, a podana w pracy [60] wynosi  $K_\varepsilon = -2,5$  rad/mę·m. Czułość temperaturowa dwójłomności fazowej światłowodu fotonicznego PM-1500-01 wyznaczona ze wzoru (6.30) dla  $\lambda = 1550$  nm wynosi  $d\Delta n/dT = 1,89 \cdot 10^{-9}$  K<sup>-1</sup> a podana w pracy [20] wynosi  $d\Delta n/dT = -2,0 \cdot 10^{-9}$  K<sup>-1</sup>, przy czym w tych obliczeniach nie uwzględniano wpływu zmian długości światłowodu pod wpływem temperatury na czułość  $d\Delta n/dT$ . Czułość polarymetryczna na temperaturę światłowodu Panda obliczona z zależności (6.38a) wynosi  $K_T = -1,65$  rad/K·m a podana w pracy [29] wynosi  $K_T = -1,8$  rad/K·m.

Dokładność pomiarów czułości fazowej dwójłomności modowej na temperaturę, odkształcenie i ciśnienie badanych światłowodów przedstawioną metodą można ustalić na podstawie oszacowania niepewności pomiarów. Oszacowanie to przedstawiono w następnym punkcie pracy.

### 6.3.1.3. Niepewność pomiaru czułości fazowej dwójłomności modowej światłowodów przenoszących polaryzację na wielkości zewnętrzne

Niepewność rozszerzoną pomiaru czułości fazowej dwójłomności modowej oszacowano podobnie jak niepewność pomiaru dwójłomności modowej światłowodów metodą przybliżoną szacowania niepewności pomiarów pośrednich podaną w pracy [129], ze względu na znacznie mniejszą jej pracochłonność niż metody obliczania niepewności pomiarów zgodnie z przewodnikiem [130]. Zgodność wyników obliczeń niepewności obu metod jest wystarczająca. W metodach przybliżonych oddzielnie określa się współczynnik rozszerzenia dla niepewności typu A i współczynnik rozszerzenia dla niepewności typu B.

Wyznaczenie wartości czułości fazowej dwójłomności modowej na podstawie zależności (6.28) lub (6.29) wymaga dokonania pomiarów długości fali  $\lambda$ , czułości  $k_{sX} = d\lambda/dX$  przesunięcia wybranego minimum widma interferometru pętlowego z badanym światłowodem na  $X$ , dwójłomności grupowej  $\Delta n_G$  oraz dwójłomności fazowej badanego światłowodu  $\Delta n$ . Przy korzystaniu z zależności (6.28) należy dokonać pomiarów długości światłowodu  $L$  i jego czynnej części  $L_b$ . Czułość interferometru  $k_{sX}$  wyznacza się jako współczynnik nachylenia charakterystyki przesunięcia widma interferometru pętlowego w zależności od wymuszenia działającego na jego światłowód metodą regresji liniowej. W obliczeniach niepewności pomiaru czułości  $\partial \Delta n / \partial X$  badanych światłowodów wykorzystano obliczone wcześniej niepewności pomiaru  $\Delta n_G$  tych światłowodów zawarte w punkcie 6.2.3.1 pracy.

W pomiarze czułości dwójłomności fazowej światłowodu na wielkość  $X$ , bazującym na interferometrze pętlowym, niepewności typu A są większe od niepewności typu B, zatem niepewność rozszerzoną na poziomie ufności 0,95 można oszacować na podstawie zależności (6.14).

Wyznaczone z pomiarów wartości przesunięcia widma odpowiadające długości fali  $\lambda_i$  wywołane wymuszeniem zadanych stałych wartościach  $x_i$  tworzą pary wartości  $(x_i, \lambda_i)$ , które w prostokątnym układzie współrzędnych odpowiadają punktom układającym się wokół prostej  $\lambda = ax + b$ . Prosta tą wyznaczono metodą regresji liniowej. Obliczanie niepewności współczynników  $a$  i  $b$  tej prostej zalicza się zgodnie z Przewodnikiem do metody typu A.

Współczynnik regresji  $a$  jest równy spektralnej czułości interferometru pętlowego z badanym światłowodem na wymuszenie  $a = k_{sX} = d\lambda/dX$ . Współczynniki  $a$  i  $b$  oblicza się ze wzorów

$$a = k_{sX} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(\lambda_i - \bar{\lambda})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad b = \bar{\lambda} - a \cdot \bar{x} \quad (6.40)$$

Niepewność standardową typu A współczynnika regresji  $a$  oblicza się ze wzoru [130]

$$u_A(a) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\lambda_i - ax_i - b)^2}{(n-2) \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}} \quad (6.41)$$

gdzie  $\bar{x}$  i  $\bar{\lambda}$  oznaczają średnie arytmetyczne  $x$  i  $\lambda$ .

Dopasowanie prostej do zbioru punktów pomiarowych wykonuje się zwykle przy pomocy komputera uzyskując wartości parametrów  $a$  i  $b$  oraz współczynnika korelacji  $R$ . Znajomość wartości  $R$  umożliwia obliczenie niepewności standardowej nachylenia prostej  $u_A(a)$  za pomocą wzoru [132]

$$u_A(a) = |a| \sqrt{\frac{(1/R^2) - 1}{n-2}} \quad (6.42)$$

Długość fali  $\lambda$  odpowiada wybranemu minimum widma interferometru przy wartości wymuszenia równej zero. Pomiaru długości fali  $\lambda$  dokonywano jednorazowo analizatorem widma, którego błąd graniczny  $\Delta_g \lambda = 0,5$  nm. Na niepewność pomiaru długości fali decydujący wpływ ma niepewność typu B, która na poziomie ufności 0,95 wynosi

$$U(\lambda) = U_B(\lambda) = \Delta_g \lambda = 0,5 \text{ nm.}$$

### **Obliczenia niepewności pomiaru czułości fazowej dwójłomności modowej światłowodów przenoszących polaryzację na temperaturę.**

Niepewność rozszerzona na poziomie ufności 0,95 pomiaru czułości  $d\Delta n/dT$  światłowodów obliczono metoda przybliżoną ze wzoru (6.14), który dla czułości  $d\Delta n/dT$  danej zależnością (6.30) przyjmie postać:

$$U\left(\frac{d\Delta n}{dT}\right) = \sqrt{c_L^2 U^2(L) + c_{k_{sT}}^2 U^2(k_{sT}) + c_{\Delta n_G}^2 U^2(\Delta n_G) + c_{L_b}^2 U^2(L_b) + c_\lambda^2 U^2(\lambda) + c_{\Delta n}^2 U^2(\Delta n)} \quad (6.43)$$

gdzie poszczególne współczynniki wrażliwości są określone zależnościami

$$\begin{aligned} c_L &= \frac{k_{sT} \Delta n_G}{L_b \lambda}, & c_{k_{sT}} &= \frac{L \Delta n_G}{L_b \lambda}, & c_{\Delta n_G} &= \frac{L k_{sT}}{L_b \lambda}, \\ c_{L_b} &= -\frac{L k_{sT} \Delta n_G}{L_b^2 \lambda}, & c_\lambda &= -\frac{L k_{sT} \Delta n_G}{L_b \lambda^2}, & c_{\Delta n} &= \alpha \end{aligned} \quad (6.44)$$

Pomiar długości odcinków  $L$  i  $L_b$  światłowodów wykonano jednorazowo liniałem mierniczym z błędem granicznym  $\Delta_g L = 1 \text{ mm}$  i  $\Delta_g L_b = 3 \text{ mm}$ . Na niepewność pomiaru długości odcinków  $L$  i  $L_b$  miała wpływ tylko niepewność typu B, która na poziomie ufności 0,95 wynosi

$$U(L) = U_B(L) \cong \Delta_g L = 1 \text{ mm} \text{ oraz } U(L_b) = U_B(L_b) \cong \Delta_g L_b = 3 \text{ mm}$$

W obliczeniach skorzystano z wyznaczonej w punkcie 6.2.3.a niepewności rozszerzonej na poziomie ufności 0,95 pomiarów dwójłomności grupowej badanych światłowodów, która wynosi  $U(\Delta n_G) = 6,9 \cdot 10^{-6}$  dla światłowodu fotonicznego PM-1550-01 i  $U(\Delta n_G) = 2,8 \cdot 10^{-6}$  dla światłowodu Panda. Należy zaznaczyć, że w obliczeniach niepewności czułości temperaturowej dwójłomności fazowej światłowodu Panda nie uwzględniano drugiego członu wzoru (6.30) ze względu na jego małą wartość  $\alpha \Delta n = 1,6 \cdot 10^{-9}$ . W tabelach 6.8–6.11 przedstawiono wyniki pomiarów charakterystyki przesunięcia widma interferometru pętlowego w funkcji temperatury, wyniki obliczeń jej współczynnika regresji liniowej i niepewności rozszerzonej tego współczynnika, oraz bilans niepewności czułości dwójłomności fazowej na temperaturę badanych światłowodów, dla długości fali 1550 nm.

Tabela 6.8. Wyniki pomiarów charakterystyki przesunięcia widma interferometru pętlowego w funkcji temperatury ze światłowodem Panda, wyników obliczeń jej współczynnika regresji liniowej i niepewności rozszerzonej tego współczynnika

| $i$ | $T_i$<br>°C | $\lambda_i$<br>(m)·10 <sup>-9</sup> | $a$<br>(m/K)·10 <sup>-9</sup> | $b$<br>(m)·10 <sup>-9</sup> | $R^2$   | $u_A(a)$<br>(m/K)·10 <sup>-11</sup> | $k_{Aa}$ | $U_A(a)$<br>(m/K)·10 <sup>-11</sup> | $U(a)$<br>(m/K)·10 <sup>-11</sup> |
|-----|-------------|-------------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|---------|-------------------------------------|----------|-------------------------------------|-----------------------------------|
| 1   | 22,4        | 1549,9                              | 1,399                         | 1581,1                      | 0,99874 | 2,5                                 | 2,78     | 7,0                                 | 7,0                               |
| 2   | 24,5        | 1546,65                             |                               |                             |         |                                     |          |                                     |                                   |
| 3   | 26,4        | 1544,3                              |                               |                             |         |                                     |          |                                     |                                   |
| 4   | 28,4        | 1541,07                             |                               |                             |         |                                     |          |                                     |                                   |
| 5   | 30,3        | 1538,815                            |                               |                             |         |                                     |          |                                     |                                   |
| 6   | 32,4        | 1535,835                            |                               |                             |         |                                     |          |                                     |                                   |

Tabela 6.9. Bilans niepewności czułości dwójłomności fazowej na temperaturę światłowodu Panda

| Mierzona wielkość<br>$X_j$                                 | Wartość<br>średnia<br>$\bar{x}_j$                    | Współczynnik<br>wrażliwości<br>$c_j$                | Niepewność<br>Rozszerzona                                                             | $c_j^2 \cdot U^2(\bar{x}_j)$          |
|------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|
| Długość światłowodu L                                      | 1,145 m                                              | $0,354 \cdot 10^{-6} \text{ m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ | $1 \cdot 10^{-3} \text{ m}$                                                           | $0,12 \cdot 10^{-18} \text{ K}^{-2}$  |
| Czułość<br>temperaturowa<br>przesunięcia widma<br>$k_{sT}$ | $-1,399 \cdot 10^{-9} \text{ m} \cdot \text{K}^{-1}$ | $2,9 \cdot 10^2 \text{ m}^{-1}$                     | $7,0 \cdot 10^{-11} \text{ m} \cdot \text{K}^{-1}$                                    | $412,1 \cdot 10^{-18} \text{ K}^{-2}$ |
| Dwójłomność<br>grupowa $\Delta n_G$                        | $3,85 \cdot 10^{-4}$                                 | $1,05 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$                 | $2,8 \cdot 10^{-6}$                                                                   | $8,2 \cdot 10^{-18} \text{ K}^{-2}$   |
| Długość czynnego<br>światłowodu $L_b$                      | 0,984 m                                              | $4,12 \cdot 10^{-3} \text{ m}^{-1} \text{ K}^{-1}$  | $3 \cdot 10^{-3} \text{ m}$                                                           | $1,53 \cdot 10^{-18} \text{ K}^{-2}$  |
| Długość fali $\lambda$                                     | $1550 \cdot 10^{-9} \text{ m}$                       | $2,62 \text{ m}^{-1} \text{ K}^{-1}$                | $5 \cdot 10^{-10} \text{ m}$                                                          | $0,017 \cdot 10^{-18} \text{ K}^{-2}$ |
| Czułość<br>temperaturowa<br>dwójłomności<br>$d\Delta n/dT$ | $-4,04 \cdot 10^{-7} \cdot \text{K}^{-1}$            |                                                     | $\sum c_j^2 U^2(\bar{x}_j) = 421,96 \cdot 10^{-18} \text{ K}^{-2}$                    |                                       |
| Niepewność czułości temperaturowej dwójłomności            |                                                      |                                                     | $U(d\Delta n/dT) = 2,1 \cdot 10^{-8} \text{ K}^{-1}$ ,<br>$U_r(d\Delta n/dT) = 5,2\%$ |                                       |

Tabela 6.10. Wyniki pomiarów charakterystyki przesunięcia widma interferometru petlowego w funkcji temperatury ze światłowodem fotonicznym PM-1550-01 wyników obliczeń jej współczynnika regresji i niepewności rozszerzonej tego współczynnika

| $i$ | $T_i$<br>°C | $\lambda_i$<br>(m) · 10 <sup>-9</sup> | $a$<br>(m/K) · 10 <sup>-12</sup> | $b$<br>(m) · 10 <sup>-9</sup> | $R^2$   | $u_A(a)$<br>(m/K) · 10 <sup>-14</sup> | $k_{Aa}$ | $U_A(a)$<br>(m/K) · 10 <sup>-13</sup> | $U(a)$<br>(m/K) · 10 <sup>-13</sup> |
|-----|-------------|---------------------------------------|----------------------------------|-------------------------------|---------|---------------------------------------|----------|---------------------------------------|-------------------------------------|
| 1   | 21,6        | 1550,418                              | -2,9                             | 1550,478                      | 0,99758 | 7,14                                  | 2,78     | 2,0                                   | 2,0                                 |
| 2   | 43,3        | 1550,348                              |                                  |                               |         |                                       |          |                                       |                                     |
| 3   | 51,8        | 1550,328                              |                                  |                               |         |                                       |          |                                       |                                     |
| 4   | 60,4        | 1550,304                              |                                  |                               |         |                                       |          |                                       |                                     |
| 5   | 68,9        | 1538,276                              |                                  |                               |         |                                       |          |                                       |                                     |
| 6   | 77,5        | 1535,256                              |                                  |                               |         |                                       |          |                                       |                                     |

Tabela 6.11. Bilans niepewności czułości fazowej dwójłomności modowej na temperaturę światłowodu fotonicznego PM-1550-01

| Mierzona wielkość<br>$X_j$                                 | Wartość średnia<br>$\bar{x}_j$                      | Współczynnik<br>wrażliwości<br>$c_j$                    | Niepewność<br>Rozszerzona                                                             | $c_j^2 \cdot U^2(\bar{x}_j)$             |
|------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|
| Długość światłowodu<br>$L$                                 | 1,35 m                                              | $15,8 \cdot 10^{-10} \cdot \text{m}^{-1} \text{K}^{-1}$ | $1 \cdot 10^{-3} \text{ m}$                                                           | $2,5 \cdot 10^{-24} \text{ K}^{-2}$      |
| Czułość<br>temperaturowa<br>przesunięcia widma<br>$k_{sT}$ | $-2,9 \cdot 10^{-12} \text{ m} \cdot \text{K}^{-1}$ | $7,34 \cdot 10^2 \text{ m}^{-1}$                        | $2,0 \cdot 10^{-13} \text{ m} \cdot \text{K}^{-1}$                                    | $215 \cdot 10^{-22} \cdot \text{K}^{-2}$ |
| Dwójłomność<br>grupowa $\Delta n_G$                        | $8,65 \cdot 10^{-4}$                                | $2,46 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$                     | $6,9 \cdot 10^{-6}$                                                                   | $2,92 \cdot 10^{-22} \text{ K}^{-2}$     |
| Długość czynnego<br>światłowodu $L_b$                      | 1,026 m                                             | $2,1 \cdot 10^{-9} \text{ m}^{-1} \text{K}^{-1}$        | $3 \cdot 10^{-3} \text{ m}$                                                           | $0,4 \cdot 10^{-22} \text{ K}^{-2}$      |
| Długość fali $\lambda$                                     | $1550 \cdot 10^{-9} \text{ m}$                      | $4,4 \text{ m}^{-1} \text{strain}^{-1}$                 | $5 \cdot 10^{-10} \text{ m}$                                                          | $5,0 \cdot 10^{-24} \text{ K}^{-2}$      |
| Dwójłomność fazowa<br>$\Delta n$                           | $4,77 \cdot 10^{-4}$                                | $5,5 \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-1}$                      | $3,8 \cdot 10^{-6}$                                                                   | $4,4 \cdot 10^{-12} \text{ strain}^{-2}$ |
| Czułość<br>temperaturowa<br>dwójłomności<br>$d\Delta n/dT$ | $1,87 \cdot 10^{-9} \text{ K}^{-1}$                 |                                                         | $\sum c_j^2 U^2(\bar{x}_j) = 218,3 \cdot 10^{-22} \text{ K}^{-2}$                     |                                          |
| Niepewność pomiaru czułości temperaturowej<br>dwójłomności |                                                     |                                                         | $U(d\Delta n/dT) = 1,5 \cdot 10^{-10} \text{ K}^{-1}$<br>$U_r = (d\Delta n/dT) = 8\%$ |                                          |

### Obliczenia niepewności pomiaru czułości fazowej dwójłomności modowej światłowodów przenoszących polaryzację na odkształcenie.

