

Periodyczne struktury światłowodowe
w optoelektronicznych czujnikach
do pomiaru wybranych wielkości
nieelektrycznych

Monografie – Politechnika Lubelska



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

Piotr Kisała

Periodyczne struktury światłowodowe w optoelektronicznych czujnikach do pomiaru wybranych wielkości nieelektrycznych



Politechnika Lubelska
Lublin 2012

Recenzenci:

prof. dr hab. inż. Zdzisław Kaczmarek, Politechnika Świętokrzyska
dr hab. inż. Andrzej Kotyra, prof. Politechniki Lubelskiej

Redakcja i skład: Piotr Kisała

Publikacja wydana za zgodą Rektora Politechniki Lubelskiej

© Copyright by Politechnika Lubelska 2012

ISBN: 978-83-63569-17-4

Wydawca: Politechnika Lubelska

ul. Nadbystrzycka 38D, 20-618 Lublin

Realizacja: Biblioteka Politechniki Lubelskiej

Ośrodek ds. Wydawnictw i Biblioteki Cyfrowej

ul. Nadbystrzycka 36A, 20-618 Lublin

tel. (81) 538-46-59, email: wydawca@pollub.pl

www.biblioteka.pollub.pl

Druk: TOP Agencja Reklamowa Agnieszka Łuczak

www.agencjatop.pl

Elektroniczna wersja książki dostępna w Bibliotece Cyfrowej PL www.bc.pollub.pl

Nakład: 100 egz.

Spis treści

Wykaz ważniejszych oznaczeń	7
1. Wstęp	9
2. Optoelektroniczne czujniki odkształcenia - niewrażliwe na zmiany temperatury	17
2.1. Uwarunkowania równań macierzowych układów z siatkami Bragga dla jednoczesnego pomiaru odkształcenia i temperatury	23
2.2. Równoczesny pomiar odkształcenia i temperatury z wykorzystaniem dwóch jednorodnych siatek Bragga	26
2.3. Wykorzystanie właściwości siatki długookresowej	32
2.4. Układy oparte na parze siatek długookresowych (LPGP)	38
2.5. Wykorzystanie sposobu umieszczenia czujnika oraz właściwości światłowodu do budowy czujników odkształcenia i temperatury	44
2.6. Tworzenie chirpu strefowego w FBG jako sposób na uzyskanie 2-funkcyjności czujnika	55
2.7. Układy interferometru światłowodowego wykorzystujące światłowodowe siatki Bragga	67
2.8. Wykorzystanie właściwości propagacyjnych modu rdzeniowego i modów płaszczowych	79
3. Równoczesny pomiar siły i temperatury przy pomocy czujników optoelektronicznych	83
3.1. Analiza uwarunkowań mechanicznych dla równoczesnych pomiarów siły i temperatury	84
3.2. Układy czujników siły i temperatury ze światłowodowymi siatkami Bragga	90
3.3. Jednoczesny pomiar składowej siły zginającej i temperatury czujnikami z siatkami jednorodnymi	106
4. Optoelektroniczne czujniki niejednorodnego naprężenia nieczułe na temperaturę	129
4.1. Wielopunktowy pomiar naprężenia i temperatury	129
4.2. Idea pomiaru niejednorodnego naprężenia oraz temperatury	130

4.3. Algorytm wyznaczania maksymalnego naprężenia i temperatury przy wykorzystaniu czujnika optoelektronicznego i metody gradientów sprzężonych	132
4.4. Model czujnika do równoczesnego pomiaru temperatury i maksymalnej wartości naprężenia niejednorodnego	135
4.5. Implementacja metody pomiaru niejednorodnego naprężenia i temperatury	141
5. Czujniki rozkładu naprężenia nieczułe na temperaturę.	146
5.1. Sformułowanie równania całkowego Fredholma pierwszego rodzaju przy rekonstrukcji rozkładu naprężenia i temperatury	147
5.2. Budowa i walidacja modelu czujnika rozkładu naprężenia nieczułego na zmiany temperatury	150
5.3. Rozwiązywanie problemu odwrotnego dla pomiaru temperatury i rozkładu naprężenia.....	151
6. Wnioski końcowe	153
Literatura.....	157
Summary.....	181