Niepewność rozszerzona na poziomie ufności 0,95 pomiaru czułości  $\Delta n/d\epsilon$  światłowodów obliczono metoda przybliżoną ze wzoru (6.14), który dla czułości  $\Delta n/d\epsilon$  danej zależnością (6.33) przyjmie postać:

$$U\left(\frac{d\Delta n}{d\epsilon}\right) = \sqrt{c_{k_{s\epsilon}}^2 U^2(k_{s\epsilon}) + c_{\Delta n_G}^2 U^2(\Delta n_G) + c_{\lambda}^2 U^2(\lambda) + c_{\Delta n}^2 U^2(\Delta n)} \quad (6.45)$$

gdzie poszczególne współczynniki wrażliwości są określone zależnościami

$$c_{k_{s\epsilon}} = \frac{L\Delta n_G}{L_b\lambda}, \quad c_{\Delta n_G} = \frac{Lk_{s\epsilon}}{L_b\lambda}, \quad c_{\lambda} = \frac{Lk_{s\epsilon}\Delta n_G}{L_b\lambda}, \quad c_{\Delta n} = 1 \quad (6.46)$$

Tabela 6.12. Wyniki pomiarów charakterystyki przesunięcia widma interferometru pętlowego w funkcji odkształcenia względnego ze światłowodem Bow-tie, wyniki obliczeń parametrów prostej regresji i niepewności rozszerzonej jej współczynnika nachylenia  $a$

| $i$ | $\varepsilon_i$<br>mε | $\lambda_i$<br>(m)·10 <sup>-9</sup> | $a$<br>(m/strain)<br>·10 <sup>-6</sup> | $b$<br>(m)·10 <sup>-9</sup> | $R^2$   | $u_A(a)$<br>(m/strain)<br>·10 <sup>-6</sup> | $k_{Aa}$ | $U_A(a)$<br>(m/strain)<br>·10 <sup>-6</sup> | $U(a)$<br>(m/strain)<br>·10 <sup>-6</sup> |
|-----|-----------------------|-------------------------------------|----------------------------------------|-----------------------------|---------|---------------------------------------------|----------|---------------------------------------------|-------------------------------------------|
| 1   | 0                     | 1549,946                            | 26,81                                  | 1549,946                    | 0,99985 | 0,165                                       | 2,78     | 0,460                                       | 0,460                                     |
| 2   | 0,066                 | 1551,705                            |                                        |                             |         |                                             |          |                                             |                                           |
| 3   | 0,133                 | 1553,56                             |                                        |                             |         |                                             |          |                                             |                                           |
| 4   | 0,2                   | 1555,295                            |                                        |                             |         |                                             |          |                                             |                                           |
| 5   | 0,266                 | 1557,015                            |                                        |                             |         |                                             |          |                                             |                                           |
| 6   | 0,332                 | 1558,891                            |                                        |                             |         |                                             |          |                                             |                                           |

Tabela 6.13. Bilans niepewności pomiaru czułości fazowej dwójłomności modowej na odkształcenie względne światłowodu Bow-tie

| Mierzona wielkość<br>$X_j$                                        | Wartość<br>średnia<br>$\bar{x}_j$                        | Współczynnik<br>wrażliwości<br>$c_j$                | Niepewność<br>Rozszerzona                                                                                    | $c_j^2 \cdot U^2(\bar{x}_j)$             |
|-------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|
| Czułość<br>odkształceniowa<br>przesunięcia widma<br>$k_{se}$      | $26,81 \cdot 10^{-6} \text{ m} \cdot \text{strain}^{-1}$ | $2,55 \cdot 10^2 \text{ m}^{-1}$                    | $0,46 \cdot 10^{-6} \text{ m} \cdot \text{strain}^{-1}$                                                      | $1,38 \cdot 10^{-8} \text{ strain}^{-2}$ |
| Dwójłomność<br>grupowa $\Delta n_G$                               | $3,96 \cdot 10^{-4}$                                     | $17,3 \text{ strain}^{-1}$                          | $3,0 \cdot 10^{-6}$                                                                                          | $0,27 \cdot 10^{-8} \text{ strain}^{-2}$ |
| Długość fali $\lambda$                                            | $1550 \cdot 10^{-9} \text{ m}$                           | $4,4 \cdot 10^2 \text{ m}^{-1} \text{ strain}^{-1}$ | $5 \cdot 10^{-10} \text{ m}$                                                                                 | $5,0 \cdot 10^{-12} \text{ strain}^{-2}$ |
| Dwójłomność fazowa<br>$\Delta n$                                  | $3,85 \cdot 10^{-6}$                                     | 1                                                   | $2,9 \cdot 10^{-6}$                                                                                          | $0,084 \cdot 10^{-12}$                   |
| Czułość<br>temperaturowa<br>dwójłomności $d\Delta n/d\varepsilon$ | $6,47 \cdot 10^{-3} \cdot \text{strain}^{-1}$            |                                                     | $\sum c_j^2 U^2(\bar{x}_j) = 1,65 \cdot 10^{-8} \text{ strain}^{-2}$                                         |                                          |
| Niepewność czułości temperaturowej dwójłomności                   |                                                          |                                                     | $U(d\Delta n/d\varepsilon) = 1,3 \cdot 10^{-4} \text{ strain}^{-1}$ ,<br>$U_r(d\Delta n/d\varepsilon) = 2\%$ |                                          |

Tabela 6.14. Wyniki pomiarów charakterystyki przesunięcia widma interferometru pętlowego w funkcji odkształcenia względnego ze światłowodem fotonicznym PM-1550-01, wyniki obliczeń parametrów prostej regresji i niepewności rozszerzonej jej współczynnika nachylenia  $a$

| $i$ | $\varepsilon_i$<br>mε | $\lambda_i$<br>(m)·10 <sup>-9</sup> | $a$<br>(m/strain)<br>·10 <sup>-6</sup> | $b$<br>(m)·10 <sup>-9</sup> | $R^2$   | $u_A(a)$<br>(m/strain)<br>·10 <sup>-8</sup> | $k_{Aa}$ | $U_A(a)$<br>(m/strain)<br>·10 <sup>-8</sup> | $U(a)$<br>(m/strain)<br>·10 <sup>-8</sup> |
|-----|-----------------------|-------------------------------------|----------------------------------------|-----------------------------|---------|---------------------------------------------|----------|---------------------------------------------|-------------------------------------------|
| 1   | 0                     | 1549,922                            | 1,25                                   | 1549,925                    | 0,99992 | 0,56                                        | 2,78     | 1,55                                        | 1,55                                      |
| 2   | 0,206                 | 1550,182                            |                                        |                             |         |                                             |          |                                             |                                           |
| 3   | 0,412                 | 1550,444                            |                                        |                             |         |                                             |          |                                             |                                           |
| 4   | 0,619                 | 1550,703                            |                                        |                             |         |                                             |          |                                             |                                           |
| 5   | 0,825                 | 1550,96                             |                                        |                             |         |                                             |          |                                             |                                           |
| 6   | 1,031                 | 1551,208                            |                                        |                             |         |                                             |          |                                             |                                           |

Tabela 6.15. Bilans niepewności pomiaru czułości fazowej dwójłomności modowej na odkształcenie względne światłowodu fotonicznego PM-1550-01

| Mierzona wielkość<br>$X_j$                                             | Wartość<br>średnia<br>$\bar{x}_j$              | Współczynnik<br>wrażliwości<br>$c_j$                      | Niepewność<br>Rozszerzona                                                                                    | $c_j^2 \cdot U^2(\bar{x}_j)$               |
|------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|
| Czułość<br>odkształceniowa<br>przesunięcia widma<br>$k_{sc}$           | $1,25 \cdot 10^{-6}$ m<br>strain <sup>-1</sup> | $5,58 \cdot 10^2$ m <sup>-1</sup>                         | $1,55 \cdot 10^{-8}$ m strain <sup>-1</sup>                                                                  | $74,8 \cdot 10^{-12}$ strain <sup>-2</sup> |
| Dwójłomność<br>grupowa $\Delta n_G$                                    | $8,65 \cdot 10^{-4}$                           | 0,8 strain <sup>-1</sup>                                  | $6,9 \cdot 10^{-6}$                                                                                          | $30,5 \cdot 10^{-12}$ strain <sup>-2</sup> |
| Długość fali $\lambda$                                                 | $1550 \cdot 10^{-9}$ m                         | $6,98 \cdot 10^2$ m <sup>-1</sup><br>strain <sup>-1</sup> | $5 \cdot 10^{-10}$ m                                                                                         | $0,12 \cdot 10^{-12}$ strain <sup>-2</sup> |
| Dwójłomność fazowa<br>$\Delta n$                                       | $4,77 \cdot 10^{-4}$                           | 1                                                         | $3,8 \cdot 10^{-6}$                                                                                          | $14,4 \cdot 10^{-12}$                      |
| Czułość<br>odkształceniowa<br>dwójłomności<br>$d\Delta n/d\varepsilon$ | $6,38 \cdot 10^{-4}$<br>strain <sup>-1</sup>   |                                                           | $\sum c_j^2 U^2(\bar{x}_j) = 119,82 \cdot 10^{-12}$ strain <sup>-2</sup>                                     |                                            |
| Niepewność pomiaru czułości odkształceniowej<br>dwójłomności           |                                                |                                                           | $U(d\Delta n/d\varepsilon) = 11 \cdot 10^{-6}$ strain <sup>-1</sup><br>$U_r(d\Delta n/d\varepsilon) = 1,7\%$ |                                            |

### Obliczenia niepewności pomiaru czułości fazowej dwójłomności modowej światłowodów przenoszących polaryzację na ciśnienie

Niepewność rozszerzoną na poziomie ufności 0,95 pomiaru czułości  $\Delta n/dp$  światłowodów obliczono metoda przybliżoną ze wzoru (6.14), który dla czułości  $\Delta n/dp$  danej zależnością (6.35) przyjmie postać:

$$U\left(\frac{d\Delta n}{dp}\right) = \sqrt{c_{k_{sp}}^2 U^2(k_{sp}) + c_{\Delta n_G}^2 U^2(\Delta n_G) + c_{\lambda}^2 U^2(\lambda)} \quad (6.47)$$

gdzie poszczególne współczynniki wrażliwości są określone zależnościami

$$c_{k_{sp}} = \frac{\Delta n_G}{\lambda}, \quad c_{\Delta n_G} = \frac{k_{sp}}{\lambda}, \quad c_{\lambda} = -\frac{k_{sp} \Delta n_G}{\lambda} \quad (6.48)$$

Tabela 6.16. Wyniki pomiarów charakterystyki przesunięcia widma interferometru petlowego w funkcji ciśnienia ze światłowodem Bow-tie, wyniki obliczeń parametrów prostej regresji i niepewności rozszerzonej jej współczynnika nachylenia  $a$

| $i$ | $p_i$<br>MPa | $\lambda_i$<br>(m)·10 <sup>-9</sup> | $a$<br>(m/MPa)<br>·10 <sup>-9</sup> | $b$<br>(m)·10 <sup>-9</sup> | $R^2$   | $u_A(a)$<br>(m/MPa)<br>·10 <sup>-11</sup> | $k_{\lambda a}$ | $U_A(a)$<br>(m/MPa)<br>·10 <sup>-11</sup> | $U(a)$<br>(m/MPa)<br>·10 <sup>-11</sup> |
|-----|--------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------|---------|-------------------------------------------|-----------------|-------------------------------------------|-----------------------------------------|
| 1   | 0            | 1550,32                             | 2,75                                | 1550,321                    | 0,99971 | 2,3                                       | 2,78            | 6,5                                       | 6,5                                     |
| 2   | 0,1          | 1550,60                             |                                     |                             |         |                                           |                 |                                           |                                         |
| 3   | 0,2          | 1550,86                             |                                     |                             |         |                                           |                 |                                           |                                         |
| 4   | 0,3          | 1551,16                             |                                     |                             |         |                                           |                 |                                           |                                         |
| 5   | 0,4          | 1551,425                            |                                     |                             |         |                                           |                 |                                           |                                         |
| 6   | 0,5          | 1551,69                             |                                     |                             |         |                                           |                 |                                           |                                         |

Tabela 6.17. Bilans niepewności pomiaru czułości fazowej dwójłomności modowej na ciśnienie światłowodu Bow-tie

| Mierzona wielkość<br>$X_j$                                               | Wartość średnia<br>$\bar{x}_j$           | Współczynnik<br>wrażliwości<br>$c_j$      | Niepewność<br>Rozszerzona                                                               | $c_j^2 \cdot U^2(\bar{x}_j)$              |
|--------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|-------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|
| Czułość ciśnieniowa<br>przesunięcia widma<br>$k_{sp}$                    | $2,75 \cdot 10^{-9}$ m MPa <sup>-1</sup> | $2,55 \cdot 10^2$ m <sup>-1</sup>         | $6,5 \cdot 10^{-11}$ m MPa <sup>-1</sup>                                                | $274,73 \cdot 10^{-18}$ MPa <sup>-2</sup> |
| Dwójłomność<br>grupowa $\Delta n_G$                                      | $3,96 \cdot 10^{-4}$                     | $1,77 \cdot 10^{-3}$ MPa <sup>-1</sup>    | $3,0 \cdot 10^{-6}$                                                                     | $28,19 \cdot 10^{-18}$ MPa <sup>-2</sup>  |
| Długość fali $\lambda$                                                   | $1550 \cdot 10^{-9}$ m                   | $0,453$ m <sup>-1</sup> MPa <sup>-1</sup> | $5 \cdot 10^{-10}$ m                                                                    | $0,05 \cdot 10^{-18}$ MPa <sup>-2</sup>   |
| Czułość ciśnieniowa<br>dwójłomności<br>$d\Delta n/dp$                    | $7,03 \cdot 10^{-7}$ MPa <sup>-1</sup>   |                                           | $\sum c_j^2 U^2(\bar{x}_j) = 302,97 \cdot 10^{-18}$ MPa <sup>-2</sup>                   |                                           |
| Niepewność pomiaru czułości fazowej dwójłomności<br>modowej na ciśnienie |                                          |                                           | $U(d\Delta n/dp) = 17,4 \cdot 10^{-9}$ MPa <sup>-1</sup><br>$U_r(d\Delta n/dp) = 2,5\%$ |                                           |

Tabela 6.18. Wyniki pomiarów charakterystyki przesunięcia widma interferometru pętlowego w funkcji ciśnienia ze światłowodem fotonicznym PM-1550-01, wyniki obliczeń parametrów prostej regresji i niepewności rozszerzonej jej współczynnika nachylenia  $a$

| $i$ | $p_i$<br>MPa | $\lambda_i$<br>(m) · 10 <sup>-9</sup> | $a$<br>(m/MPa) · 10 <sup>-9</sup> | $b$<br>(m) · 10 <sup>-9</sup> | $R^2$   | $u_A(a)$<br>(m/MPa) · 10 <sup>-11</sup> | $k_{Aa}$ | $U_A(a)$<br>(m/MPa) · 10 <sup>-11</sup> | $U(a)$<br>(m/MPa) · 10 <sup>-11</sup> |
|-----|--------------|---------------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------|---------|-----------------------------------------|----------|-----------------------------------------|---------------------------------------|
| 1   | 0            | 1550,41                               | 3,2                               | 1550,411                      | 0,99984 | 2,0                                     | 2,78     | 5,57                                    | 5,57                                  |
| 2   | 0,1          | 1550,73                               |                                   |                               |         |                                         |          |                                         |                                       |
| 3   | 0,2          | 1551,06                               |                                   |                               |         |                                         |          |                                         |                                       |
| 4   | 0,3          | 1551,37                               |                                   |                               |         |                                         |          |                                         |                                       |
| 5   | 0,4          | 1551,68                               |                                   |                               |         |                                         |          |                                         |                                       |
| 6   | 0,5          | 1552,02                               |                                   |                               |         |                                         |          |                                         |                                       |

Tabela 6.19. Bilans niepewności pomiaru czułości fazowej dwójłomności modowej na ciśnienie światłowodu fotonicznego PM-1550-01.

| Mierzona wielkość<br>$X_j$                                               | Wartość średnia<br>$\bar{x}_j$             | Współczynnik<br>wrażliwości<br>$c_j$     | Niepewność<br>Rozszerzona                                                               | $c_j^2 \cdot U^2(\bar{x}_j)$             |
|--------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|
| Czułość ciśnieniowa<br>przesunięcia widma<br>$k_{sp}$                    | $3,2 \cdot 10^{-9}$ m<br>MPa <sup>-1</sup> | $5,58 \cdot 10^2$ m <sup>-1</sup>        | $5,57 \cdot 10^{-11}$ m MPa <sup>-1</sup>                                               | $1168 \cdot 10^{-18}$ MPa <sup>-2</sup>  |
| Dwójłomność<br>grupowa $\Delta n_G$                                      | $8,65 \cdot 10^{-4}$                       | $2,06 \cdot 10^{-3}$ MPa <sup>-1</sup>   | $6,9 \cdot 10^{-6}$                                                                     | $202 \cdot 10^{-18}$ MPa <sup>-2</sup>   |
| Długość fali $\lambda$                                                   | $1550 \cdot 10^{-9}$ m                     | $1,15$ m <sup>-1</sup> MPa <sup>-1</sup> | $5 \cdot 10^{-10}$ m                                                                    | $0,033 \cdot 10^{-18}$ MPa <sup>-2</sup> |
| Czułość ciśnieniowa<br>dwójłomności<br>$d\Delta n/dp$                    | $1,79 \cdot 10^{-6}$ MPa <sup>-1</sup>     |                                          | $\sum c_j^2 U^2(\bar{x}_j) = 1168,03 \cdot 10^{-18}$ MPa <sup>-2</sup>                  |                                          |
| Niepewność pomiaru czułości fazowej dwójłomności<br>modowej na ciśnienie |                                            |                                          | $U(d\Delta n/dp) = 34,2 \cdot 10^{-9}$ MPa <sup>-1</sup><br>$U_r(d\Delta n/dp) = 1,9\%$ |                                          |

Z przeprowadzonych obliczeń niepewności pomiarów czułości fazowej dwójłomności modowej na temperaturę, odkształcenie i ciśnienie światłowodów przenoszących polaryzację wynika że najmniejszą niepewność względną pomiaru uzyskano w pomiarze czułości dwójłomności fazowej na odkształcenie  $U_r(d\Delta n/d\varepsilon) = 1,7\%$  dla światłowodu PM-1550-01 i  $U_r(d\Delta n/d\varepsilon) = 2,0\%$  dla światłowodu Bow-tie, nieznacznie większą niepewność względną miał pomiar czułości dwójłomności fazowej na ciśnienie  $U_r(d\Delta n/dp) = 1,9\%$  dla światłowodu PM-1550-01 i  $U_r(d\Delta n/dp) = 2,5\%$  dla światłowodu Bow-tie, zaś największą niepewność względną pomiaru uzyskano w pomiarze dwójłomności fazowej na temperaturę  $U_r(d\Delta n/dT) = 8\%$  dla światłowodu PM-1550-01 i  $5,2\%$  dla światłowodu Panda.

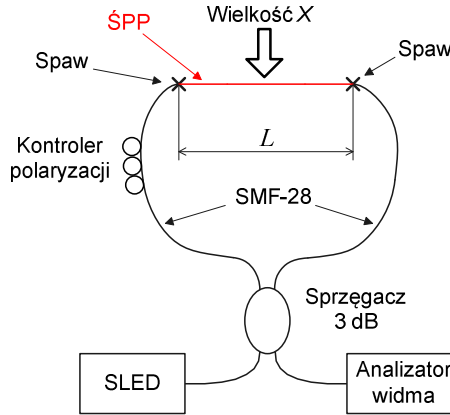
Analizując bilans niepewności pomiaru czułości fazowej dwójłomności na poszczególne wielkości widać, że decydujący udział na niepewność wypadkową ma niepewność pomiaru czułości przesunięcia widma interferometru na wielkość zewnętrzną. Znacząco mniejszy udział na niepewność wypadkową ma niepewność pomiaru grupowej dwójłomności światłowodów, z tym że udział ten rośnie wraz ze zmniejszaniem się niepewności wypadkowej, i dla niepewności pomiaru czułości fazowej dwójłomności na odkształcenie światłowodu PM-1550-01 wynosi ponad 60% udziału niepewności wnoszonej przez niepewność czułości fazowej dwójłomności na odkształcenie. Oznacza to, że wartości niepewności pomiaru dwóch powyższych wielkości: dwójłomności grupowej i czułości dwójłomności fazowej na odkształcenie stają się porównywalne. Natomiast niepewności pomiarów długości światłowodu  $L$ , długości czynnej części tego światłowodu  $L_b$ , długości fali  $\lambda$  oraz dwójłomności fazowej światłowodu mają udział pomijalnie mały. Zatem dla zmniejszenia niepewności pomiaru czułości dwójłomności fazowej na wymuszenie zewnętrzne należy w pierwszej kolejności zmniejszyć niepewność pomiaru czułości przesunięcia widma interferometru na to wymuszenie. Niepewność pomiaru tej czułości zależy od poprawności wykonania pomiaru charakterystyki przesunięcia widma interferometru pętlowego w funkcji wymuszenia działającego na jego światłowód i liczby punktów pomiarowych tej charakterystyki. Od liczby punktów pomiarowych tej charakterystyki zależy wartość współczynnika rozszerzenia  $k_{Aa}$  dla niepewności typu A pomiarów czułości dwójłomności fazowej na wymuszenie  $k_{sX}$ .

### **6.3.2. Pomiar czułości grupowej dwójłomności modowej światłowodów przenoszących polaryzację na wielkość zewnętrzną**

#### **6.3.2.1. Metoda pomiaru**

Dotychczas czułość grupowej dwójłomności modowej na wymuszenie światłowodu  $d\Delta n_G/dX$  oblicza się na podstawie jej zależności definicyjnej (3.12). Do obliczenia tej czułości należy wyznaczyć czułość fazowej dwójłomności modowej badanego światłowodu  $d\Delta n/dX$  w funkcji długości fali, następnie dopasować do zmierzonych punktów zależności  $d\Delta n/dX(\lambda)$  wielomian i obliczyć pochodną dopasowanego wielomianu względem długości fali.

Podstawą proponowanej metody wyznaczania czułości  $d\Delta n_G/dX$  of PMFs jest pomiar okresu widma interferometru pętlowego ze światłowodem PMF, którego wartość jest zależna od działającego na badany światłowód wymuszenia. Pomiaru tego dokonuje się w układzie przedstawionym na rysunku 6.25.



Rys. 6.25. Schemat układu pomiarowego

Widmo interferometru pętlowego ze ŚPP jest okresową funkcją długości fali. Okres widma określa wzór  $\Lambda = \lambda^2 / (L \cdot \Delta n_G)$ . Okres  $\Lambda$  jest zależny od wymuszenia  $X$ , gdyż zarówno długość  $L$  jak i dwójłomność  $\Delta n_G$  światłowodu są zależne od  $X$ . Grupową dwójłomność światłowodu zapisuje się jako

$$\Delta n_G = \frac{\lambda^2}{L \cdot \Lambda} \quad (6.49)$$

Po zróżniczkowaniu zależności (6.49) otrzymuje się zależność na czułość  $d\Delta n_G/dX$  światłowodu w postaci

$$\frac{d\Delta n_G}{dX} = -\frac{\lambda^2}{L \cdot \Lambda^2} \frac{d\Lambda}{dX} - \frac{\lambda^2}{L^2 \cdot \Lambda} \frac{dL}{dX} \quad (6.50a)$$

Zależność (6.50a) jest równaniem pomiaru czułości  $d\Delta n_G/dX$  światłowodu, którego grupowa dwójłomność jest dodatnia. Równanie pomiaru czułości  $d\Delta n_G/dX$  światłowodu, którego grupowa dwójłomność jest ujemna ma postać

$$-\frac{d\Delta n_G}{dX} = \frac{\lambda^2}{L \cdot \Lambda^2} \frac{d\Lambda}{dX} + \frac{\lambda^2}{L^2 \cdot \Lambda} \frac{dL}{dX} \quad (6.50b)$$

Na wartość czułości  $d\Delta n_G/dX$  ma wpływ zmiana okresu widma wywołana zmianą wielkości  $X$  – pierwszy człon wyrażenia (6.50), oraz wpływ zmiany długości światłowodu pod wpływem wielkości  $X$  – drugi człon wzoru (6.50). Na podstawie zależności (6.50) można wyznaczyć czułość  $d\Delta n_G/dX$  dokonując pomiaru okresu widma  $\Lambda$  i jego czułości  $d\Lambda/dX$ . Czułość  $d\Lambda/dX$  wyznacza się na podstawie zmierzonej charakterystyki  $\Lambda = f(X)$ , jako nachylenie dopasowanej do tej charakterystyki prostej.

Czułość  $d\Delta n_G/dX$ , bez uwzględnienia wpływu zmian długości światłowodu pod wpływem działania wielkości mierzonej, można także wyznaczyć

wykorzystując zmierzoną charakterystykę  $\Lambda = f(X)$ , na podstawie obliczonej różnicy dróg optycznych pomiędzy modami polaryzacji  $R_G(X) = \Delta n_G \cdot L$ , z zależności

$$R_G(X) = \frac{\lambda^2}{\Lambda(X)} \quad (6.51)$$

Czułość  $d\Delta n_G/dX$  światłowodu wyznacza się z relacji

$$\frac{d\Delta n_G}{dX} = \frac{dR_G(X)}{L \cdot dX} \quad (6.52)$$

gdzie czułość różnicy dróg optycznych pomiędzy modami polaryzacji na wielkość zewnętrzną  $dR_G/dX$ , jest nachyleniem prostej dopasowanej do obliczonych punktów zależności  $R_G = f(X)$ . Zależność (6.52) pozwala wyznaczyć moduł czułości dwójłomności grupowej na wielkość zewnętrzną. Znak  $d\Delta n_G/dX$  wyznacza się na podstawie z zależności (6.50).

Zależność (6.50) oraz zależność (6.52) z uwzględnieniem wpływu zmian długości światłowodu pod wpływem działania wielkości zewnętrznej, przyjmują następującą postać: dla czułości dwójłomności grupowej na temperaturę  $d\Delta n/dT$

$$\frac{d\Delta n_G}{dT} = \mp \frac{\lambda^2}{L \cdot \Lambda^2} \frac{d\Lambda}{dT} \mp \frac{\alpha \cdot \lambda^2}{L \cdot \Lambda} \quad (6.53)$$

$$\frac{d\Delta n_G}{dT} = \frac{1}{L} \frac{dR_G}{dT} \mp \frac{\alpha \cdot \lambda^2}{L \cdot \Lambda} \quad (6.54)$$

gdzie  $\alpha$  jest liniowym współczynnikiem rozszerzalności temperaturowej światłowodu, dla czułości dwójłomności grupowej na odkształcenie  $d\Delta n_G/d\epsilon$

$$\frac{d\Delta n_G}{d\epsilon} = \mp \frac{\lambda^2}{L \cdot \Lambda^2} \frac{d\Lambda}{d\epsilon} \mp \frac{\lambda^2}{L \cdot \Lambda} \quad (6.55)$$

$$\frac{d\Delta n_G}{d\epsilon} = \frac{1}{L} \frac{dR_G}{d\epsilon} \mp \frac{\lambda^2}{L \cdot \Lambda} \quad (6.56)$$

oraz dla czułości dwójłomności grupowej na ciśnienie

$$\frac{d\Delta n_G}{dp} = \mp \frac{\lambda^2}{L \cdot \Lambda^2} \frac{d\Lambda}{dp} \quad (6.57)$$

$$\frac{d\Delta n_G}{dp} = \frac{1}{L} \frac{dR_G}{dp} \quad (6.58)$$

przy założeniu, że zmiana długości światłowodu wywołana działaniem na niego ciśnienia jest do pominięcia ( $dl/dp \approx 0$ ). Zależności (6.53)–(6.58) ze znakami minus, obowiązują dla światłowodów z dodatnią dwójłomnością grupową, natomiast ze znakami plus, obowiązują dla światłowodów z ujemną dwójłomnością grupową.

Gdy zmiany okresu widma pod wpływem zmian wymuszenia są zbyt małe dla poprawnego ich pomiaru, można je obliczyć na podstawie zmierzonej czułości  $k_{sX} = d\lambda/dX$  i dwójłomności grupowej  $\Delta n_G$  w funkcji długości fali. Procedura obliczania czułości  $\Delta\Lambda/\Delta X$  oraz czułości  $\Delta R_G/\Delta X$  jest następująca.

W pierwszej kolejności oblicza się okres widma światłowodu  $\Lambda_0^{X_0}$  dla długości

fali  $\lambda$ , oraz okres jego widma  $\Lambda_p^{X_0}$  dla długości fali  $\lambda_p = \lambda + \Delta\lambda$ , dla początkowej wartości wymuszenia  $X_0$  ze wzoru  $\Lambda = \lambda^2/(L \Delta n_G)$ , gdzie  $L$  jest długością światłowodu. Dla przyjętego przyrostu  $\Delta\lambda$ , wyznacza się następnie potrzebny przyrost wymuszenia  $\Delta X$ , korzystając z zależności na  $|k_{sT}|$ , przy czym za  $\lambda$  podstawia się wartość  $\lambda_p$ . Znak przyrostu  $\Delta\lambda$  przyjmuje się taki, aby pod wpływem przyrostu wymuszenia  $\Delta X$ , widmo przesunęło się tak, aby jego maksimum odpowiadające długości fali  $\lambda_p$  zrównało się z maksimum widma odpowiadającemu długości fali  $\lambda$ . Kolejny krok to obliczenie długości fal odpowiadających minimom okresu widma  $\Lambda_p^{X_0}$  dla  $X_0$  z zależności

$\lambda_{p1,2min}^{X_0} = \lambda_p \mp \Lambda_p / 2$ . Następnie oblicza się wartości długości fali odpowiadające minimom tego okresu dla  $X_1 = X_0 + \Delta X$ , potrzebne do obliczenia okresu widma  $\Lambda_p^{X_1}$  dla wymuszenia  $X_1$ , z zależności

$\lambda_{p1,2min}^{X_1} = \lambda_{p1,2min}^{X_0} - k_{sT} \cdot \Delta X$ , gdzie  $k_{sT}$  są obliczone odpowiednio dla  $\lambda = \lambda_p - \Lambda_p/2$  oraz  $\lambda = \lambda_p + \Lambda_p/2$ . Okres widma  $\Lambda_p^{X_1}$  oblicza się ze wzoru

$\Lambda_p^{X_1} = \lambda_{p,2min} - \lambda_{p,1min}$ . Ostatecznie czułość okresu widma na wielkość

zewnętrzną oblicza się z relacji  $\Delta\Lambda/\Delta X = (\Lambda_p^{X_1} - \Lambda_0^{X_0})/(X_1 - X_0)$ . W następnej kolejności oblicza się ze wzoru (6.51) różnicę dróg optycznych modów polaryzacji  $R_G(X_0)$  oraz  $R_G(X_1)$ , co pozwala obliczyć czułość różnicy dróg optycznych na wymuszenie ze wzoru  $\Delta R_G/\Delta X = [R_G(X_1) - R_G(X_0)]/(X_1 - X_0)$ . Obliczone czułości  $\Delta\Lambda/\Delta X$  oraz  $\Delta R_G/\Delta X$  pozwalają obliczyć czułość  $d\Delta n_G/dX$  oraz podstawie zależności odpowiednio (6.50) i (6.52).

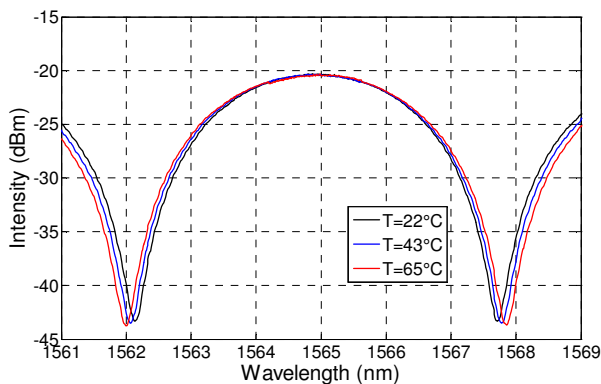
### 6.3.2.2. Pomiary czułości grupowej dwójłomności modowej światłowodów przenoszących polaryzację na temperaturę i odkształcenie

Pomiary czułości grupowej dwójłomności modowej SPP na temperaturę i odkształcenie przeprowadzono w układzie, którego schemat przedstawia rysunek 6.25. Pomiary wykonano dla długości fali z zakresu 1300–1600 nm. Jako szerokopasmowe źródło światła, zastosowano te same dwie diody SLED,

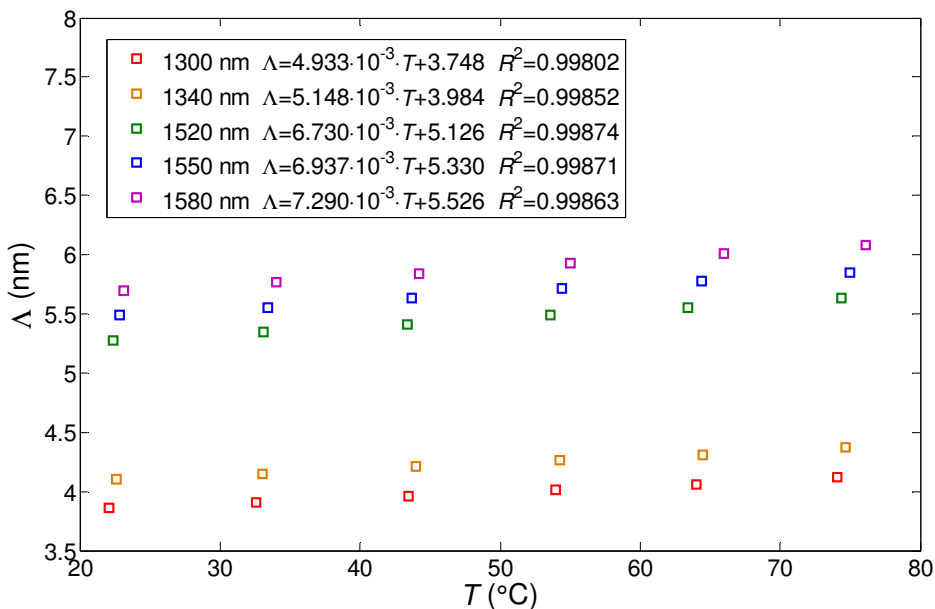
które użyto w pomiarze czułości fazowej dwójłomności modowej na wielkość zewnętrzną. Badane odcinki ŚPP łączono ze światłowodem SMF-28 przy tworzeniu pętli interferometru przez spawanie. Używano do tego celu standardowej spawarki, wykorzystującej łuk elektryczny. Pomiar okresu widna wiązki transmitowanej czujnika wykonano analizatorem widna optycznego OSA. Pomiarom poddano odcinki światłowodów: fotonicznego PM-1550-01 oraz konwencjonalnych Panda (SM13-PS-U25A) i Bow-tie (HB1500T).

Dla wyznaczenia czułości dwójłomności na temperaturę  $d\Delta n_G/dT$ , odcinki badanych światłowodów o długości 1350 mm dla PM-PCF i 1145 mm dla Panda PMF umieszczono w komorze, temperaturę w której kontrolowano w zakresie 25–75 °C z rozdzielczością  $\pm 0,1$  °C. Czułość  $d\Delta n_G/dT$  badanych światłowodów wyznaczano z zależności (6.53) i (6.54).

Wyznaczono okres widna interferometru pętlowego z odcinkiem badanego światłowodu Panda w zależności od jego temperatury zgodnie z procedurą podaną w punkcie 6.2.1. Na rysunku 6.26 przedstawiono widmo interferometru dla różnych wartości temperatury światłowodu Panda. Widać z niego, że ze wzrostem temperatury tego światłowodu rośnie okres widna interferometru. Wyniki pomiarów okresu widna interferometru w funkcji temperatury światłowodu Panda, dla ustalonych (różnych) długości fali przedstawiono na rysunku 6.27. Współczynnik nachylenia charakterystyk  $\Lambda = f(T)$  zwiększa się z długością fali od 4,9 pm/K dla  $\lambda = 1300$  nm do 7,3 pm/K dla  $\lambda = 1580$  nm.



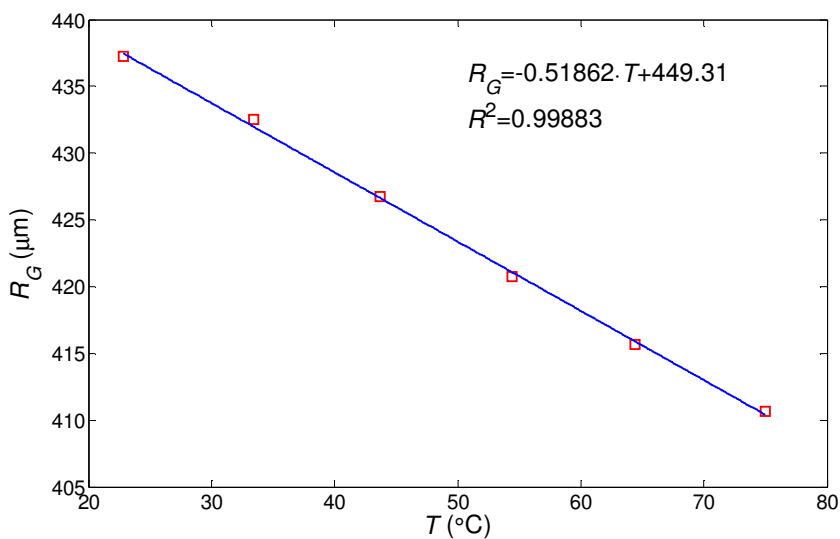
Rys. 6.26. Zmierzony wycinek widna transmisyjnego interferometru Sagnaca ze światłowodem Panda, dla różnych temperatur tego światłowodu



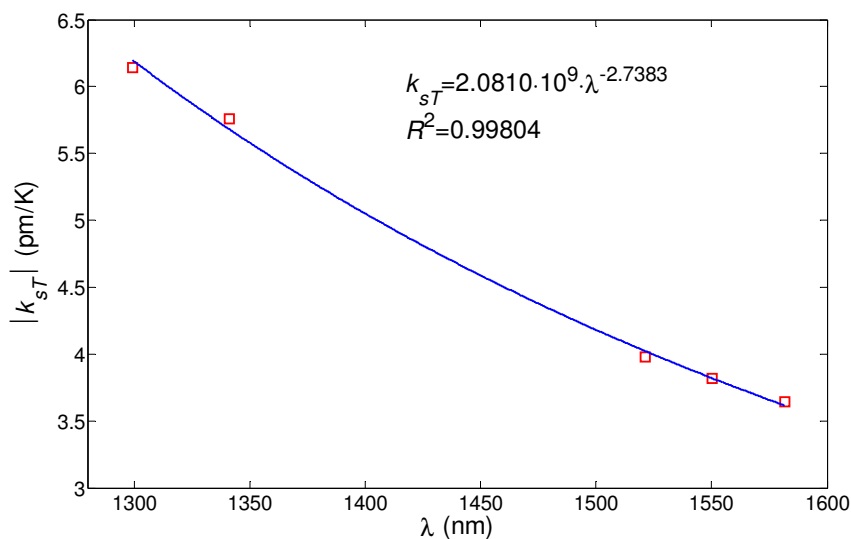
Rys. 6.27. Zależności okresu widma interferometru pętlowego ze światłowodem Panda od temperatury tego światłowodu, dla różnych długości fali

Na podstawie tych pomiarów korzystając z zależności (6.51) obliczono różnicę dróg optycznych pomiędzy modami polaryzacji światłowodu Panda w funkcji jego temperatury  $R_G(T)$ , dla ustalonych długości fali. Do obliczonego zbioru punktów charakterystyki  $R_G = f(T)$  dla każdej z ustalonych długości fali metodą najmniejszych kwadratów dopasowano prostą. Wyniki tych obliczeń dla długości fali 1550 nm przedstawiono na rysunku 6.28. Proste obliczone dla pozostałych długości fal różnią się od prostej z rysunku 6.28 współczynnikiem nachylenia o mniej niż  $6,4 \cdot 10^{-3} \mu\text{m/K}$  i wartością początkową nie więcej niż  $1,0 \mu\text{m}$ .

Wyznaczenie okresu widma interferometru pętlowego z odcinkiem badanego światłowodu fotonicznego w zależności od temperatury, ze względu na małą czułość temperaturową tego światłowodu, wykonano na podstawie uzyskanych z pomiarów: charakterystyki czułości temperaturowej interferometru pętlowego z tym światłowodem od długości fali  $k_{sT} = f(\lambda)$  oraz charakterystyki  $\Delta n_G = f(\lambda)$  tego światłowodu. Do zależności modułu  $k_{sT}$  od długości fali dopasowano funkcję potęgową o postaci  $|k_{sT}| = 2,081 \cdot 10^9 \cdot \lambda^{-2,738}$  rysunku 6.29, a moduł dwójłomności grupowej światłowodu fotonicznego PM-1550-01 opisuje wzór  $|\Delta n_G| = 9,049 \cdot 10^{-13} \cdot \lambda^{2,815}$  gdzie  $\lambda$  jest wyrażone w nanometrach (pkt. 6.2.3).



Rys. 6.28. Różnica dróg optycznych pomiędzy modami polaryzacji światłowodu Panda w funkcji jego temperatury dla długości fali 1550 nm



Rys. 6.29. Moduł czułości temperaturowej przesunięcia widma interferometru pętlowego ze światłowodem PM-1550-01, w zależności od długości fali

Przykład obliczeniowy.

Obliczona zostanie czułość grupowej dwójłomności modowej na temperaturę  $d\Delta n_G/dT$  światłowodu fotonicznego PM-1550-01 dla długości fali 1550 nm według procedury podanej w pkt. 6.4.1.