Wykaz ważniejszych oznaczeń

a	- parametr szerokości funkcji Gaussa profilu apodyzacji siatki Bragga
A	- macierz współczynników czułości
$A(z)$	- pole przekroju w funkcji osi wzdłużnej światłowodu
$A_{we,wy}$	- amplituda modu propagującego w siatce jednorodnej w kierunku dodatnim
α_Λ	- współczynnik rozszerzalności temperaturowej światłowodu
α_n	- współczynnik termo-optyczny
$\mathbf{b}$	- wektor wielkości mierzonych
B	- dwójłomność światłowodu
$B_{we,wy}$	- amplituda modu propagującego w siatce jednorodnej w kierunku ujemnym
βn	- parametr aproksymacji w metodzie gradientów sprzężonych
$\chi(z)$	- funkcja rozkładu siły
$d_{11}, d_{12}, d_{21}, d_{22}$	- dopełnienia algebraiczne
D	- wyznacznik macierzy
δ	- parametr rozstrojenia od długości fali Bragga
$\overline{\delta n_{eff}}$	- amplituda zmian efektywnego współczynnika załamania światła w siatce
δ_{nl}	- błąd nieliniowości
$\Delta \varepsilon$	- zmiana naprężenia
$\Delta FWHM$	- zmiana szerokości połówkowej charakterystyki widmowej
Δl	- zmiana długości
$\Delta(\Delta \lambda_B)_{MAX}$	- wartość maksymalna bezwzględnych różnic pomiędzy prostą regresji, a prostą wykreśloną na podstawie wyników pomiarów
ΔT	- zmiana temperatury
E	- moduł Younga
ε	- wydłużenie
$\ f\ _{L^p}$	- norma w przestrzeni L^p
F	- siła
F_x, F_y	- składowe siły w osi x i y
$FWHM$	- szerokość połówkowa charakterystyki widmowej
ϕ_r, ϕ_t	- faza współczynnika odbicia i transmisji siatki Bragga
g	- przyspieszenie ziemskie
$g(z)$	- funkcja apodyzacji siatki Bragga
I	- moment bezwładności
k_ε, k_T	- współczynnik względnej czułości światłowodowej siatki Bragga na naprężenie i temperaturę

K_e, K_T	- czułość na odkształcenie, temperaturę siatki Bragga
κ_{ac}	- składowa zmienna współczynnika sprzęgania siatki Bragga
l	- długość
l_0	- długość początkowa
L_{PMF}, L_{LPG}	- długość światłowodu utrzymującego polaryzację, długoookresowej siatki Bragga
λ_B	- długość fali Bragga
λ_{IFP}	- długości fali rezonansowej interferometru Fabry-Perota
λ_{rez}	- długość fali rezonansowej (np. widma siatki długoookresowej lub widma układu siatek)
Λ	- okres siatki Bragga
Λx_n	- kierunek sprzężony
M	- moment siły
n_{eff}	- efektywny współczynnik załamania światła
p_e	- współczynnik elastooptyczny
$P(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_N)$	- widmo transmisyjne czujnika
Q	- ciężar
R	- współczynnik odbicia siatki Bragga
σ	- naprężenie
Σ	- przestrzeń metryczna
T	- temperatura
$[T_C]$	- macierz przejścia czujnika
θ	- kąt nachylenia płaszczyzny okresu siatki
$\mathbf{x}$	- wektor wielkości poszukiwanych
z	- oś wzdłużna światłowodu

1. Wstęp

Jedną z przyczyn rozwoju optoelektroniki jest rosnący popyt na układy oraz systemy pomiarowe. Zaspokojenie tego popytu prowadzi do powstania szeregu badań poświęconych tematyce projektowania odpowiednich elementów i układów pomiarowych. Umiejętność budowania układów o dużym stopniu złożoności, wykonujących jednocześnie wiele operacji, pozwala na uzyskanie z pomiarów większej ilości informacji o badanym obiekcie. Istotnym elementem w rozwoju narzędzi realnego poznania było zastosowanie w pomiarach układów mikroprocesorowych. Zastąpiły one człowieka w wykonywaniu wielu złożonych obliczeń. Rosnąca moc obliczeniowa coraz bardziej złożonych systemów mikroprocesorowych stworzyła możliwość ich szerszego wykorzystania w procesie poznawczym. Szczególnie istotna z punktu widzenia trwałego zapisu i późniejszej interpretacji zmierzonego sygnału jest możliwość jego cyfrowego przetworzenia. Połączenie funkcji pomiarowych z funkcjami cyfrowego przetwarzania informacji pomiarowej stworzyło m.in. możliwość eliminacji niekorzystnych składowych wysokoczęstotliwościowych sygnału, występujących w postaci szumów w sygnale pomiarowym.