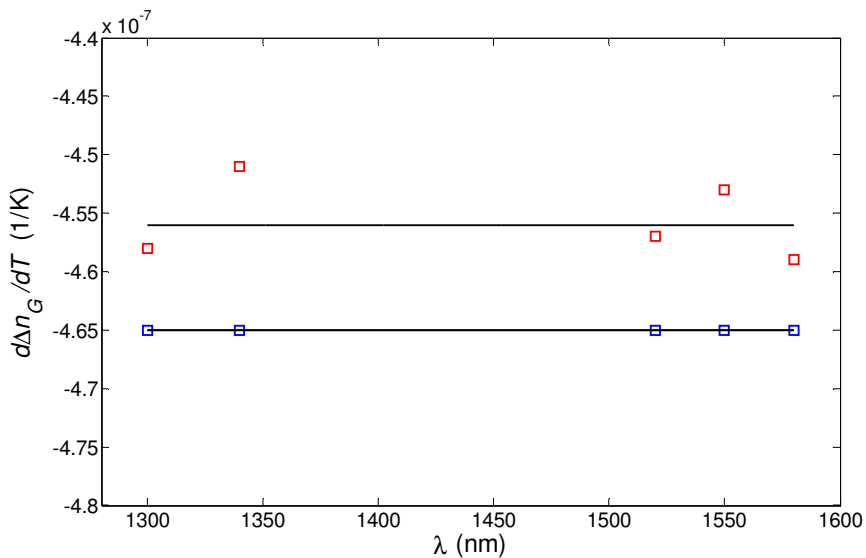
Dane wejściowe: długość światłowodu fotonicznego  $L = 1,35$  m, temperatura otoczenia  $T_0 = 22$  °C,  $|\Delta n_G| = 9,049 \cdot 10^{-13} \cdot \lambda^{2,815}$  oraz  $|k_{sT}| = 2,081 \cdot 10^9 \cdot \lambda^{-2,738}$ . W pierwszej kolejności oblicza się okres widma interferometru  $\Lambda_0^{T_0}$  dla  $T_0$  i dla  $\lambda = 1550$  nm, ze wzoru  $\Lambda = \lambda^2 / (L \cdot \Delta n_G)$ ,  $\Delta n_G = 8,65734 \cdot 10^{-4}$ ,  $\Lambda_0^{T_0} = 2,05563$  nm. Następnie przyjmuje się  $\Delta \lambda = 2$  nm, zatem  $\lambda_p = \lambda + \Delta \lambda = 1552$  nm. Współczynnik czułości  $k_{sT}$  dla  $\lambda_p$  wynosi  $k_{sT} = 3,816019$  pm/K. Dla przyjętego  $\Delta \lambda$  oblicza się przyrost temperatury  $\Delta T = \Delta \lambda / k_{sT} = 524,1$  K. Kolejny krok to obliczenie okresu widma dla długości fali  $\lambda_p$ , oraz obliczenie wartości długości fali odpowiadających minimom tego okresu w temperaturze otoczenia  $T_0$ : dla  $\lambda_p = 1552$  nm,  $\Delta n_G = 8,688819$  nm,  $\Lambda_p^{T_0} = 2,05347$  nm,  $\lambda_{p1\min}^{T_0} = \lambda_p - \Lambda_p^{T_0} / 2 = 1550,97326$  nm,  $\lambda_{p2\min}^{T_0} = \lambda_p + \Lambda_p^{T_0} / 2 = 1553,02674$  nm. Następnie oblicza się wartości długości fali odpowiadające minimom tego okresu widma dla temperatury  $T_1 = T_0 + \Delta T$ :  $\lambda_{p1\min}^{T_1} = \lambda_{p1\min}^{T_0} - k_{sT} \cdot \Delta T = 1550,97326$  nm  $- 2,0036$  nm  $= 1548,96966$  nm, gdzie  $k_{sT} = 3,82293$  pm/K obliczono dla  $\lambda_{p1\min}^{T_0}$ ,  $\lambda_{p2\min}^{T_1} = \lambda_{p2\min}^{T_0} - k_{sT} \cdot \Delta T = 1553,02674$  nm  $- 1,99636$  nm  $= 1551,03038$  nm, gdzie  $k_{sT} = 3,809115$  pm/K obliczono dla  $\lambda_{p2\min}^{T_0}$ . Okres widma  $\Lambda_p^{T_1}$  obliczono ze wzoru  $\Lambda_p^{T_1} = \lambda_{p2\min}^{T_1} - \lambda_{p1\min}^{T_1} = 2,06072$  nm. Z kolei oblicza się czułość temperaturową okresu widma  $\Delta \Lambda / \Delta T = (\Lambda_p^{T_1} - \Lambda_0^{T_0}) / \Delta T = 5,09$  pm /  $524,1$  K  $= 9,712 \cdot 10^{-15}$  m/K. Ze wzoru (6.51) oblicza się różnice dróg optycznych pomiędzy modami polaryzacji  $R_G(T_0) = 1168,741$   $\mu$ m oraz  $R_G(T_1) = 1165,854$   $\mu$ m, co pozwala obliczyć czułość temperaturową tej różnicy dróg ze wzoru  $\Delta R_G / \Delta T = [R_G(T_1) - R_G(T_0)] / \Delta T = 2,887$   $\mu$ m /  $524,1$  K  $= 5,508 \cdot 10^{-9}$  m/K. Zatem czułość dwójłomności grupowej na temperaturę bez uwzględnienia wydłużenia światłowodu wynosi  $\Delta R_G / (L \cdot \Delta T) = (5,508 \cdot 10^{-9} \text{ m/K}) / 1,35 \text{ m} = 4,08 \cdot 10^{-9} \cdot \text{K}^{-1}$ . Wartość drugiego członu wzoru (6.54) oznaczona w tabeli 1 jako  $d\Delta n_G / dT_\alpha = 0,475 \cdot 10^{-9} \cdot \text{K}^{-1}$ . Zatem czułość  $d\Delta n_G / dT = 4,08 \cdot 10^{-9} \cdot \text{K}^{-1} + 0,475 \cdot 10^{-9} \cdot \text{K}^{-1} = 4,55 \cdot 10^{-9} \cdot \text{K}^{-1}$ . Znak czułości  $d\Delta n_G / dT$  światłowodu PM-1550-01 jest dodatni, gdyż jego dwójłomność grupowa jest ujemna i w zależności (6.53) obowiązują znaki plus a czułość  $\Delta \Lambda / \Delta T$  też jest dodatnia.

W tabeli 6.20 zestawiono obliczenia czułości temperaturowej: okresu widma interferometru pętlowego, różnicy dróg optycznych pomiędzy modami polaryzacji oraz dwójłomności grupowej światłowodu PM-1550-01, w funkcji długości fali.

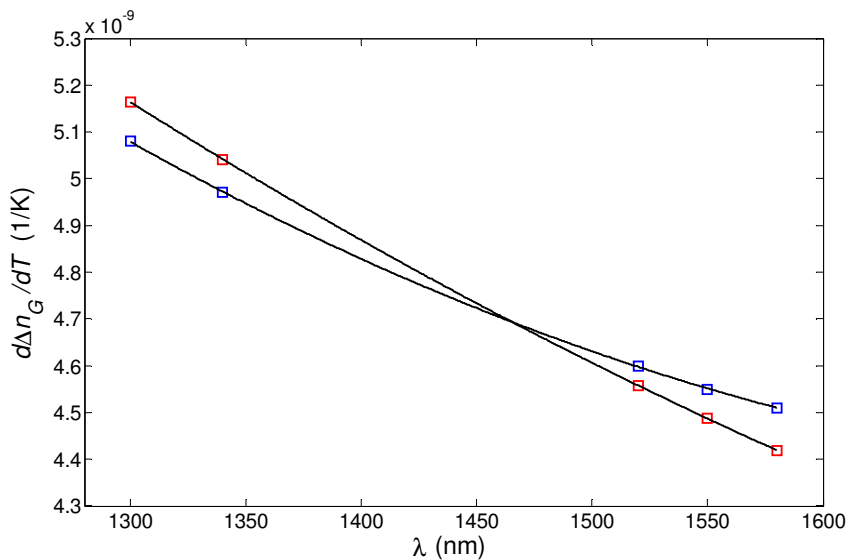
Tabela 6.20. Obliczenia czułości temperaturowych światłowodu PM-1550-01

| $\Lambda$ , nm                                  | 1300             | 1340              | 1520              | 1550              | 1580              |
|-------------------------------------------------|------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| $\Delta\Lambda/\Delta T$ , m/K $\cdot 10^{-15}$ | $21,6 \pm 0,72$  | $18,78 \pm 0,63$  | $10,61 \pm 0,38$  | $9,72 \pm 0,34$   | $8,91 \pm 0,31$   |
| $\Delta R_G/\Delta T$ , m/K $\cdot 10^{-9}$     | $6,47 \pm 0,22$  | $6,28 \pm 0,21$   | $5,60 \pm 0,20$   | $5,51 \pm 0,19$   | $5,42 \pm 0,19$   |
| $d\Delta n_G/dT_\omega$ , 1/K $\cdot 10^{-9}$   | $0,29 \pm 0,004$ | $0,316 \pm 0,004$ | $0,450 \pm 0,006$ | $0,475 \pm 0,006$ | $0,502 \pm 0,007$ |
| $d\Delta n_G/dT$ , 1/K $\cdot 10^{-9}$          | $5,08 \pm 0,17$  | $4,97 \pm 0,17$   | $4,60 \pm 0,17$   | $4,55 \pm 0,16$   | $4,51 \pm 0,16$   |

Obliczenia czułości  $d\Delta n_G/dT$  wykonano wykorzystując wyznaczoną czułość  $d\Lambda/dT$  oraz  $dR/dT$  z zależności (6.53) i (6.54) odpowiednio. Uzyskane wartości czułości  $d\Delta n_G/dT$  są zgodne. Znak czułości  $d\Delta n_G/dT$  światłowodu Panda jest ujemny, gdyż znak czułości  $d\Lambda/dT$  jest dodatni, a znaki we wzorze (6.53) są ujemne, dla dodatniej dwójłomności  $\Delta n_G$ . Przy obliczeniach czułości  $d\Delta n_G/dT$  konwencjonalnego PMF typu Panda wpływ temperaturowego wydłużenia światłowodu na jej wartość, drugi człon wzorów (6.53) i (6.54), jest mniejszy niż 1% i można go zaniedbać. Natomiast dla światłowodu PM-1550-01 wpływ ten jest znaczny i wynosi  $(0,45-0,50)\cdot 10^{-9} \text{ K}^{-1}$  to jest (10–11)% wartości jego czułości  $d\Delta n_G/dT$  i został w obliczeniach uwzględniony. Wyniki obliczeń czułości  $d\Delta n_G/dT$  badanych światłowodów przedstawiono na rysunkach 6.30 i 6.31. Różnica pomiędzy średnią wartością czułości  $d\Delta n_G/dT$  wyznaczoną z pomiarów okresu widma i obliczoną na podstawie zależności definicyjnej (3.12) nie przekraczają  $9,0\cdot 10^{-9}\cdot \text{K}^{-1}$  dla światłowodu Panda, to jest 2% wartości średniej czułości  $d\Delta n_G/dT$ , natomiast dla światłowodu PM-1550-01 maksymalna różnica pomiędzy wartościami czułości  $d\Delta n_G/dT$  wyznaczonymi tymi metodami wynosi  $9\cdot 10^{-10}\cdot \text{K}^{-1}$  to jest 2% minimalnej wartości czułości  $d\Delta n_G/dT$ .



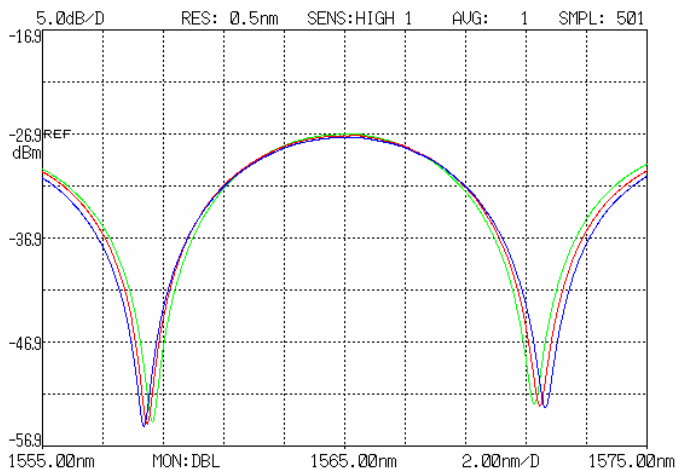
Rys. 6.30. Czułość temperaturowa grupowej dwójłomności modowej  $d\Delta n_G/dT$  światłowodu Panda, w zależności od długości fali a) wyznaczona z obliczeń okresu widma (czerwony), b) obliczona z równania definicyjnego (niebieski)



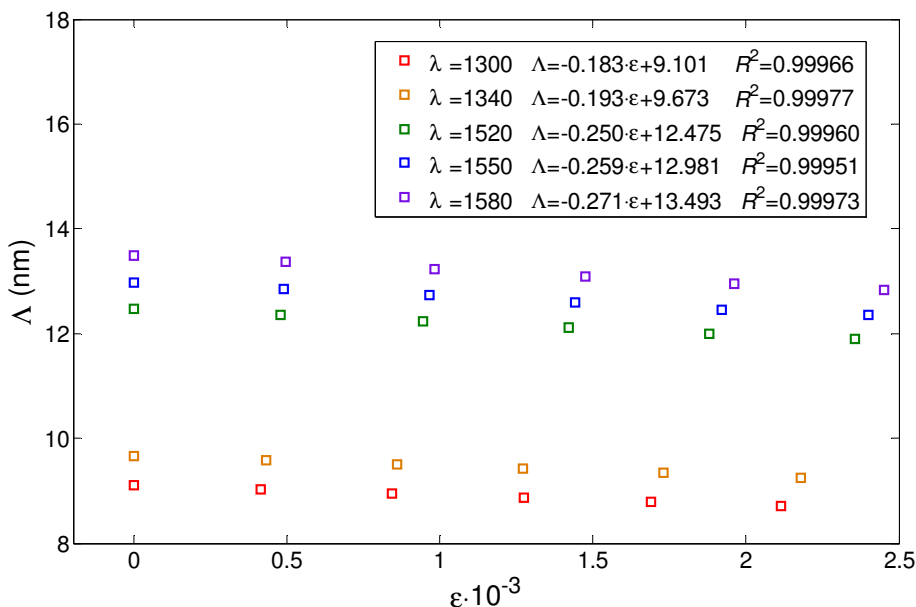
Rys. 6.31. Czułość temperaturowa grupowej dwójłomności modowej  $d\Delta n_G/dT$  światłowodu PM-1550-01, w zależności od długości fali a) wyznaczona z obliczeń okresu widma (niebieski), b) obliczona z równania definicyjnego (czerwony)

Podobną procedurę zastosowano w pomiarze czułości ŚPP na odkształcenie  $d\Delta n_G/d\varepsilon$ . W tym przypadku światłowód PM-1550-01 o długości 1000 mm i światłowód Bow-tie o długości 466 mm przyklejano żywicą epoksydową do płytek metalowych, które mocowano do precyzyjnych, stolików przesuwanych. Przesuwając jeden ze stolików zadawano odkształcenia ŚPP w zakresie 0–2,5 mε. Czułość  $d\Delta n_G/d\varepsilon$  badanych światłowodów wyznaczano na podstawie zależności (6.55) i (6.56).

Na rysunku 6.32 przedstawiono widmo interferometru dla różnych wartości odkształcenia jego światłowodu Bow-tie. Widać z niego, że ze wzrostem odkształcenia światłowodu maleje okres widma interferometru. Zatem czułość okresu widna na odkształcenie jest ujemna. Wyniki pomiarów okresu widna interferometru w funkcji odkształcenia jego światłowodu Bow-tie, dla ustalonych (różnych) długości fali, przedstawiono na rysunku 6.33. Wartość bezwzględna współczynnika nachylenia charakterystyk  $\Lambda = f(\varepsilon)$  zwiększa się z długością fali od 183 pm/mε dla  $\lambda = 1300$  nm do 271 pm/mε dla  $\lambda = 1580$  nm.



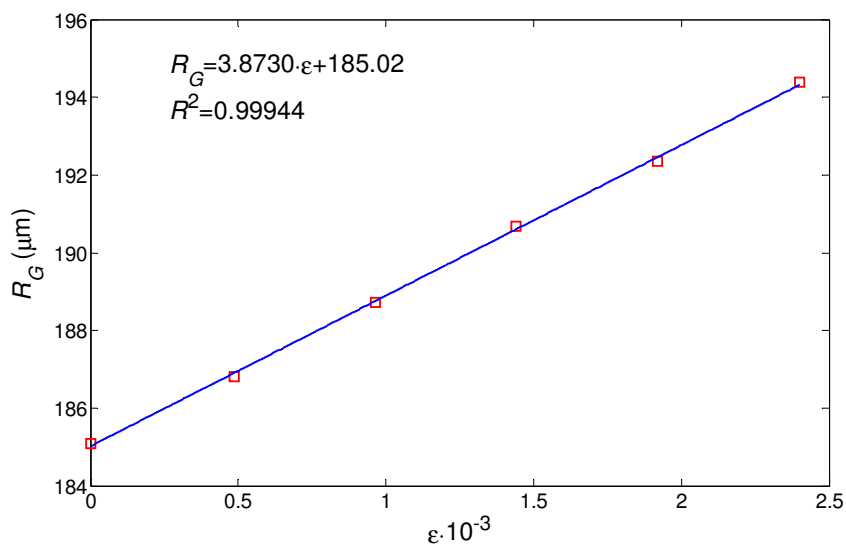
Rys. 6.32. Zmierzony wycinek widma transmisyjnego interferometru pętlowego ze światłowodem Bow-tie, dla różnych odkształceń tego światłowodu 0 εm (niebieski), 0,97 mε (czerwony), 1,94 mε (zielony)



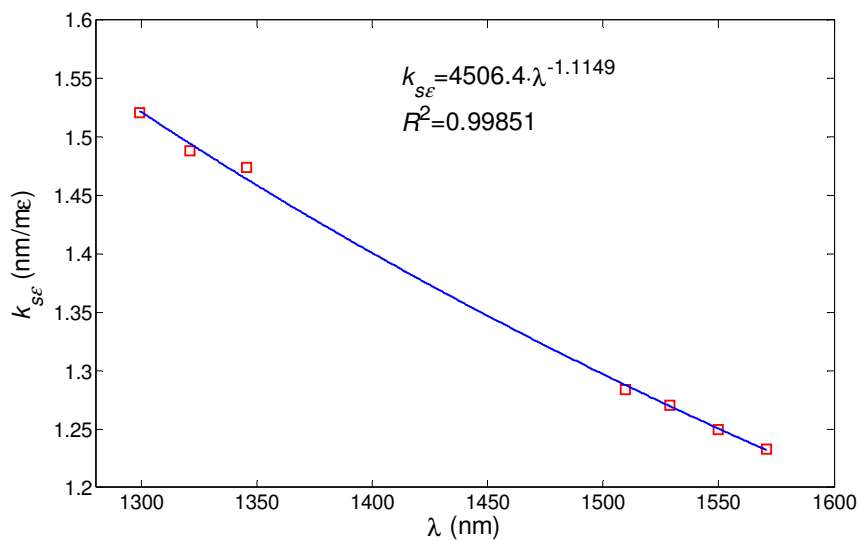
Rys. 6.33. Okres widma  $\Lambda$  (nm) interferometru petlowego w funkcji odkształcenia  $\epsilon$  jego światłowodu Bow-tie dla różnych długości fali

Na podstawie tych pomiarów, korzystając z zależności (6.56), obliczono różnicę dróg optycznych modów polaryzacji w światłowodzie w funkcji odkształcenia  $R_G(\epsilon)$  dla ustalonych długości fali. Do obliczonego zbioru punktów charakterystyki  $R_G = f(\epsilon)$  dla każdej z ustalonych długości fali dopasowano prostą. Wyniki tych obliczeń dla długości fali 1550 nm przedstawiono na rysunku 6.34. Proste obliczone dla pozostałych długości fal różnią się od prostej z rysunku 6.34 współczynnikiem nachylenia o mniej niż  $3,7 \cdot 10^{-2} \mu\text{m/K}$  i wartością początkową nie więcej niż  $1,0 \mu\text{m}$ .

Do obliczenia czułości  $d\Delta n_G/d\epsilon$  światłowodu PM-1550-01 wykorzystano zmierzona czułość  $k_{s\epsilon} = d\lambda/d\epsilon$  interferometru petlowego z tym światłowodem oraz charakterystyki  $\Delta n_G = f(\lambda)$  tego światłowodu. Do zależności czułości  $k_{s\epsilon}$  od długości fali dopasowano funkcję potęgową o postaci  $k_{s\epsilon} = 4506,4 \cdot \lambda^{-1,1149}$ , gdzie  $\lambda$  jest wyrażone w nanometrach (rys. 6.35).



Rys. 6.34. Różnica dróg optycznych  $R$  ( $\mu\text{m}$ ) modów polaryzacji światłowodu Bow-tie w funkcji jego odkształcenia



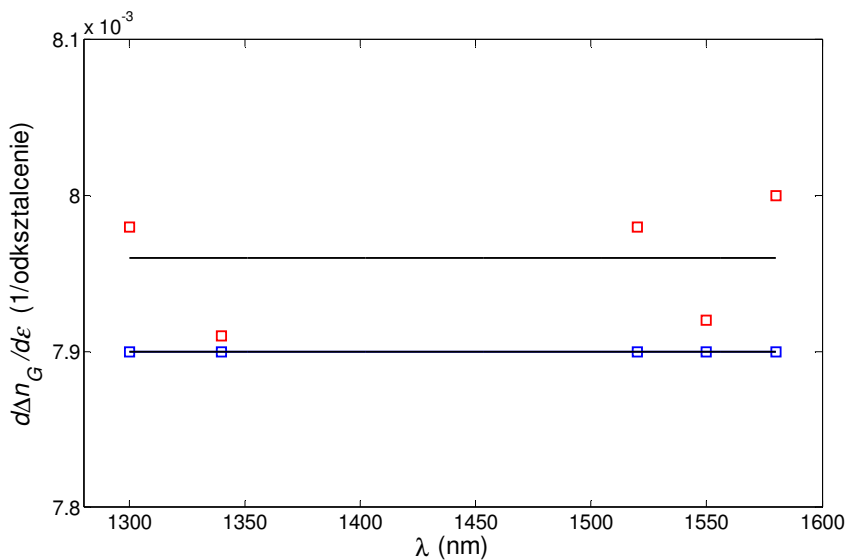
Rys. 6.35. Czułość odkształceniowa  $k_{SE}$  interferometru pętlowego z odcinkiem światłowodu PM-1550-01

W tabeli 6.21 zestawiono obliczenia czułości odkształceniowej: okresu widma interferometru pętlowego, różnicy dróg optycznych pomiędzy modami polaryzacji oraz dwójłomności grupowej światłowodu PM-1550-01, w funkcji długości fali.

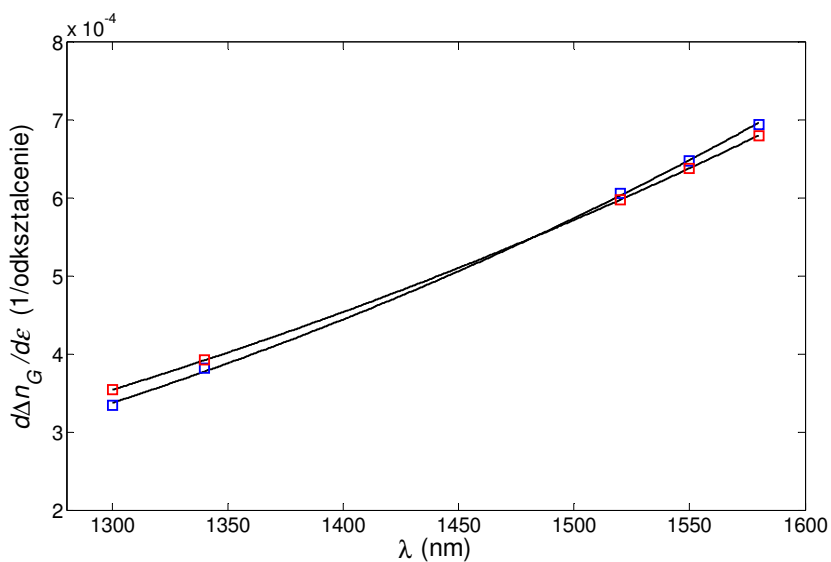
Tabela 6.21. Obliczenia czułości odkształceniowych światłowodu PM-1550-01

| $\Lambda$ , nm                                             | 1300             | 1340             | 1520             | 1550             | 1580             |
|------------------------------------------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| $\Delta\Lambda/\Delta\epsilon$ , m/strain $\cdot 10^{-10}$ | $-11,7 \pm 0,23$ | $-10,7 \pm 0,21$ | $-7,33 \pm 0,15$ | $-6,95 \pm 0,14$ | $-6,62 \pm 0,13$ |
| $\Delta R/\Delta\epsilon$ , m/strain $\cdot 10^{-4}$       | $-1,93 \pm 0,04$ | $-1,97 \pm 0,04$ | $-2,13 \pm 0,04$ | $-2,17 \pm 0,04$ | $-2,2 \pm 0,04$  |
| $d\Delta n_G/d\epsilon_{dl}$ , 1/strain $\cdot 10^{-4}$    | $5,28 \pm 0,11$  | $5,75 \pm 0,12$  | $8,19 \pm 0,17$  | $8,65 \pm 0,18$  | $9,14 \pm 0,19$  |
| $d\Delta n_G/d\epsilon$ , 1/strain $\cdot 10^{-4}$         | $3,35 \pm 0,07$  | $3,75 \pm 0,08$  | $6,06 \pm 0,13$  | $6,48 \pm 0,14$  | $6,94 \pm 0,15$  |

Obliczenia czułości  $d\Delta n_G/d\epsilon$  wykonano wykorzystując wyznaczoną czułość  $d\Lambda/d\epsilon$  oraz  $dR/d\epsilon$  z zależności (6.55) i (6.56) odpowiednio. Uzyskane wartości czułości  $d\Delta n_G/d\epsilon$  są zgodne. Znak czułości  $d\Delta n_G/d\epsilon$  światłowodu Bow-tie jest ujemny, gdyż znak czułości  $d\Lambda/d\epsilon$  jest ujemny i znaki we wzorze (6.53) są ujemne, dla dodatniej dwójłomności  $\Delta n_G$  tego światłowodu. Przy obliczeniach czułości  $d\Delta n_G/d\epsilon$  uwzględniano wpływ wydłużenia odkształcanego światłowodu na jej wartość - drugi człon wzorów (6.55) i (6.56). Wpływ ten dla światłowodu Bow-tie wyraża się wartością  $4,0 \cdot 10^{-4}$ /strain, czyli 5,3% jego wartości  $d\Delta n_G/d\epsilon$ , natomiast dla światłowodu fotonicznego jest decydującym składnikiem jego czułości  $d\Delta n_G/d\epsilon$ . Wyniki obliczeń  $d\Delta n_G/d\epsilon$  przedstawiono na rysunkach 6.36 i 6.37. Różnica pomiędzy średnią wartością czułości  $d\Delta n_G/d\epsilon$  wyznaczoną z pomiarów okresu widma i obliczoną na podstawie zależności definicyjnej (3.12) nie przekraczają  $5,73 \cdot 10^{-5}$ /strain dla światłowodu Bow-tie, to jest 0,7% średniej wartości czułości  $d\Delta n_G/d\epsilon$ , natomiast dla światłowodu PM-1550-01 maksymalna różnica pomiędzy wartościami czułości  $d\Delta n_G/dT$  wyznaczonymi tymi metodami wynosi  $1,9 \cdot 10^{-5}$ /strain, to jest 2,7% maksymalnej wartości jego czułości  $d\Delta n_G/d\epsilon$ .



Rys. 6.36. Czułość odkształceniowa grupowej dwójłomności modowej  $d\Delta n_G/d\varepsilon$  światłowodu Bow-tie wyznaczona a) z pomiarów okresu widma (czerwone kwadraty), b) z równania definicyjnego (niebieskie kwadraty)



Rys. 6.37. Czułość odkształceniowa grupowej dwójłomności modowej  $d\Delta n_G/d\varepsilon$  światłowodu PM-1550-01 wyznaczona a) z obliczeń okresu widma (niebieski), b) z równania definicyjnego (czerwony)

Wyniki czułości  $d\Delta n_G/dT$  i czułości  $d\Delta n_G/d\varepsilon$  konwencjonalnych światłowodów przenoszących polaryzację z dwójłomnością naprężeniową, uzyskane z pomiarów okresu widma interferometru pętlowego, oraz wyniki tych czułości światłowodu fotonicznego PM-1550-01, uzyskane z obliczeń okresu widma interferometru pętlowego z tym światłowodem na podstawie czułości przesunięcia jego widma na wymuszenie, dobrze korespondują z wynikami obliczeń czułości  $d\Delta n_G/dT$  i czułości  $d\Delta n_G/d\varepsilon$  uzyskanymi na podstawie ich wzoru definicyjnego.

Dokładność pomiarów czułości grupowej na temperaturę i odkształcenie badanych światłowodów przedstawioną metodą ustalono na podstawie oszacowania niepewności pomiarów, które zamieszczono w następnym punkcie pracy.

### **6.3.2.3. Niepewność pomiaru czułości grupowej dwójłomności modowej światłowodów przenoszących polaryzację na wymuszenia zewnętrzne**

Niepewność rozszerzoną pomiaru czułości grupowej dwójłomności modowej światłowodów na wymuszenie zewnętrzne oszacowano, podobnie jak niepewność pomiaru czułości fazowej dwójłomności modowej światłowodów, metodą przybliżoną szacowania niepewności pomiarów pośrednich podaną w pracy [129].

Wyznaczenie wartości czułości  $d\Delta n_G/dX$  można wykonać na podstawie zależności (6.50) lub (6.52). Niezależnie od wykorzystywanej zależności, należy dokonać pomiarów długości fali  $\lambda$ , długości światłowodu  $L$ , okresu widma  $\Lambda$  i czułości okresu widma na wymuszenie  $d\Lambda/dX$ , przy korzystaniu z zależności (6.50), oraz czułości różnicy dróg optycznych modów polaryzacji na wymuszenie  $dR_G/dX$ , przy korzystaniu z zależności (6.52).

W pomiarze czułości grupowej dwójłomności modowej światłowodu na wymuszenie, bazującej na interferometrze pętlowym, niepewności typu A są większe od niepewności typu B, zatem niepewność rozszerzoną na poziomie ufności 0,95 można oszacować na podstawie zależności (6.14).

Niepewność standardowa typu A wyznaczenia czułości okresu widma na wymuszenie  $d\Lambda/dX$ , oraz czułości różnicy dróg optycznych modów polaryzacji na wymuszenie  $dR_G/dX$ , wyznaczano na podstawie współczynnika korelacji  $R$  dopasowania prostej do punktów zmierzonych charakterystyk  $\Lambda = f(X)$  oraz  $R_G = f(X)$  na podstawie wzoru (6.42).

Długość fali  $\lambda$  odpowiada maksimum widma między dwoma jego minimami, z których wyznacza się okres widma. Pomiaru długości fali  $\lambda$  dokonywano jednorazowo analizatorem widma, którego błąd graniczny  $\Delta_g\lambda = 0,5$  nm.

Na niepewność pomiaru długości fali decydujący wpływ ma niepewność typu B, która na poziomie ufności 0,95 wynosi

$$U(\lambda) = U_B(\lambda) = \Delta_g \lambda = 0,5 \text{ nm}.$$

Pomiar długości odcinków  $L$  światłowodów wykonano jednorazowo liniałem mierniczym z błędem granicznym  $\Delta_g L = 1 \text{ mm}$ . Na niepewność pomiaru długości odcinków  $L$  składa się tylko niepewność typu B, która na poziomie ufności 0,95 wynosi

$$U(L) = U_B(L) \cong \Delta_g L = 1 \text{ mm}.$$

Za wartość okresu widma przyjęto wartość średnią  $\Lambda = \bar{\Lambda}$  dolnej i górnej wartości zakresu pomiaru okresu widma. Pomiar okresu widma wyznaczano jako różnicę długości fal  $\lambda_1$  i  $\lambda_2$  odpowiadającym dwóm kolejnym minimom widma, bez powtarzania pomiaru. Na niepewność pomiaru okresu widma miała wpływ tylko niepewność typu B. Niepewność tą obliczono z zależności

$$U(\Lambda) = \sqrt{U^2(\lambda_1) + U^2(\lambda_2)}. \quad (6.59)$$

Na niepewność pomiaru długości fal  $\lambda_1$  i  $\lambda_2$  składa się tylko niepewność typu B, która na poziomie ufności 0,95 wynosi

$$U(\lambda_1) = U(\lambda_2) = U_B(\lambda_1) = U_B(\lambda_2) = \Delta_g \lambda.$$

$\Delta_g \lambda$  jest błędem granicznym optycznego analizatora widma, na który składa się jego błąd nieliniowości i rozdzielczości.

Niepewność rozszerzoną na poziomie ufności 0,95 pomiaru czułości  $d\Delta n_G/dT$  światłowodu Panda obliczono ze wzoru (6.14), który dla czułości  $d\Delta n_G/dT$  danej wzorem

$$\frac{d\Delta n_G}{dT} = -\frac{\lambda^2}{L\Lambda^2} \frac{d\Lambda}{dT}. \quad (6.60)$$

przyjmuje postać:

$$U\left(\frac{d\Delta n_G}{dT}\right) = \sqrt{c_L^2 U^2(L) + c_{k_{\Lambda T}}^2 U^2(k_{\Lambda T}) + c_\lambda^2 U^2(\lambda) + c_\Lambda^2 U^2(\Lambda)}, \quad (6.61)$$

gdzie współczynniki wrażliwości określone są zależnościami:

$$c_L = \frac{\lambda^2 k_{\Lambda T}}{L^2 \Lambda^2}, \quad c_{k_{\Lambda T}} = -\frac{\lambda^2}{L\Lambda^2}, \quad c_\lambda = -\frac{2\lambda k_{\Lambda T}}{L\Lambda^2}, \quad c_\Lambda = \frac{2\lambda k_{\Lambda T}}{L\Lambda^3}, \quad (6.62)$$

gdzie  $k_{\Lambda T} = d\Lambda/dT$ .

Niepewność rozszerzoną na poziomie ufności 0,95 pomiaru czułości  $d\Delta n_G/dT$ , danej wzorem

$$\frac{d\Delta n_G}{dT} = \frac{1}{L} \frac{dR_G}{dT} \quad (6.63)$$

obliczono z zależności

$$U\left(\frac{d\Delta n_G}{dT}\right) = \sqrt{c_L^2 U^2(L) + c_{k_{RT}}^2 U^2(k_{RT})} R \quad (6.64)$$

gdzie współczynniki wrażliwości określone są zależnościami

$$c_L = -\frac{k_{RT}}{L^2}, \quad c_{k_{RT}} = \frac{1}{L} \quad (6.65)$$

gdzie  $k_{RT} = dR_G/dT$ .

Wyniki obliczeń niepewności rozszerzonej pomiaru czułości grupowej dwójłomności światłowodu Panda na temperaturę z wykorzystaniem zmierzonych charakterystyk  $\Lambda = f(T)$  oraz  $R_G = f(T)$  interferometru pętlowego, przedstawiono w tabelach 6.22–6.25. Pomiar okresu widma wykonywano na zakresie 10nm. Na tym zakresie błąd nieliniowości wynosi 5 pm i błąd rozdzielczości odczytu jest równy 5 pm. Zatem  $\Delta_g \lambda = 10$  pm.

Tabela 6.22. Wyniki pomiarów charakterystyki  $\Lambda = f(T)$  interferometru pętlowego ze światłowodem Panda, obliczeń parametrów prostej regresji i rozszerzonej niepewności wyznaczenia współczynnika nachylenia prostej  $a$

| $i$ | $T_i$<br>°C | $\Lambda_i$<br>(m)·10 <sup>-9</sup> | $\Lambda$<br>(m)·10 <sup>-9</sup> | $a$<br>(m/K)<br>·10 <sup>-12</sup> | $b$<br>(m)·10 <sup>-9</sup> | $R^2$  | $u_A(a)$<br>(m/K)<br>·10 <sup>-14</sup> | $k_{\Lambda a}$ | $U_A(a)$<br>(m/K)<br>·10 <sup>-13</sup> | $U(a)$<br>(m/K)<br>·10 <sup>-13</sup> |
|-----|-------------|-------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|-----------------------------|--------|-----------------------------------------|-----------------|-----------------------------------------|---------------------------------------|
| 1   | 22,8        | 5,495                               | 5,67                              | 6,937                              | 5,330                       | 0,9987 | 12,5                                    | 2,78            | 3,48                                    | 3,48                                  |
| 2   | 32,4        | 5,555                               |                                   |                                    |                             |        |                                         |                 |                                         |                                       |
| 3   | 43,7        | 5,63                                |                                   |                                    |                             |        |                                         |                 |                                         |                                       |
| 4   | 54,4        | 5,71                                |                                   |                                    |                             |        |                                         |                 |                                         |                                       |
| 5   | 64,4        | 5,78                                |                                   |                                    |                             |        |                                         |                 |                                         |                                       |
| 6   | 74,5        | 5,85                                |                                   |                                    |                             |        |                                         |                 |                                         |                                       |

Tabela 6.23. Bilans niepewności pomiaru czułości dwójłomności grupowej na temperaturę światłowodu Panda. Czułość  $d\Delta n_G/dT$  obliczano na podstawie czułości  $k_{\Delta T} = d\Delta/dT$

| Mierzona wielkość<br>$X_j$                                               | Wartość średnia<br>$\bar{x}_j$                       | Współczynnik<br>wrażliwości<br>$c_j$                | Niepewność<br>Rozszerzona                                                               | $c_j^2 \cdot U^2(\bar{x}_j)$          |
|--------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|
| Długość światłowodu $L$                                                  | 1,145 m                                              | $0,395 \cdot 10^{-6} \text{ m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ | $1 \cdot 10^{-3} \text{ m}$                                                             | $0,156 \cdot 10^{-18} \text{ K}^{-2}$ |
| Czułość okresu widma na temperaturę $k_{\Delta T}$                       | $6,937 \cdot 10^{-12} \text{ m} \cdot \text{K}^{-1}$ | $6,53 \cdot 10^4 \text{ m}^{-1}$                    | $3,48 \cdot 10^{-13} \text{ mK}^{-1}$                                                   | $516,4 \cdot 10^{-18} \text{ K}^{-2}$ |
| Długość fali $\lambda$                                                   | $1550 \cdot 10^{-9} \text{ m}$                       | $0,584 \text{ m}^{-1} \text{ K}^{-1}$               | $5 \cdot 10^{-10} \text{ m}$                                                            | $0,085 \cdot 10^{-18} \text{ K}^{-2}$ |
| Okres widma $\Lambda$                                                    | $5,67 \cdot 10^{-9} \text{ m}$                       | $1,6 \cdot 10^2 \text{ m}^{-1} \text{ K}^{-1}$      | $14 \cdot 10^{-12} \text{ m}$                                                           | $5,01 \cdot 10^{-18} \text{ K}^{-2}$  |
| Czułość temperaturowa dwójłomności $d\Delta n_G/dT$                      | $-4,56 \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-1}$                 |                                                     | $\sum c_j^2 U^2(\bar{x}_j) = 521,76 \cdot 10^{-18} \text{ K}^{-2}$                      |                                       |
| Niepewność pomiaru czułości temperaturowej grupowej dwójłomności modowej |                                                      |                                                     | $U(d\Delta n_G/dT) = 2,3 \cdot 10^{-8} \text{ K}^{-1}$<br>$U_w(d\Delta n_G/dT) = 5,0\%$ |                                       |

Tabela 6.24. Wyniki pomiarów charakterystyki  $\Lambda = f(R_G)$  interferometru pętlowego ze światłowodem Panda, obliczeń parametrów prostej regresji i rozszerzonej niepewności wyznaczenia współczynnika nachylenia prostej  $a$

| $i$ | $T_i$<br>°C | $R_{Gi}$<br>(m) · 10 <sup>-6</sup> | $a$<br>(m/K) · 10 <sup>-6</sup> | $b$<br>(m) · 10 <sup>-6</sup> | $R^2$  | $u_A(a)$<br>(m/K) · 10 <sup>-8</sup> | $k_{Aa}$ | $U_A(a)$<br>(m/K) · 10 <sup>-8</sup> | $U(a)$<br>(m/K) · 10 <sup>-8</sup> |
|-----|-------------|------------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|--------|--------------------------------------|----------|--------------------------------------|------------------------------------|
| 1   | 22,8        | 437,22                             | -0,5186                         | 449,30                        | 0,9988 | 0,898                                | 2,78     | 2,5                                  | 2,5                                |
| 2   | 32,4        | 432,49                             |                                 |                               |        |                                      |          |                                      |                                    |
| 3   | 43,7        | 426,73                             |                                 |                               |        |                                      |          |                                      |                                    |
| 4   | 54,4        | 420,75                             |                                 |                               |        |                                      |          |                                      |                                    |
| 5   | 64,4        | 415,66                             |                                 |                               |        |                                      |          |                                      |                                    |
| 6   | 74,5        | 410,68                             |                                 |                               |        |                                      |          |                                      |                                    |