Układy mikroprocesorowe, działając w oparciu o odpowiedni algorytm w postaci ciągu instrukcji, przetwarzają mierzony sygnał. Jego jakość zależy m.in. od przetwornika pomiarowego oraz wielu dodatkowych czynników, takich jak oddziaływanie wielkości zakłócających. Umiejętność wykorzystywania przez człowieka już istniejących schematów postępowania w nowych obszarach zastosowań umożliwiła doskonalenie istniejących i wprowadzanie nowych przetworników pomiarowych. Przykładem mogą być periodyczne struktury wytworzone na włóknach światłowodowych np. w postaci tzw. światłowodowych siatek Bragga. Zjawisko wzmocnienia promieni X odbitych od poszczególnych płaszczyzn kryształu – zachodzące przy spełnieniu warunku, w którym różnica dróg promieni odbitych od sąsiednich płaszczyzn jest równa całkowitej wielokrotności długości fali (prawo Bragga) – zostało również wykorzystane w okresowo zmiennych strukturach wykonanych ze szkła kwarcowego. Dawne płaszczyzny krystalograficzne zostały zastąpione periodycznie pojawiającymi się obszarami o różnym współczynniku załamania światła.

Był to przełom, ponieważ zauważono, że przy spełnieniu określonych warunków, promienie przechodzące przez wszystkie warstwy takiej struktury będą się sumować, co pozwoli na otrzymanie silnego odbicia pewnych długości fali światła. Istotne jest to, że odbicie takie jest selektywne. Od siatki dyfrakcyjnej naniesionej na włóknie wykonanym ze szkła kwarcowego – nazywanej światłowodową siatką Bragga – odbite są tylko pewne określone długości fali.

Mały rozmiar zaburzenia (okres rzędu 0,1 nm) pozwala na wykonywanie pomiarów z niespotykaną dotychczas rozdzielczością przestrzenną i liniową.

Czujniki wykorzystujące takie struktury periodyczne, posiadają wiele zalet – m.in.: są nieczułe na zmiany pola elektromagnetycznego, mogą być stosowane w środowiskach łatwopalnych i agresywnych chemicznie. Małe rozmiary oraz waga sprawiają, że ich wpływ na badany obiekt może być w większości przypadków pominięty.

W czujnikach wykorzystujących periodyczne struktury światłowodowe wykorzystany zostaje mechanizm modulacji światła pozwalający na ich stosowanie w warunkach występowania silnych pól elektromagnetycznych. Modulacja światła dotyczyć może natężenia promieniowania, fazy, częstotliwości oraz wektora polaryzacji fali świetlnej. Poza niewrażliwością na pola elektromagnetyczne, czujniki tego rodzaju posiadają też inne zalety – możliwość miniaturyzacji (małe rozmiary i masa) i wykonywania pomiarów bezdotykowych.

Dielektryczne właściwości światłowodów stanowiących głowicę czujnika, pracującą w warunkach występowania pól elektrycznych, wykorzystuje się w wielu układach pomiarowych [18]. Jednocześnie odprowadzenie światłowodem, zmodulowanego poprzez wielkość badaną strumienia świetlnego, umożliwia dokładne jego przetworzenie w sygnał elektryczny już poza głowicą czujnika, gdzie nie oddziałuje pole elektromagnetyczne. Istotną i praktycznie wykorzystywaną cechą czujników światłowodowych jest ich wysoka czułość i możliwość bezpośredniego łączenia z systemami telekomunikacyjnymi. W warunkach przemysłowych czujniki światłowodowe są stosowane także w środowiskach agresywnych chemicznie [43]. Eksploracja tego obszaru nauki tworzy koncepcje nowych metod pomiaru różnych wielkości fizycznych i chemicznych [186, 193]. Układy wykorzystujące czujniki optoelektroniczne stanowią przedmiot badań i rozwoju m.in.: pomiaru przyspieszenia [247], kąta obrotu [26], pola elektrycznego i magnetycznego [45], ciśnienia [131, 179], temperatury [239], fali akustycznej [73], wibracji [16], odkształcenia [116, 268], wilgotności [13, 41], lepkości [234], składu substancji [241] jak również systemów monitoringu środowiska [93].