Tabela 6.25. Bilans niepewności pomiaru czułości grupowej dwójłomności modowej na temperaturę światłowodu Panda. Czułość  $d\Delta n_G/dT$  obliczano na podstawie czułości  $k_{RT} = dR_G/dT$

| Mierzona wielkość<br>$X_j$                                                  | Wartość średnia<br>$\bar{x}_j$                        | Współczynnik<br>wrażliwości<br>$c_j$                | Niepewność<br>Rozszerzona                                                               | $c_j^2 \cdot U^2(\bar{x}_j)$                                     |
|-----------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|
| Długość<br>światłowodu $L$                                                  | 1,145 m                                               | $0,396 \cdot 10^{-6} \text{ m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ | $1 \cdot 10^{-3} \text{ m}$                                                             | $0,157 \cdot 10^{-18} \text{ K}^{-2}$                            |
| Czułość $R_G$<br>na temperaturę $k_{RT}$                                    | $-0,5186 \cdot 10^{-6} \text{ m} \cdot \text{K}^{-1}$ | $0,873 \text{ m}^{-1}$                              | $2,5 \cdot 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{K}^{-1}$                                       | $4,76 \cdot 10^{-16} \text{ K}^{-2}$                             |
| Czułość<br>temperaturowa<br>dwójłomności<br>$d\Delta n_G/dT$                | $-4,56 \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-1}$                  |                                                     |                                                                                         | $\sum c_j^2 U^2(\bar{x}_j) = 4,76 \cdot 10^{-16} \text{ K}^{-2}$ |
| Niepewność pomiaru czułości temperaturowej grupowej<br>dwójłomności modowej |                                                       |                                                     | $U(d\Delta n_G/dT) = 2,2 \cdot 10^{-8} \text{ K}^{-1}$<br>$U_w(d\Delta n_G/dT) = 4,8\%$ |                                                                  |

Z przedstawionych obliczeń wynika, że niepewność rozszerzona pomiaru czułości grupowej dwójłomności modowej na temperaturę światłowodu Panda obliczana z wykorzystaniem zależności (6.61) i czułości  $d\Delta/dT$  ma nieznacznie większą wartość, niż wartość tej niepewności obliczonej z wykorzystaniem zależności (6.64) i czułości  $dR_G/dT$ . Wynika to z nieznacznie lepszego dopasowania prostej regresji liniowej do punktów pomiarowych charakterystyki  $R_G = f(T)$ , niż dopasowanie takiej prostej do punktów pomiarowych charakterystyki  $\Delta = f(T)$ . Ilościowo ta nieznaczna różnica w dopasowaniu prostych wyraża się w nieznacznej różnicy wartości kwadratu współczynnika korelacji  $R^2$ . Analizowany przypadek nie jest regularny. Istnieją przypadki odwrotne, lepszego dopasowania prostej regresji liniowej do punktów pomiarowych charakterystyki  $\Delta = f(T)$  niż dopasowanie takiej prostej do punktów pomiarowych odpowiadającej jej charakterystyki  $\Delta = f(T)$ .

Analizując bilans niepewności pomiaru czułości temperaturowej grupowej dwójłomności na poszczególne wielkości widać, że decydujący udział w niepewności wypadkowej ma niepewność pomiaru czułości okresu widna na temperaturę i niepewność pomiaru czułości różnicy dróg optycznych modów polaryzacji na temperaturę. Natomiast niepewności pomiaru długości światłowodu  $L$ , długości fali  $\lambda$ , oraz okresu widna mają udział pomijalnie mały.

Oszacowanie niepewności obliczeń temperaturowej czułości grupowej dwójłomności, okresu widna interferometru, różnicy dróg optycznych modów polaryzacji światłowodu PM-1550-01, której wartości zamieszczono w tabeli 6.20, przeprowadzono na podstawie obliczonej niepewności wyznaczenia grupowej dwójłomności tego światłowodu i niepewności wyznaczenia temperaturowej czułości przesunięcia widna interferometru z tym światłowodem. Względne niepewności tych czułości nie przekraczają 3,8%.

Niepewność rozszerzona na poziomie ufności 0,95 pomiaru czułości grupowej dwójłomności na odkształcenie względne światłowodu Bow-tie obliczono ze wzoru (6.14), który dla czułości  $d\Delta n_G/d\varepsilon$  danej zależnością

$$\frac{d\Delta n_G}{d\varepsilon} = -\frac{\lambda^2}{L\Lambda^2} \frac{d\Lambda}{d\varepsilon} - \frac{\lambda^2}{L\Lambda}, \quad (6.66)$$

przyjmuje postać:

$$U\left(\frac{d\Delta n_G}{d\varepsilon}\right) = \sqrt{c_L^2 U^2(L) + c_{k_{\Lambda\varepsilon}}^2 U^2(k_{\Lambda\varepsilon}) + c_\lambda^2 U^2(\lambda) + c_\Lambda^2 U^2(\Lambda)}, \quad (6.67)$$

gdzie współczynniki wrażliwości określone są zależnościami:

$$c_L = \frac{\lambda^2 k_{\Lambda\varepsilon}}{L^2 \Lambda^2} - \frac{\lambda^2}{L^2 \Lambda}, c_{k_{\Lambda\varepsilon}} = -\frac{\lambda^2}{L\Lambda^2}, c_\lambda = -\frac{2\lambda k_{\Lambda\varepsilon}}{L\Lambda^2} - \frac{2\lambda}{L\Lambda}, c_\Lambda = \frac{2\lambda^2 k_{\Lambda\varepsilon}}{L\Lambda^2} + \frac{\lambda^2}{L\Lambda^3} \quad (6.68)$$

gdzie  $k_{\Lambda\varepsilon} = d\Lambda/d\varepsilon$ .

Niepewność rozszerzona na poziomie ufności 0,95 pomiaru czułości dwójłomności grupowej na odkształcenie względne światłowodu Bow-tie obliczono ze wzoru (6.14), który dla czułości  $d\Delta n_G/d\varepsilon$  danej zależnością

$$\frac{d\Delta n_G}{d\varepsilon} = \frac{1}{L} \frac{dR_G}{d\varepsilon} - \frac{\lambda^2}{L\Lambda} \quad (6.69)$$

przyjmuje postać:

$$U\left(\frac{d\Delta n_G}{d\varepsilon}\right) = \sqrt{c_L^2 U^2(L) + c_{k_{R\varepsilon}}^2 U^2(k_{R\varepsilon}) + c_\lambda^2 U^2(\lambda) + c_\Lambda^2 U^2(\Lambda)} \quad (6.70)$$

gdzie współczynniki wrażliwości określone są zależnościami:

$$c_L = -\frac{k_{R\varepsilon}}{L^2 \Lambda^2} + \frac{\lambda^2}{L^2 \Lambda}, c_{k_{R\varepsilon}} = \frac{1}{L}, c_\lambda = -\frac{2\lambda}{L\Lambda}, c_\Lambda = \frac{\lambda^2}{L\Lambda^2} \quad (6.71)$$

gdzie  $k_{R\varepsilon} = dR_G/d\varepsilon$ .

Pomiar okresu widma wykonywano na zakresie optycznego analizatora widma 16 nm. Na tym zakresie błąd nieliniowości analizatora wynosi 8 pm i błąd rozdzielczości odczytu jest 8 pm. Zatem  $\Delta_\varepsilon \lambda = 16 \text{ pm}$ .

Wyniki obliczeń niepewności rozszerzonej wyznaczenia czułości  $d\Delta n_G/d\varepsilon$  światłowodu Bow-tie z wykorzystaniem zmierzonych charakterystyk  $\Lambda = f(\varepsilon)$  oraz  $R_G = f(\varepsilon)$  interferometru pętlowego, przedstawiono w tabelach 6.26–6.29.

Tabela 6.26. Wyniki pomiarów charakterystyki  $\Lambda = f(\epsilon)$  interferometru pętlowego ze światłowodem Bow-tie, obliczeń parametrów prostej regresji i rozszerzonej niepewności wyznaczenia współczynnika nachylenia prostej  $a$

| $i$ | $\epsilon_i$<br>(strain)<br>$\cdot 10^{-3}$ | $\Lambda_i$<br>(m)<br>$\cdot 10^{-9}$ | $\Lambda$<br>(m)<br>$\cdot 10^{-9}$ | $a$<br>(m/strain)<br>$\cdot 10^{-6}$ | $b$<br>(m)<br>$\cdot 10^{-9}$ | $R^2$  | $u_A(a)$<br>(m/strain)<br>$\cdot 10^{-8}$ | $k_{Aa}$ | $U_A(a)$<br>(m/strain.)<br>$\cdot 10^{-8}$ | $U(a)$<br>(m/strain)<br>$\cdot 10^{-8}$ |
|-----|---------------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------|--------|-------------------------------------------|----------|--------------------------------------------|-----------------------------------------|
| 1   | 0                                           | 12,98                                 | 12,67                               | -0,2587                              | 12,98                         | 0,9995 | 0,287                                     | 2,78     | 0,798                                      | 0,798                                   |
| 2   | 0,487                                       | 12,86                                 |                                     |                                      |                               |        |                                           |          |                                            |                                         |
| 3   | 0,964                                       | 12,73                                 |                                     |                                      |                               |        |                                           |          |                                            |                                         |
| 4   | 1,440                                       | 12,6                                  |                                     |                                      |                               |        |                                           |          |                                            |                                         |
| 5   | 1,920                                       | 12,49                                 |                                     |                                      |                               |        |                                           |          |                                            |                                         |
| 6   | 2,400                                       | 12,36                                 |                                     |                                      |                               |        |                                           |          |                                            |                                         |

Tabela 6.27. Bilans niepewności pomiaru czułości dwójłomności grupowej na odkształcenie światłowodu Bow-tie. Czułość  $d\Delta n_G/d\epsilon$  obliczano na podstawie czułości  $k_{A\epsilon} = d\Lambda/d\epsilon$

| Mierzona wielkość<br>$X_j$                                                  | Wartość średnia<br>$\bar{x}_j$                | Współczynnik wrażliwości<br>$c_j$                      | Niepewność Rozszerzona                                                                                     | $c_j^2 \cdot U^2(\bar{x}_j)$              |
|-----------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|--------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|
| Długość światłowodu $L$                                                     | 0,465 m                                       | $1,7 \cdot 10^{-2} \text{ m}^{-1} \text{ strain}^{-1}$ | $1 \cdot 10^{-3} \text{ m}$                                                                                | $2,89 \cdot 10^{-10} \text{ strain}^{-2}$ |
| Czułość $R_G$ na odkształcenie<br>$k_{R\epsilon}$                           | $-0,2587 \cdot 10^{-6} \text{ m/strain}$      | $3,21 \cdot 10^4 \text{ m}^{-1}$                       | $0,798 \cdot 10^{-8} \text{ m/strain}$                                                                     | $6,56 \cdot 10^{-8} \text{ strain}^{-2}$  |
| Długość fali $\lambda$                                                      | $1,55 \cdot 10^{-6} \text{ m}$                | $1,02 \cdot 10^4 \text{ m}^{-1} \text{ strain}^{-1}$   | $5 \cdot 10^{-10} \text{ m}$                                                                               | $0,25 \cdot 10^{-10} \text{ strain}^{-2}$ |
| Okres widma $\Lambda$                                                       | $12,67 \cdot 10^{-9} \text{ m}$               | $1,28 \cdot 10^6 \text{ m}^{-1} \text{ strain}^{-1}$   | $23 \cdot 10^{-12} \text{ m}$                                                                              | $0,87 \cdot 10^{-9} \text{ strain}^{-2}$  |
| Czułość odkształceniowa dwójłomności<br>$d\Delta n_G/d\epsilon$             | $7,96 \cdot 10^{-3} \cdot \text{strain}^{-1}$ |                                                        | $\sum c_j^2 U^2(\bar{x}_j) = 6,68 \cdot 10^{-8} \text{ strain}^{-2}$                                       |                                           |
| Niepewność pomiaru czułości grupowej dwójłomności na odkształcenie względne |                                               |                                                        | $U(d\Delta n_G/d\epsilon) = 2,6 \cdot 10^{-4} \text{ strain}^{-1}$<br>$U_w(d\Delta n_G/d\epsilon) = 3,3\%$ |                                           |

Tabela 6.28. Wyniki pomiarów charakterystyki  $R_G = f(\epsilon)$  interferometru pętlowego ze światłowodem Bow-tie, obliczeń parametrów prostej regresji liniowej i rozszerzonej niepewności wyznaczenia współczynnika nachylenia prostej  $a$

| $i$ | $\epsilon_i$<br>(strain)<br>$\cdot 10^{-3}$ | $R_{Gi}$<br>(m)<br>$\cdot 10^{-6}$ | $a$<br>(m/strain)<br>$\cdot 10^{-3}$ | $b$<br>(m)<br>$\cdot 10^{-6}$ | $R^2$  | $u_A(a)$<br>(m/strain)<br>$\cdot 10^{-5}$ | $k_{Aa}$ | $U_A(a)$<br>(m/strain)<br>$\cdot 10^{-5}$ | $U(a)$<br>(m/strain)<br>$\cdot 10^{-5}$ |
|-----|---------------------------------------------|------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------|--------|-------------------------------------------|----------|-------------------------------------------|-----------------------------------------|
| 1   | 0                                           | 185,09                             | 3,873                                | 185,02                        | 0,9994 | 4,725                                     | 2,78     | 13,1                                      | 13,1                                    |
| 2   | 0,487                                       | 186,82                             |                                      |                               |        |                                           |          |                                           |                                         |
| 3   | 0,964                                       | 188,73                             |                                      |                               |        |                                           |          |                                           |                                         |
| 4   | 1,440                                       | 190,67                             |                                      |                               |        |                                           |          |                                           |                                         |
| 5   | 1,920                                       | 192,35                             |                                      |                               |        |                                           |          |                                           |                                         |
| 6   | 2,400                                       | 194,38                             |                                      |                               |        |                                           |          |                                           |                                         |

Tabela 6.29. Bilans niepewności pomiaru czułości dwójłomności grupowej na odkształcenie światłowodu Bow-tie. Czułość  $d\Delta n_G/d\epsilon$  obliczano na podstawie czułości  $k_{Re} = dR_G/d\epsilon$

| Mierzona wielkość<br>$X_j$                                                     | Wartość średnia<br>$\bar{x}_j$                     | Współczynnik<br>wrażliwości<br>$c_j$               | Niepewność<br>Rozszerzona                                                                                  | $c_j^2 \cdot U^2(\bar{x}_j)$              |
|--------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|----------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|
| Długość<br>światłowodu $L$                                                     | 0,465 m                                            | $1,7 \cdot 10^{-2}$<br>$m^{-1} \text{strain}^{-1}$ | $1 \cdot 10^{-3}$ m                                                                                        | $2,89 \cdot 10^{-10} \text{ strain}^{-2}$ |
| Czułość $R_G$<br>na odkształcenie $k_{Re}$                                     | $3,873 \cdot 10^{-3}$<br>m/strain                  | $2,15 \cdot m^{-1}$                                | $13,1 \cdot 10^{-5}$ m/strain                                                                              | $7,93 \cdot 10^{-8} \text{ strain}^{-2}$  |
| Długość fali $\lambda$                                                         | $1,55 \cdot 10^{-6}$ m                             | $0,526 \cdot 10^3 m^{-1}$                          | $5 \cdot 10^{-10}$ m                                                                                       | $7,02 \cdot 10^{-14}$                     |
| Okres widma $\Lambda$                                                          | $12,67 \cdot 10^{-9}$ m                            | $3,2 \cdot 10^4 m^{-1}$                            | $23 \cdot 10^{-12}$ m                                                                                      | $0,54 \cdot 10^{-12}$                     |
| Czułość<br>odkształceniowa<br>dwójłomności<br>$d\Delta n_G/d\epsilon$          | $7,96 \cdot 10^{-3}$<br>$\cdot \text{strain}^{-1}$ |                                                    | $\sum c_j^2 U^2(\bar{x}_j) = 7,97 \cdot 10^{-8} \text{ strain}^{-2}$                                       |                                           |
| Niepewność pomiaru czułości grupowej<br>dwójłomności na odkształcenie względne |                                                    |                                                    | $U(d\Delta n_G/d\epsilon) = 2,8 \cdot 10^{-4} \text{ strain}^{-1}$<br>$U_w(d\Delta n_G/d\epsilon) = 3,5\%$ |                                           |

Z przedstawionych obliczeń wynika, że niepewność rozszerzona pomiaru czułości grupowej dwójłomności modowej na odkształcenie światłowodu Bow-tie obliczonej z wykorzystaniem zależności (6.67) i (6.68) i czułości  $d\Lambda/d\epsilon$  jest nieznacznie mniejsza od niepewności obliczonej z zależności (6.70) i (6.71)

i czułości  $dR_G/d\epsilon$ . Różnica tych niepewności wynosi  $0,2 \cdot 10^{-4}/\text{strain}$  dla niepewności bezwzględnych i 0,2% dla niepewności względnych. Powodem tej różnicy jest różnica w dopasowaniu prostej regresji liniowej do punktów pomiarowych charakterystyk  $\Lambda = f(\epsilon)$  i  $R_G = f(\epsilon)$ , a zatem różnica w wartościach kwadratu współczynnika korelacji  $R^2$ .

Analizując bilans niepewności pomiaru czułości odkształceniowej grupowej dwójłomności modowej na poszczególne wielkości widać, że decydujący udział w niepewności wypadkowej ma niepewność pomiaru czułości okresu widna na odkształcenie i niepewność pomiaru czułości różnicy dróg optycznych modów polaryzacji na odkształcenie. Natomiast niepewności pomiaru długości światłowodu  $L$ , długości fali  $\lambda$ , oraz okresu widna mają udział pomijalnie mały.

Wyniki przeprowadzonych obliczeń niepewności rozszerzonej pomiarów czułości dwójłomności na temperaturę i na odkształcenie badanych światłowodów wskazują, że pomiary czułości  $d\Delta n_G/d\epsilon$  charakteryzuje mniejsza niepewność pomiaru  $U_w(d\Delta n_G/d\epsilon) = 3,5\%$  w porównaniu z pomiarami czułości  $d\Delta n_G/dT$ , których niepewność względna wynosi  $U_r(d\Delta n_G/dT) = 5,0\%$ . Wynika to z obiektywnych trudności jakie występują w pomiarach charakterystyk temperaturowych światłowodów.

Oszacowanie niepewności obliczeń odkształceniowej czułości grupowej dwójłomności modowej, okresu widna interferometru, różnicy dróg optycznych modów polaryzacji światłowodu PM-1550-01, której wartości zamieszczono w tabeli 6.21, przeprowadzono na podstawie obliczonej niepewności dwójłomności grupowej tego światłowodu i niepewności odkształceniowej czułości przesunięcia widna interferometru z tym światłowodem. Względne niepewności tych czułości nie przekraczają 2,2%.

Wartość niepewności rozszerzonej pomiarów czułości  $d\Delta n_G/dT$  i czułości  $d\Delta n_G/d\epsilon$  nie różni się lub różni się nieznacznie w zależności od tego czy obliczana jest z wykorzystaniem czułości okresu widna na wymuszenie, czy czułości różnicy dróg optycznych modów polaryzacji na wymuszenie, zatem ze względu na prostsze obliczenia czułości dwójłomności grupowej na wymuszenie, wygodniej jest tym celu korzystać z czułości różnicy dróg optycznych modów polaryzacji na wymuszenie. Znak czułości okresu widna na wymuszenie wykorzystuje się do wyznaczenia znaku obliczonej czułości dwójłomności grupowej na wymuszenie.

Z analizy bilansu niepewności pomiaru czułości  $d\Delta n_G/dT$  i czułości  $d\Delta n_G/d\epsilon$  wynika, że decydujący udział w niepewności wypadkowej ma niepewność pomiaru czułości okresu widna i niepewność pomiaru czułości różnicy dróg optycznych modów polaryzacji na wymuszenie  $X$ . Zatem dla zmniejszenia niepewności pomiaru  $d\Delta n_G/dX$ , należy przede wszystkim zmniejszyć niepewność pomiaru czułości  $d\Lambda/dX$ , co można osiągnąć zwiększając liczbę punktów pomiarowych charakterystyki  $\Lambda = f(X)$  i utrzymywać stabilne parametry otoczenia stanowiska pomiarowego.

## 7. Podsumowanie

Rozwój technologii światłowodów fonicznych, a w szczególności klasy światłowodów przenoszących polaryzację jest nierozdzielnie związany z powstawaniem nowych i doskonaleniem istniejących metod i narzędzi pomiarowych przeznaczonych do badań ich właściwości. Niniejszą pracę poświęcono zagadnieniom wykorzystania światłowodowego interferometru pętlowego, jako narzędzia do pomiaru wielkości charakteryzujących właściwości dwójłomne światłowodów przenoszących polaryzację (ŚPP), w szczególności światłowodów fonicznych.

Światłowodowy interferometr pętlowy (ŚIP), należący do interferometrów dwuwiązkowych lub modowych, charakteryzuje prosty układ optyczny, niezależność od polaryzacji wiązki światła wejściowego i mała wrażliwość na wpływy otoczenia. Z tych względów jest wykorzystywany zarówno w telekomunikacji optycznej, jak i w sensoryce światłowodowej. ŚIP z 3-dB sprzęgaczem i pętlą ze światłowodu jednomodowego jest światłowodowym reflektorem (zwierciadłem), wykorzystywanym w budowie laserów światłowodowych i laserowych czujników światłowodowych, natomiast ze sprzęgaczem o współczynniku sprzężenia różnym od 0,5 może pełnić funkcję przełącznika optycznego.

ŚIP ze światłowodem przenoszącym polaryzację jest powszechnie stosowany w sensoryce światłowodowej, do budowy czujników pomiarowych wielu wielkości fizycznych i chemicznych, takich jak: odkształcenie, ciśnienie, temperatura, siła, kąt skręcenia, zginanie, parametry drgań, poziom cieczy, stężenie glukozy. Jest także stosowany jako dyskryminator długości fali, dla czujników pomiarowych ze światłowodowymi siatkami Bragga. Poza tym jest wykorzystywany jako filtr grzebieniowy dla systemów zwielokrotniania falowego w telekomunikacji optycznej.

Światłowodowy interferometr pętlowy był dotychczas stosowany jako narzędzie do pomiaru wielkości charakteryzujących właściwości dwójłomne światłowodów w ograniczonym zakresie, głównie w pomiarze ich dwójłomności. W szczególności, stosując odpowiednie jego modyfikacje, można mierzyć przy jego pomocy dwójłomność modową światłowodów o małej dwójłomności. Dla fonicznych ŚPP, których fazową dwójłomność modową można opisać zależnością potęgową, ŚIP umożliwia pomiar ich grupowej dwójłomności i na tej podstawie obliczenie ich fazowej dwójłomności. Dla konwencjonalnych ŚPP z dwójłomnością naprężeniową, dla których znany jest znak dwójłomności, umożliwia pomiar ich grupowej i fazowej dwójłomności modowej, gdyż wartość ich jest prawie takie same.

Przedstawione w pracy, opracowane przez autora, metody pomiaru parametrów dwójłomnych ŚPP i procedury rozszerzyły znacząco możliwości wykorzystania ŚIP, jako narzędzia do pomiaru wielkości charakteryzujących właściwości dwójłomne ŚPP.

W szczególności opracowano metody pomiaru czułości fazowej dwójłomności modowej i czułości grupowej dwójłomności modowej na temperaturę, odkształcenie względne i ciśnienie ŚPP, oraz procedury:

- obliczania czułości dwójłomności grupowej na wymuszenie ŚPP, dla przypadku zbyt małej czułości okresu widma interferometru na wymuszenie, aby można ją zmierzyć dostępnymi metodami,
- wyznaczania znaku dwójłomności grupowej ŚPP.

Autor, wykorzystując opracowane metody pomiaru i procedury, przeprowadził pomiary wielkości charakteryzujących właściwości dwójłomne światłowodów przenoszących polaryzację: konwencjonalnych z dwójłomnością naprężeniową Panda i Bow-tie oraz fotonicznych: dostępnego w handlu PM-1550-01 oraz dwóch rodzajów tych światłowodów, wytworzonych w Pracowni Technologii Światłowodów UMC w Lublinie, oznaczonych Blaze nano i Blaze mikro. Rezultaty tych pomiarów są zamieszczone w pracy. Wyniki pomiarów czułości dwójłomności fazowej i czułości dwójłomności grupowej na temperaturę, odkształcenie i ciśnienie światłowodów: Panda, Bow-tie oraz PM-1550-01 dobrze korespondują z wynikami pomiarów tych światłowodów uzyskanymi innymi metodami, przez innych autorów. Pomiary wielkości charakteryzujących właściwości dwójłomne światłowodów Blaze nano i Blaze mikro zostały wykonane dotychczas tylko przez autora.

Obliczona przez autora, względna niepewność pomiarów na poziomie ufności 0,95, wielkości określających właściwości dwójłomne światłowodów Panda, Bow-tie i PM-1550-01, przy zastosowanym w pomiarach optycznym analizatorze widma, mieści się w przedziale pojedynczych procentów. W szczególności niepewność ta, dla poszczególnych parametrów dwójłomnych tych światłowodów wynosi: dwójłomności grupowej i fazowej < 1%, czułości dwójłomności fazowej na: odkształcenie względne < 2,0%, ciśnienie < 2,5%, temperaturę < 8,0%, oraz czułości dwójłomności grupowej na: odkształcenie < 3,5%, temperaturę < 5,0%.

Z analizy bilansu obliczonej niepewności pomiarów parametrów dwójłomnych badanych światłowodów wynika, że decydujący udział w niepewności wypadkowej pomiaru:

- dwójłomności grupowej i fazowej, ma niepewność pomiaru okresu,
- czułości dwójłomności fazowej na wymuszenie, ma niepewność pomiaru czułości przesunięcia widma interferometru na wymuszenie,
- czułości dwójłomności grupowej na wymuszenie, ma niepewność pomiaru czułości okresu widma interferometru, lub niepewność czułości różnicy dróg optycznych modów polaryzacji w badanym światłowodzie na wymuszenie.

Niepewności pomiarów pozostałych wielkości, które są składnikami równań pomiaru parametrów dwójłomnych, mają udział pomijalnie mały. Ustalenia te, ukierunkowują działania mające na celu zmniejszenie niepewności pomiarów parametrów dwójłomnych ŚPP, opracowanymi metodami.

Do najważniejszych osiągnięć autora przedstawionych w niniejsze pracy należy zaliczyć:

1. Opracowanie metody pomiaru czułości fazowej dwójłomności modowej ŚPP na temperaturę, odkształcenie względne i ciśnienie. W metodzie wykorzystuje się przesunięcie widma transmisyjnego interferometru pętlowego z badanym światłowodem, wywołane działaniem na ten światłowód jednej z powyższych wielkości.

Wyznaczenie równań pomiaru czułości dwójłomności fazowej na wymuszenie.

2. Opracowanie metody pomiaru czułości grupowej dwójłomności modowej ŚPP na temperaturę, odkształcenie względne i ciśnienie. W metodzie wykorzystuje się zmianę okresu widma transmisyjnego interferometru pętlowego z badanym światłowodem, spowodowaną działaniem na ten światłowód jednej z powyższych wielkości.

Wyznaczenie równań pomiaru czułości dwójłomności grupowej na wymuszenie.

3. Opracowanie procedury obliczania czułości grupowej dwójłomności modowej ŚPP na wielkość zewnętrzną. W procedurze korzysta się z dwójłomności grupowej badanego światłowodu i czułości przesunięcia widma interferometru pętlowego z tym światłowodem, na wielkość zewnętrzną. Wielkości te uzyskuje się z pomiarów. Z procedury korzysta się w przypadku, gdy czułość okresu widma interferometru na wymuszenie jest zbyt mała, aby można dokonać jej pomiaru dostępnymi metodami.

4. Opracowanie procedury wyznaczania znaku dwójłomności grupowej ŚPP. Procedura bazuje na obserwacji zmian okresu widma interferometru pętlowego podczas dołączania do jego światłowodu o znanym znaku dwójłomności grupowej, światłowodu o nieznanym znaku tej dwójłomności. Światłowody łączy się zgodnie z ich osiami polaryzacji. Procedura umożliwia wykorzystanie interferometru pętlowego do pomiaru dwójłomności grupowej ŚPP.

5. Wyznaczenie zależności wiążącej czułość przesunięcia widma interferometru pętlowego na wymuszenie działające na jego ŚPP, z czułością polarymetryczną tego światłowodu na wymuszenie. Pozwala to porównywać wyniki pomiarów parametrów dwójłomnych ŚPP uzyskane z wykorzystaniem interferometru pętlowego z rezultatami pomiarów tych parametrów otrzymanymi innymi metodami.

6. Przeprowadzenie pomiarów parametrów dwójłomnych ŚPP: konwencjonalnych z dwójłomnością naprężeniową i fonicznych, w których wykorzystano opracowane metody pomiaru i procedury oraz wykonanie oceny niepewności tych pomiarów. Pozwoliło to potwierdzić przydatność opracowanych metod w praktyce pomiarowej, oraz ustalić ich właściwości metrologiczne.

Do zalet opracowanych metod pomiarowych, które wynikają z właściwości ŚPP, należy zaliczyć: prostotę układu optycznego, jego w pełni światłowodową budowę, małą wrażliwość na wpływy otoczenia, łatwość wykonywania pomiarów, dokładność nie gorsza niż dokładność metod pomiaru bazujących na

interferometrze polarymetrycznym. Pewnym ograniczeniem światłowodowego interferometru pętlowego jako narzędzia do pomiaru dwójłomnych parametrów światłowodów, jest brak możliwości pomiaru dwójłomności fazowej wszystkich rodzajów ŚPP.



## Bibliografia

1. J. C. Knight, T. A. Birks, S. J. Russell, D. M. Atkin, „All-silica single mode optical fiber with photonic crystal cladding”, *Optics Letters*, vol. 21, nr 19, s. 1547–1549, 1996.
2. R. F. Cregan, B. J. Mangan, J. C. Knight, T. A. Birks, P. S. Russell, P. J. Robers, D. C. Allan, „Single-mode, photonic band gap guidance of light in air”, *Science*, vol. 285, s. 1537–1539, 1999.
3. A. Ortigosa-Blanch, J. C. Knight, W. J. Wadsworth, J. Arriaga, B. J. Mangan, T. A. Birks, P. St. J. Russell, „Highly birefringent photonic crystal fibers”, *Optics Letters* vol. 25, nr 18, s. 1325–1327, 2000.
4. T. Nasiłowski i inni, „Sensing applications of photonic crystal fibres”, *Mat. X Konferencji Światłowody i ich zastosowania*, Tom I, s. 21–42, Krasnobród, 2006.
5. A. M. R. Pinto, M. Lopez-Amo, „Photonic crystal fiber for sensing applications”, *Journal of Sensors*, vol. 20112, Article ID 598178, stron 21, 2012.
6. B. Amin i inni, „Photonic crystal fibers for sensing applications”, *Journal of Biosensors & Bioelectronics*, vol. 9, nr 1, s. 1–7, 2018.
7. R. Jóźwicki, *Podstawy inżynierii fotonicznej*, Warszawa: Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2006.
8. R. S. Romaniuk, *Miernictwo światłowodowe*, Warszawa: Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2001.
9. R. S. Romaniuk, *Światłowody nitelekomunikacyjne*, s. 63–207, Red.: J. Mroczka, *Problemy metrologii elektronicznej i fotonicznej* 5, Wrocław: Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2012.
10. W. J. Bock, W. Urbańczyk, M. Fontaine, „Characterization of highly birefringent optical fibers using interferometric techniques”, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 46, nr 4, s. 903–907, 1997.
11. G. Statkiewicz, T. Martynkien, W. Urbańczyk, „Measurement of modal birefringence polarimetric sensitivity of the birefringent holey fiber to hydrostatic pressure and strain”, *Optics Communications*, vol. 241, s. 339–348, 2004.
12. P. Hlubina, D. Ciprian, „Spectral-domain measurement of phase modal birefringence in polarization-maintaining fiber”, *Optics Express*, vol. 15, nr 25, s. 17019–17024, 2007.
13. M. Szpulak, G. Statkiewicz, J. Olszewski, T. Martynkien, W. Urbańczyk, J. Wójcik, M. Makara, J. Klimek, T. Nasiłowski, F. Berghmans, H. Thienpot, „Experimental and theoretical investigations of birefringent

- holey fibers with a triple defect”, *Applied Optics*, vol. 44, nr 13, s. 2652–2658, 2005.
14. C-L. Zhao, X. Yang, C. Lu, W. Jin, M. S. Demokan, „Temperature-insensitive interferometer using a highly birefringent photonic crystal fiber loop mirror”, *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 16, nr 11, s. 2535–2537, 2004.
  15. C. Kaczmarek, „Uncertainty of the Sagnac interferometer-based measurement of the modal birefringence of polarization maintaining fibers”, *Optica Applicata*, vol. XLII, nr 4, s. 875–885, 2012.
  16. A. A. Ortigosa-Blanch, A. Diez, M. Delgado-Pinor, J. L. Cruz, M. V. Anders, „Ultrahigh birefringent nonlinear microstructured fiber”, *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 16, nr 7, s. 1667–1669, 2004.
  17. T. Martynkien, W. Urbańczyk, W. Bock, „Spectral dependence of sensitivity of highly birefringent fibers to temperature, elongation and hydrostatic pressure”, *Optik*, vol. 111, nr 3, s. 97–102, 2000.
  18. P. Hlubina, J. Olszewski, T. Martynkien, P. Mergo, M. Makara, K. Poturaj, W. Urbańczyk, „Spectral-domain measurement of strain sensitivity of a two-mode birefringent side-hole fiber”, *Sensors*, vol. 12, s. 12070–12081, 2012.
  19. P. Hlubina, T. Martynkien, J. Olszewski, P. Mergo, M. Makara, K. Poturaj, W. Urbańczyk, „Spectral-domain measurements of birefringence and sensing characteristics of side-hole microstructured fiber”, *Sensors*, vol. 13, s. 11424–11438, 2013.
  20. D. H. Kim, and J.U. Kang, „Sagnac loop interferometer based on polarization maintaining photonic crystal fiber with reduced temperature sensitivity”, *Optics Express*, vol. 12, nr 19, s. 4490–4495, 2004.
  21. C. Kaczmarek, „Measurement of the temperature sensitivity of modal birefringence of polarization maintaining fibers using a Sagnac interferometer”, *IEEE Sensors Journal*, vol. 16, nr 10, s. 3672–3682, 2016.
  22. T. Martynkien, G. Statkiewicz, M. Szpulak, J. Olszewski, G. Golojuch, W. Urbańczyk, J. Wójcik, P. Mergo, M. Makara, T. Nasilowski, F. Bergmans, H. Thienpont, „Measurement of polarimetric sensitivity to temperature in birefringent holey fibres”, *Measurement Science and Technology*, vol. 18, s. 3055–3060, 2007.
  23. G. P. Agrawal, *Fiber-optic communications systems*, Third edition, New York, Wiley-Interscience, 2002.
  24. F. Ratajczak, *Dwójłomność i polaryzacja optyczna*, Wrocław, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2000.
  25. M. Born, E. Wolf, *Principles of optics*, Cambridge, Cambridge University Press, 1999.

26. E. Udd, *Fiber optic sensors, An introduction for engineers and scientists*, New York, Wiley-Interscience, 1991.
27. I. P. Kaminow, „Polarization in optical fibers”, *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 17, nr 1, s. 15–22, 1981.
28. M. Szustakowski, *Elementy światłowodowe*, Warszawa, Wydawnictwo Naukowo Techniczne, 1992.
29. T. Ritari, H. Ludvigsen, M. Wegmuller, M. Legre, N. Gisin, J. R. Folkenberg, M. D. Nielsen, „Experimental study of polarization properties of highly birefringent crystal fibers”, *Optics Express*, vol. 12, nr 24, s. 5931–5939, 2004.
30. T. Martynkien, A. Anyszkiewicz, G. Statkiewicz-Barabach, J. Olszewski, G. Golojuch, M. Szczurowski, W. Urbańczyk, J. Wójcik, P. Mergo, M. Makara, T. Nasilowski, F. Berghmans, H. Thienpont, „Birefringent photonic crystal fibers with zero polarimetric sensitivity to temperature”, *Applied Physics B*, vol. 94, s. 635–640, 2009.
31. C. Kaczmarek, „Spectral-domain measurement of the strain sensitivity of phase modal birefringence of polarization-maintaining optical fibers”, *Optics Communications*, vol. 375, s. 43–48, 2016.
32. A. Miche, J. Canning, K. Lyytikainen, M. Aslund, J. Digweed, „Temperature independent highly birefringent photonic crystal fibre”, *Optic Express*, vol. 12, nr 21, s. 5160–5165, 2004.
33. C. Kaczmarek, „Spectral-domain measurement of the temperature sensitivity of group modal birefringence of polarization-maintaining optical fibers”, *Optical Fiber Technology*, vol. 47, s. 33–37, 2019.
34. C. Kaczmarek, W. Wójcik, „Measurement of pressure sensitivity of modal birefringence of birefringent optical fibers using a Sagnac interferometer”, *Optica Applicata*, vol. XLV, nr 1, s. 5–14, 2015.
35. K. Suzuki, H. Kubota, S. Kawanishi, M. Tanaka, M. Fujita, „Optical properties of a low-loss polarization-maintaining photonic crystal fiber”, *Optics Express*, vol. 9, nr 13, s. 676–680, 2001.
36. T. P. Hansen, J. Broeng, S. E. B. Libori, E. Knudsen, A. Bjarklev, J. R. Jensen, H. Simonsen, „Highly birefringent index-guiding photonic crystal fibers”, *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 15, nr 6, s. 588–590, 2001.
37. P. St. J. Russel, „Photonic-crystal fibers”, *IEEE Journal of Lightwave Technology*, vol. 24, nr 12, s. 4729–4749, 2006.
38. B. J. Eggleton, C. Kerbage, P. S. Westbrook, R. S. Windeler, A. Hale, „Microstructured optical fiber devices”, *Optics Express*, vol. 9, nr 13, s. 698–713, 2006.

39. O. Frazao, J. L. Santos, F. M. Araujo, L. A. Ferreira, „Optical sensing with photonic crystal fibers”, *Laser Photonics Reviews*, vol. 2, nr 6, s. 449–459, 2008.
40. T. Martynkien, G. Statkiewicz-Barabach, J. Olszewski, J. Wójcik, P. Mergo, T. Geernaert, C. Sonnenfeld, A. Anuszkiewicz, M. K. Szczurowski, K. Tarnowski, M. Makara, K. Skorupski, J. Klimek, K. Poturaj, W. Urbańczyk, T. Nasilowski, F. Berghmans, H. Thienpont, „Highly birefringent microstructured fibers with enhanced sensitivity to hydrostatic pressure”, *Optics Express*, vol. 18, nr 14, s. 15113–15121, 2010.
41. H. M. Xie, P. Dabkiewicz, R. Ulrich, K. Okamoto, „Side-hole fiber-optic pressure sensing” *Optics Letters*, vol. 11, nr 5, s. 333–335, 1986.
42. M. N. Charasse, M. Turpin, J. P. LePasant, „Dynamic pressure sensing with a side-hole birefringent optical fiber”, *Optics Letters*, vol. 16, nr 13, s. 1043–1045, 1991.
43. C. Wu, J. Li, X. Feng, B. O. Guan, H. Y. Tam, „Side-hole photonic crystal fiber with ultrahigh polarimetric pressure sensitivity”, *IEEE Journal of Lightwave Technology*, vol. 29, nr 7, s. 943–948, 2011.
44. M. Szpulak, T. Martynkien, W. Urbańczyk, „Highly birefringent photonic crystal fibre with enhanced sensitivity to hydrostatic pressure”, *Proceedings of 8th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, vol. 4, s. 174–177, 2006.
45. B. J. Eggleton, P. S. Westbrook, R. S. Windeler, S. Spstter, T. A. Strasser, „Grating resonances in air-silica microstructured optical fibers”, *Optics Letters*, vol. 24, nr 21, s. 1460–1462, 1999.
46. N. Groothoff, J. Canning, E. Buckley, K. Lyttikainen, J. Zagai, „Bragg grating in air-silica structured fibers”, *Optics Letters*, vol. 28, nr 4, s. 233–235, 2003.
47. G. D. Marshall, D. J. Kann, A. A. Asatryan, L. C. Botton, M. J. Withford, „Transverse coupling to the core of a photonic crystal fiber: the photo-inscription of gratings”, *Optics Express*, vol. 15, nr 12, s. 7876–7887, 2007.
48. T. Geernaert i inni, „Fiber Bragg grating in germanium-doped highly birefringent microstructured optical fibers”, *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 20, nr 8, s. 554–556, 2008.
49. B. O. Guan, D. Chen, Y. Zhang, H. J. Wang, H. Y. Tam, „Bragg gratings in pure-silica polarization maintaining photonic crystal fiber”, *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 20, nr 23, s. 1980–1982, 2008.