Na szczególną uwagę zasługuje rozwój wielopunktowych i rozłożonych układów czujników światłowodowych. Z punktu widzenia ilości i różnorodności praktycznych zastosowań, szczególnie ważną grupę stanowią czujniki oparte na światłowodowych siatkach Bragga [114, 140, 197, 208]. W odróżnieniu od fotodetektora, czułego jedynie na natężenia światła padającego na jego powierzchnię i wykorzystywanego jako odbiornik fali świetlnej – pomiar fazy, częstotliwości lub polaryzacji światła modulowanego mierzoną wielkością fizyczną wymaga zastosowania odpowiednich technik interferometrycznych [267] oraz metod przetwarzania sygnału optycznego [75]. Walory użytkowe rozważanych struktur takie jak dokładność i powtarzalność pomiaru przy jednoczesnej odporności na zakłócenia przez czynniki zewnętrzne przemawiają za ich dalszym rozwojem.

Przy wytwarzaniu siatek Bragga wykorzystuje się efekt zmian współczynnika załamania światła wskutek oświetlenia odpowiednio przygotowanego (pompowanego wodorem [237, 238, 290]) włókna optycznego światłem ultrafioletowym [12, 158], pochodzącym głównie z lasera ekscymerowego KrF (ang.: *krypton fluoride laser*) o długości fali 248 nm i energiach impulsu rzędu 100 mJ. Wywołanie periodycznych zmian współczynnika załamania światła w rdzeniu światłowodu wymaga dodatkowo jego naświetlenia wiązką światła o periodycznie zmiennym natężeniu wzdłuż włókna, co uzyskuje się poprzez wykorzystanie tzw. masek fazowych (specjalnych siatek dyfrakcyjnych) lub techniką interferometryczną. W tej ostatniej metodzie, dwie wiązki lasera UV interferują ze sobą, przy czym interferencja zachodzi w rdzeniu światłowodu. Istnieje wiele rodzajów światłowodowych siatek Bragga, wśród których najczęściej stosowane są siatki zwykłe, jednorodne, oznaczane symbolem FBG (ang.: *fiber Bragg gratings*), długookresowe – LPG, (ang.: *Long Period Gratings*), ukośne – TFBG (ang.: *tilted fiber Bragg gratings*) czy siatki z chirpem – CFBG (ang.: *chirped fiber Bragg gratings*).

Istotne jest to, że bez względu na typ stosowanych w czujnikach siatek, wielkość mierzona wpływa na parametry siatki (głównie jej okres i współczynnik załamania), co w efekcie prowadzi do zmiany charakterystyki widmowej całego czujnika. Typowo obserwowane zmiany to: przesunięcie, poszerzenie lub rozszczepienie widma lub też inna deformacja nie dająca się opisać wymienionymi kategoriami. Deformacje charakterystyki widmowej siatki – zarówno transmisyjnej [184] jak i odbiciowej [123] – niosące informacje dotyczące wielkości mierzonej, nie są obojętne na zmiany temperatury, co znacznie wpływa na wyniki pomiarów transmisji czy odbicia fali świetlnej w czujniku FBG. Najczęściej widmo ulega zmianie pod wpływem mierzonej wielkości fizycznej lub chemicznej [174, 181] wraz z niepożądanym wpływem temperatury, co w wielu systemach pomiarowych stanowi poważny problem metrologiczny. W niektórych przypadkach stosuje się uproszczenie zakładając stałość temperatury podczas pomiarów. Zastosowanie jednak czujników w rzeczywistych obiektach powoduje, że temperatura w ich otoczeniu będzie się zmieniać. Wywołać to mogą zarówno zmiany warunków atmosferycznych, jak i warunków prowadzenia procesów przemysłowych.