50. C. Francia, F. Bruyere, J. P. Thiery, D. Pennineckx, „Simple dynamic polarisation-mode dispersion compensator”, *Electronics Letters*, vol. 35, nr 5, s. 414–415, 1999.
51. M. Y. A. Raja, S. K. Arabasi, „Design and simulation of a dynamic polarization-mode dispersion compensator for long-haul optical networks”, *Optics Express*, vol. 11, nr 10, s. 1166–1174, 2003.
52. S. Lanne, E. Corbel, „Practical considerations for optical polarization-mode dispersion compensators”, *IEEE Journal Lightwave Technology*, vol. 22, nr 4, s. 1033–1040, 2004.
53. W. Eickhoff, O. Krumpholz, „Determination of the ellipticity of monomode glass fibres from measurements of scattered light intensity”, *Electronics Letters*, vol. 12, nr 16, s. 405–406, 1976.
54. R. Calvani, R. Copi, F. Cisternino, „Polarization measurements on single mode fibers”, *Journal of Lightwave Technology*, vol. 7, nr 8, s. 1187–1196, 1989.
55. M. Nakazawa, T. Horiguchi, M. Tokuda, N. Uchida, „Polarization beat length measurement in a single-mode optical fibre by backward Rayleigh scattering”, *Electronics Letters*, vol. 17, nr 15, s. 513–515, 1981.
56. B. Huttner, J. Reecht, N. Gisin, R. Passy, J. P. Von der Weid, „Local birefringence measurements in single-mode fibers with coherent frequency-domain reflectometry”, *Photonics Technology Letters*, vol. 10, nr s. 1458–1460, 1998.
57. M. Wegmuller, M. Legre, N. Gisin, „Distributed beat length measurement in single-mode fibers with optic frequency-domain reflectometry”, *IEEE Journal of Lightwave Technology*, vol. 20, nr 5, s. 828–835, 2002.
58. P. G. Zhang, D. I. Halliday, „Measurement of the beat length in high-birefringent optical fiber by way of magneto-optic modulation”, *IEEE Journal of Lightwave Technology*, vol. 12, nr 4, s. 597–602, 1994.
59. K. Takada, J. Noda, R. Ulrich, „Precision measurement of modal birefringence of highly birefringent fibers by periodic lateral force”, *Applied Optics*, vol. 24, nr 24, s. 4387–4391, 1985.
60. T. R. Woliński, P. Lesiak, K. Szaniawska, A. W. Domański, J. Wójcik, „Polarization mode dispersion in birefringent microstructured fibers”, *Optica Applicata*, vol. XXXIV, nr 4, s. 541–549, 2004.
61. P. Hlubina, „White-light spectral interferometry to measure intermodal dispersion in two-mode elliptical-core optical fibers”, *Optics Communications*, vol. 218, s. 283–289, 2003.
62. P. Hlubina, T. Martynkien, W. Urbańczyk, „Dispersion of group and phase modal birefringence in elliptical-core fiber measured by white-light

- spectral interferometry”, *Optics Express*, vol. 11, nr 22, s. 2793–2798, 2003.
63. P. Williams „PMD measurement techniques and how to avoid pitfalls”, *Journal of Optical and Fiber Communications Reports*, nr 1, s. 84–105, 2004.
  64. B. L. Heffner, „Automated measurement of polarization mode dispersion using Jones matrix eigenanalysis”, *Photonics Technology Letters*, vol. 4, nr s. 1066–1069, 1992.
  65. Y. Namihira, T. Kawazawa, H. Wakabayashi, „Polarization mode dispersion measurements in 1520 km EDFA system”, *Electronics Letters*, vol. 28, nr 9, s. 881–883, 1992.
  66. K. Mochizuki, Y. Namihira, W. Wakabayashi, „Polarization mode dispersion measurements in long single mode fibera”, *Electronics Letters*, vol. 17, nr 4. s. 153–154, 1981.
  67. Y. Namihira, Y. Horiuchi, K. Mochizuki, H. Wakabayashi, „Polarization mode dispersion in an installed optical fiber submarine cable”, *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 1, nr 10, s. 329–331, 1989.
  68. R. B. Dyott, *Elliptical fiber waveguides*, Norwood, Artech House, 1995.
  69. M. Fontaine, B. Wu, V. P. Tzolov, W. J. Bock, W. Urbańczyk, „Theoretical and experimental analysis of thermal stress effects on modal polarization properties of highly birefringent optical fibers”, *IEEE Journal of Lighwave Technology*, vol. 6, nr 7, s. 1217–1224, 1988.
  70. D. B. Mortimore, „Fiber loop reflectors”, *Journal of Lighwave Technology*, vol. 6, nr 7, s. 1217–1224, 1988.
  71. N.J. Doran, D. Wood, „Nonlinear-optical loop mirror”, *Optics Letters*, vol. 13, nr 1, s. 56–58, 1988.
  72. J. D. Moores, K. Bergman, H. A. Haus, F. P. Ippen, „Optical switching using fiber ring reflectors”, *Journal of the Optical Society of America B*, vol. 8, nr 3, s. 594–601, 1991.
  73. P. Urquhart, „Fiber lasers with loop reflectors”, *Applied Optics*, vol. 28, nr 17, s. 3759–3767, 1989.
  74. X. Yag, S. Luo, Z. Chen, J. H. Ng, C. Lu, „Fiber Bragg grating strain sensor based on fiber laser” *Optics Communications*, vol. 271, s. 203–206, 2007.
  75. C. Kaczmarek, „Światłowodowy czujnik laserowy odkształcenia z siatką Bragga”, *Pomiary Automatyka Kontrola*, vol. 56, nr 9, s. 519–521, 2010.
  76. O. Xu, S. Lu, S. Fong, S. Jian, „A novel fiber-laser-based fiber Bragg grating strain sensor with high-birefringence Sagnac fiber loop mirror” *Chinese Optics Letters*, vol. 6, nr 11, s. 818–820, 2008.

77. C. Kaczmarek, „Laserowy czujnik odkształcenia ze światłowodową siatką Bragga i zwierciadłem pętlowym o zmiennym współczynniku odbicia”, *Pomiary Automatyka Kontrola*, vol. 56, nr 6, s. 1071–1073, 2010.
78. L. R. Jaroszewicz, *Rola polaryzacji i spójności w interferometrii światłowodowej*, Warszawa, Wojskowa Akademia Techniczna, 1995.
79. V. Vali and R. V. Shorthill, „Fiber ring interferometer”, *Applied Optics*, vol. 15, nr 5, s. 1099–1100, 1976.
80. S.Oho, H. Kajioka T. Sasayama, „Optical fiber gyroscope for automotive navigation” *IEEE Transaction on Vehicular Technology*, vol. 44, nr 3, s. 698–705, 1995
81. K. Hotate, „Fiber sensor technology today. Invited paper”, *Optical Fiber Technology*, nr 3, s. 356–402, 1997.
82. B.Singh, H. Rana, S. Kumar, P. Bhulania, G. Monocha, „A novel design of fiber optic gyroscope based INS system for UAS applications”, *Procedia Computer Science*, vol. 57, s. 1317–1323, 2015.
83. N. Song, w. Cai, J. Song, J. Jin, C. Wu, „Structure optimization of small-diameter polarization-maintaining microstructured optical fiber for mini coil of space borne miniature fiber-optic gyroscope”, *Applied Optics*, vol. 54, nr 33, s. 9838–9838, 2015.
84. P. A. Nicati and P. Robert, „Stabilized current sensor using a Sagnac interferometer”, *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, vol. 21, nr 8, s. 791–796, 1988.
85. K. Bohnert, P. Gabus, J. Nehring, H. Bradle, „Temperature and vibration insensitive fiber-optic current sensor,,,” *IEEE Journal of Lightwave Technology*, vol. 20, nr 2, s. 267–276, 2002.
86. M. J. Blake, P. Tantaswadi, R. T. D. Carvalho, „In-line Sagnac interferometer current sensor”, *IEEE Transaction Power Delivery*, vol 11, nr 1, s. 116–121, 1996.
87. K. Bohnert, P. Gabus, J. Nehring, H. Brandel M. G. Brunzel, „Fiber-optic current sensor for elektrowinning of metals”, *Journal of Lightwave Technology*, vol. 25, nr 11, s. 3602–3609, 2007.
88. S. Ziegler, R. C. Woodward, H. H-C, Iu, L. J. Borle, „Current sensing techniques: a review”, *IEEE Sensors Journal*, vol. 9, nr 4, s. 354–376, 2009.
89. X. Fang R. O. Claus, „Polarization-independent all-fiber wavelength-division multiplexer based on a Sagnac interferometer”, *Optics Letters*, vol. 20, nr 20, s. 2146–2148, 1995
90. J.Villatoro, V. Finazzi, G. Badenes, V. Pruneri, „Highly sensitive sensors based on photonic crystal fiber modal interferometers”, *Journal of Sensors*, vol. 2009, ID 747803, s. 11, 2009.

91. C. Kaczmarek, „Compact PCF modal interferometer for sensor applications built by splicing”, *Proc. SPIE* vol. 9228, (92280R), 2014.
92. H. Y. Choi, M. J. Kim, B. H. Lee, „All-fiber Mach-Zehnder interferometers formed in photonic crystal fibers”, *Optics Express*, vol. 15, nr 9, 5711–5720, 2007
93. C. Kaczmarek, „Property of a fiber optic strain sensor in the configuration of a Mach-Zehnder modal interferometer with a polarization maintaining photonic crystal fiber”, *Metrology and Measurement System*, vol. 25, nr 2, s. 417–424, 2018.
94. J. H. Lim, H. S. Jang, K. S. Lee, C. J. Kim, B. H. Lee, „Mach-Zehnder interferometer formed in a photonic crystal fiber based on a pair of long-period fiber gratings”, *Optics Letters*, vol. 29, nr 4, s. 346–348, 2004.
95. O. Frazao, J. M. Baptista, J. L. Santos, „Temperature-independent strain sensor based on a Hi-Bi photonic crystal fiber loop mirror”, *IEEE Sensors Journal*, vol. 7, nr 10, s. 1453–1455, 2007.
96. X. Dong, H. Y. Tam, P. Shum, „Temperature-insensitive strain sensor with polarization-maintaining photonic crystal fiber based Sagnac interferometer”, *Applied Physics Letters*, vol. 90, s. 151113, 2007.
97. C. Kaczmarek, „Fiber optic strain sensor based on the Sagnac interferometer with a birefringent photonic crystal fiber”, *Przegląd elektrotechniczny* vol. 88, nr 11B, s. 288–290, 2012.
98. B. Gu, W. Yuan, S. He, O. Bang, „Temperature compensated strain sensor based on cascaded Sagnac interferometers and all-solid birefringent hybrid photonic crystal fibers”, *IEEE Sensors Journal*, vol. 12, nr 6, s. 1641–1646, 2012.
99. T. K. Noh, U. C. Rya, Y. W. Lee, „Compact and wide range polarimetric strain sensor based on polarization-maintaining photonic crystal fiber” *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 213, s. 89–93, 2014.
100. H. Y. Fu, H. Y. Tam, L. Y. Shao, X. Dong, P. K. A. Wai, C. Lu, S. K. Khijwania, „Pressure sensor realized with polarization-maintaining photonic crystal fiber-based Sagnac interferometer”, *Applied Optics*, vol. 47, nr 15, s. 2835–2839, 2008.
101. H. Y. Fu, C. Wu, M. I. V. Tse, L. Zhang, K. C. D. Cheng, H. Y. Tam, B. O. Guan, C. Lu, „High pressure sensor based on photonic crystal fiber for downhole application”, *Applied Optics*, vol. 49, nr 14, s. 2639–2643, 2010.
102. C. Kaczmarek, „Właściwości światłowodowego czujnika ciśnienia zbudowanego w układzie interferometru Sagnaca z dwójłonnym światłowodem fotonicznym”, *Pomiary Automatyka Kontrola*, vol. 59, nr 4, s. 292–294, 2013.

103. L. H. Cho, C. Wu, C. Lu, H. Y. Tam, „A highly sensitive and low-cost Sagnac loop based pressure sensor”, *IEEE Sensors Journal*, vol. 13, nr 8, s. 3073–3078, 2013.
104. C. Kaczmarek, W. Wójcik, M. Junisbekow, „Photonic crystal fiber dynamic pressure sensor, 2018 XV International Scientific Conference on Optoelectronic and Electronic Sensors (COE), s. 1–4. 2018, IEEE Conferences.
105. A. N. Starodumov, L. A. Zentano, D. Monzon, E. De la Rosa, „Fiber Sagnac interferometer temperature sensor”, *Applied Physics Letters*, vol. 70, s. 19–21, 1997.
106. O. Frazão, L. M. Marques, S. Santos, J. M. Baptista, J. L. Santos, „Simultaneous measurement for strain and temperature based on a long-period grating combined with a high-birefringence fiber loop mirror,” *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 18, nr 22, s. 2407–2409, 2006.
107. O. Frazao, J. M. Baptista, J. L. Santos, „Strain and temperature discrimination using concatenated Hi-Bi fiber loop mirrors”, *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 19, nr 16, s. 1260–1262, 2007.
108. J. Shi, Y. Wang, D. Xu, H. Zhang, G. Su, L. Duan, C. Yan, D. Yan, S. Fu, J. Yao, „Temperature sensor based on fiber ring laser with Sagnac loop”, *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 28, nr 7, s. 7794–797, 2016.
109. C. Kaczmarek, „Światłowodowy czujnik siły bazujący na interferometrize Sagnaca z dwójłomnym światłowodem fotonicznym”, *Elektronika; technologie, konstrukcje, zastosowania*, nr 11, s. 67–69, 2012.
110. H. M. Kim, T. H. Kim, B. Kim, Y. Chung, „Temperature-insensitive torsion sensor with enhanced sensitivity by use of a highly birefringent photonic crystal fiber”, *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 22, nr 20, s. 1539–1541, 2010.
111. O. Frazao, R. M. Silva, J. Kobelke, K. Schuster, „Temperature and strain-independent torsion sensor using a fiber loop mirror based on suspended twin-core fiber”, *Optics Letters*, vol. 35, nr 16, s. 2777–2779, 2010.
112. P. Zu, C. C. Chan, Y. Jin, T. Gong, Y. Zhang, L. H. Chen, X. Dong, „A temperature-insensitive twist sensor by using low-birefringence photonic crystal fiber based Sagnac interferometer”, *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 23, nr 13, s. 920–922, 2011.
113. R. M. Andre, M. B. Marques, P. Mergo, O. Frazao, „Large range linear torsion sensor based on a suspended-core fiber loop mirror”, *Optical Engineering Letters*, vol. 52, nr 2, s. 020501-1–020501-3, 2013.
114. O. Frazao, J. M. Baptista, J. L. Santos, and P. Roy, „Curvature sensor a highly birefringent photonic crystal fiber with two asymmetric hole

- regions in a Sagnac interferometer” *Applied Optics*, vol. 47, nr 13, 2520–2523, 2008.
115. J. Kang, X. Dong, Y. Zhu, S. Jin, S. Zhung, „A fiber strain and vibration sensor based on high birefringence polarization maintaining fiber”, *Optics Communications*, vol. 322, s. 105–108, 2014.
  116. D. Bo, Z. Qida, L. Feng, G. Tuan, X. Lifang, L. Shuhong, G. Hong, „Liquid-level sensor with a high-birefringence-fiber loop mirror”, *Applied Optics*, vol. 45, nr 30, s. 7767–7771, 2006.
  117. G. An, S. Li, Y. An, W. Wang, X. Zhang, „Glucose sensor realized with photonic crystal fiber-based Sagnac interferometer”, *Optics Communications*, vol. 405, s. 143–146, 2017.
  118. T. Kumagi, y. Tottori, R. Miyata, H. Kajioka, „Glucose sensor with Sagnac interference optical system”, *Applied Optics*, vol. 53, nr 4, s. 720–726, 2014.
  119. S. Chung, J. Kim, B. A. Yu, B. Lee, „A finer Bragg grating sensor demodulation technique using a polarization maintaining fiber loop mirror”, *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 23, nr 12, s. 1343–1345, 2001.
  120. C. Kaczmarek, „Optical fiber discriminator based on a Sagnac loop with a birefringent fiber”, *Przegląd Elektrotechniczny*, vol. 87, nr 10, s. 325–327, 2011.
  121. X. Yang, C. L. Zhao, Q. Peng, X. Zhou, C. Lu, „FBG sensor interrogation with high temperature insensitivity by using a Hi-Bi\_PCF Sagnac loop filter”, *Optics Communications*, vol. 250, s. 63–68, 2005.
  122. C. Kaczmarek, „Fiber optic Sagnac loop with a polarization maintaining photonic crystal fiber as an optical wavelength demodulator for fiber Bragg grating sensors”, *Przegląd Elektrotechniczny*, vol. 88, nr 6, s. 201–204, 2012.
  123. N. J. C. Libatique R. K. Jain, „A broadly tunable wavelength-selectable WDM source using a fiber Sagnac loop filter”, *IEEE Photonic Technology Letters*, vol. 13, nr 12, s. 1283–1285, 2001.
  124. D. Monzon-Hernandes, A. N. Starodumov, A. R. Boyain Goitia, V. N. Filipov, V. P. Minkovich, P. Gavrilovic, „Stress distribution and birefringence measurement in double-clad fiber”, *Optics Communications*, vol. 170, s. 241–246, 1999.
  125. N. Issa, M. A. van Eijkelenborg, M. Fellew, F. Cox, G. Henry M. C. J. Large, „Fabrication and study of microstructured optical fibers with elliptical holes”, *Optics Letters*, vol. 29, s. 1336–1338, 2004.

126. M. Szpulak, T. Martynkien, W. Urbańczyk, „Effects of hydrostatic pressure on phase and group birefringence in microstructured holey fibers”, *Applied Optics*, vol. 43, nr 24, s. 4739–4744, 2004.
127. E. A. Kuzin, J. M. E. Estgillo, B. I. Escamilla, J. W. Haus, „Measurements of beat length in short low-birefringence fibers”, *Optics Letters*, vol. 26, nr 15, s. 1134–1136, 2001.
128. C. Kim, Y. Han, R. M. Sova, U. Paek, Y. Chung J. U. Kang, „Optical fiber modal birefringence measurement based on Lyot-Sagnac interferometer”, *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 15, nr 2, s. 269–271, 2003.
129. M. Lisowski, *Metody przybliżone obliczania niepewności pomiarów pośrednich*, Red.; P. Fotowicz, S. Kubisa, S. Moskowicz, D. Sochocka, *Niepewność pomiarów w teorii i praktyce*, Warszawa: Główny Urząd Miar, 2011.
130. *Wyrażanie niepewności pomiaru*. Przewodnik, Warszawa: Główny Urząd Miar, 1999.
131. T. Martynkien, W. Urbańczyk, W. J. Bock, „Dependence of sensitivity to hydrostatic pressure and temperature upon constructional parameters in elliptical core highly birefringent fibers”, *Optics Communications*, vol. 2011, s. 95–102, 2002.
132. A. Zięba, *Analiza danych w naukach ścisłych i technice*, Warszawa, Wydawnictwo Naukowe PWN, 2013.