W tej tematyce realizowane są również tezy niniejszej pracy. Nie można wyeliminować wpływu temperatury na pomiar wielkości fizycznych i założenie, że nie jest ona zmienna byłoby w większości przypadków nieprawidłowe.

Praca niniejsza prezentuje metody i układy czujników światłowodowych, które pozwalają na ograniczenie problemu zależności parametrów czujnika od temperatury zmieniającej się podczas pomiaru różnych wielkości fizycznych. Ze względu jednak na obszerność zagadnień z tego obszaru badawczego, zawartość pracy została ograniczona do metod wykorzystujących czujniki światłowodowe o zamkniętym torze optycznym, z przetwornikiem pomiarowym w postaci siatki Bragga. W pracy zawarto rozwiązania układowe oraz algorytmiczne,

pozwalające na równoczesny pomiar wybranych wielkości fizycznych, tj. zarówno odkształcenia względnego, siły oraz jej składowych, naprężenia niejednorodnego oraz rozkładu takiego naprężenia, jak też samej temperatury. Rozdziały poświęcone równoczesnemu pomiarowi temperatury i odkształcenia względnego, a także siły działającej w dwóch kierunkach, naprężenia niejednorodnego oraz jego rozkładu obejmują założenia teoretyczne do projektowania konkretnych rozwiązań metodologicznych. Praca niniejsza obejmuje także techniki i metody pomiarowe, które znalazły potwierdzenie podczas wykonanych eksperymentów. Ponadto, w pracy przedstawiono zaproponowane przez autora metody pomiaru wybranych nieelektrycznych wielkości fizycznych.

Pierwsza z zaproponowanych metod zastosowana została do równoczesnego pomiaru odkształcenia względnego i temperatury. Wykorzystuje ona układ czujnika z dwiema jednorodnymi siatkami Bragga. Metoda ta, prezentowana w rozdziale 2.2, została umiejscowiona w kontekście prowadzonej analizy uwarunkowań macierzowych dla układów z siatkami Bragga, dla przypadku jednoczesnego pomiaru odkształcenia i temperatury. Równania macierzowe układu zostały zweryfikowane podczas badań eksperymentalnych, co pozwoliło na potwierdzenie poprawności modelowania i określenie rzeczywistych parametrów zaproponowanego czujnika. Eksperymenty wykonano na zbudowanym do tego celu stanowisku pomiarowym.

Drugą metodę wykorzystano do jednoczesnych pomiarów odkształcenia względnego i temperatury, przy czym wymagane jest użycie tylko jednej siatki Bragga jako elementu pomiarowego, umieszczonego na odpowiednim ramieniu pomiarowym. Cały układ zaprojektowany został w taki sposób, aby wywołać chirp na połowie siatki. Omawiana metoda została zweryfikowana na autorskim stanowisku pomiarowym, a wyniki eksperymentów przedstawiono w rozdziale 2.6.

Kolejna z zaproponowanych metod wykorzystywana jest do równoczesnego pomiaru składowych siły i temperatury czujnikami ze światłowodowymi siatkami Bragga. Laboratoryjne potwierdzenie jej właściwości osiągnięte zostało dzięki odpowiedniej konstrukcji układu czujnika. W przeanalizowanej literaturze spotykane są jedynie układy do pomiaru siły działającej w jednej osi oraz temperatury, przy znanej osi działania siły [50, 85, 198]. Przedstawione wyniki badań i ich analiza mają na celu wykazanie możliwości zastosowania niniejszej metody do jednoczesnego pomiaru dwóch składowych siły (działających w dwóch osiach), nieczułego na zmiany temperatury. Metoda, której opis zamieszczono w rozdziale 3.3. niniejszej pracy, wykazuje znaczne zwiększenie czułości w stosunku do układów dotychczas stosowanych.

Następna z zaproponowanych metod umożliwia pomiar temperatury i niejednorodnego naprężenia. Metoda ta wykorzystuje modelowanie warstw periodycznych struktur światłowodowych wraz z opracowanym algorytmem wyznaczania maksymalnego naprężenia o niejednorodnym rozkładzie.

Zaproponowany model czujnika złożonego z układu dwóch siatek Bragga oraz przedstawiona implementacja metody zostały opisane w całym rozdziale 4 i osadzone w kontekście prac innych autorów z tej tematyki badawczej. Wstępna analiza potwierdziła możliwość wyznaczania rozkładu odkształcenia i temperatury czujnikiem ze światłowodowymi siatkami Bragga z wykorzystaniem metodologii problemu odwrotnego. Powyższe rozważania stanowią treść rozdziału 5. Metoda wyznaczania rozkładu naprężenia oraz temperatury nie została potwierdzona badaniami eksperymentalnymi. W rozdziale tym zawarto jednak wskazówki dotyczące możliwości zastosowania czujnika w rzeczywistych pomiarach wspomnianych wielkości mierzonych.

Reasumując, praca niniejsza prezentuje syntetyczne ujęcie problemów związanych z pomiarami wybranych wielkości nieelektrycznych przy wykorzystaniu czujników optoelektronicznych z zamkniętym torem optycznym i wykorzystujących światłowód, na którym wytworzone zostały periodyczne zmiany współczynnika załamania światła w postaci siatek Bragga – zapisanych w części pomiarowej włókna. Wielkość mierzona oddziałuje bezpośrednio na część światłowodu z modulacją współczynnika załamania, co wywołuje zmianę jego charakterystyki spektralnej. Uwzględniony został również problem zależności parametrów stosowanych czujników od temperatury. Wykazana zatem została potrzeba rozwijania układów i metod pomiarowych, które pozwolą na uniezależnienie się od zmian temperatury lub umożliwią wykonywanie jednoczesnych pomiarów tej wielkości wraz inną wielkością nieelektryczną.

Głównym celem pracy jest dokonanie analizy uwarunkowań temperaturowych pomiaru wielkości fizycznych metodami optoelektronicznymi wykorzystującymi czujniki ze światłowodowymi siatkami Bragga oraz zbadanie właściwości układów czujników do pomiaru wybranych wielkości fizycznych w warunkach zmieniającej się temperatury. Celem jest także wykazanie możliwości zastosowania algorytmów obliczeniowych do rozwiązywania zadania odwrotnego wyznaczenia dwóch wielkości fizycznych czujnikami światłowodowymi.

Cel ten został osiągnięty poprzez wykonanie następujących zadań:

1. Analizę uwarunkowań macierzowych dla czujników do pomiaru odkształcenia i temperatury ze światłowodowymi siatkami Bragga oraz jej rozszerzenie na inne układy do pomiaru dwóch wielkości fizycznych, niekoniecznie wykorzystujących światłowodowe siatki Bragga jako przetwornik.
2. Opracowanie metody wykorzystującej czujnik z dwiema jednorodnymi siatkami Bragga do wyznaczenia odkształcenia względnego i temperatury wraz z jej eksperymentalnym potwierdzeniem.

3. Analizę wpływu właściwości światłowodu na parametry czujników odkształcenia nieczułych na zmiany temperatury.
4. Opracowanie metody wywołującej chirp w części siatki, co umożliwia odtworzenie wpływu dwóch wielkości fizycznych na charakterystyki czujnika.
5. Analizę uwarunkowań macierzowych przy pomiarze odkształcenia i temperatury dla czujników wykorzystujących siatki Bragga o różniących się parametrach, w tym również pracujących w układach interferometrów światłowodowych.
6. Opracowanie metody równoczesnego pomiaru temperatury i dwóch składowych siły w kontekście rozwijanych obecnie rozwiązań układów czujników siły i temperatury.
7. Zaproponowanie sposobu pomiaru temperatury i maksymalnej wartości niejednorodnego naprężenia, wraz z jej weryfikacją i implementacją w warunkach laboratoryjnych.
8. Opracowanie algorytmów obliczeniowych, umożliwiających wyznaczanie temperatury i niejednorodnego naprężenia w oparciu o model periodycznej struktury światłowodu i rzeczywiste charakterystyki widmowe czujnika z dwiema siatkami Bragga.
9. Sformułowanie równania całkowego Fredholma pierwszego rodzaju dla czujnika rozkładu naprężenia, nieczułego na zmiany temperatury, wykorzystującego układ dwóch siatek Bragga.

Tezą pracy jest wykazanie, że dokładniejsze określenie wartości wybranych wielkości fizycznych w warunkach zmieniającej się temperatury, niezbędne jest zwiększenie czułości oraz dokładności metod pomiarowych wykorzystujących czujniki ze światłowodowymi siatkami Bragga. Tezę udowodniono poprzez realizację odpowiednich układów czujników oraz zastosowanie metod modelowania periodycznych struktur światłowodowych, połączonych z doбором odpowiedniego algorytmu obliczeniowego. Zastosowanie wszystkich wymienionych elementów umożliwia odpowiednio: zwiększenie czułości pomiaru danej wielkości fizycznej, unieważnienie pomiaru na temperaturę oraz zwiększenie rozdzielczości liniowej. Rozwój technologii wymaga bowiem zastosowania metod pomiaru pewnych wielkości fizycznych bez konieczności demontowania elementów, np. w przypadku instalacji ciśnieniowych. W sytuacji, gdy pomiar wykonywany jest praktycznie zawsze w warunkach zmieniającej się temperatury (otoczenia) lub zmian ciśnienia czynnika, ważne staje się zastosowanie odpowiednich metod, niewrażliwych na temperaturę lub umożliwiających jej jednoczesny pomiar.

Sposób wyznaczania nie ujętych w pracy wybranych wielkości fizycznych może być przeniesiony do innych obszarów badań i praktycznych zastosowań. Zasadne wydaje się podejmowanie dalszych badań odpowiednich konfiguracji elementów takich jak: przetwornik (niekoniecznie FBG i jego zmienne parametry); algorytm optymalizacyjny (niekoniecznie gradientów sprzężonych); model czujnika (zbudowany inną niż metoda macierzy przejścia dla struktur periodycznych, np. metodą Rungego-Kutty) do wyznaczania innych wielkości fizycznych. Otwiera to możliwość budowy zintegrowanych czujników lub układów dostarczających informacji, np. jako dane główne lub wspomagające, do dalszego przetworzenia. Stanowi to ważny element przy realizacji skomplikowanych procesów kontrolnych – np. w systemie ciągłym i bezpośrednim. W celu rozwiązania tego zagadnienia, w niniejszej pracy użyto metodę gradientów sprzężonych oraz model matematyczny siatki Bragga. Dla pomiaru niejednorodnego naprężenia oraz temperatury zdefiniowany i rozwiązany został problem odwrotny rekonstrukcji wielkości mierzonej.

Praca niniejsza składa się z pięciu rozdziałów, z których pierwszy stanowi wstęp. W drugim rozdziale zaprezentowane zostały metody jednoczesnego pomiaru odkształcenia względnego i temperatury. Przedstawiono rozwiązania układów wykorzystujących różne rodzaje siatek Bragga i przeprowadzono analizę uwarunkowań macierzowych czujników optoelektronicznych do równoczesnego pomiaru odkształcenia i temperatury. W dalszej części rozdziału określono możliwość zastosowania proponowanej metody pomiaru wielkości fizycznych przy zastosowaniu czujnika z dwiema jednorodnymi siatkami Bragga. W rozdziale przedstawiona została również metoda wytworzenia chirpu w jednej z części siatki Bragga poprzez wykorzystanie odpowiednio zaprojektowanego układu czujnika. W końcowej części przedstawiono sposób weryfikacji proponowanych metod pomiaru odkształcenia względnego i temperatury.

Rozdział trzeci pracy dotyczy jednoczesnego pomiaru siły i temperatury przy wykorzystaniu światłowodowych czujników z siatkami Bragga. Ze względu na specyfikę wielkości mierzonych, w rozdziale tym zaprezentowane zostały wyniki analizy uwarunkowań mechanicznych oraz rozwijane obecnie grupy układów czujników do jednoczesnego pomiaru siły i temperatury. Druga część rozdziału obejmuje prezentację zaproponowanej przez autora metody równoległego pomiaru temperatury oraz siły działającej w dwóch osiach, przy czym wyznaczane zostają obydwie składowe tej siły. Ze względu na sposób wyznaczania wielkości mierzonej metoda ta może być również stosowana w warunkach zmiennej temperatury.

Rozdział czwarty zawiera opis proponowanej przez autora metody pozwalającej na pomiar maksymalnej wartości niejednorodnego naprężenia w warunkach zmiennej temperatury otoczenia. Zaprezentowany algorytm wykorzystujący model matematyczny czujnika oraz metoda gradientów sprzężonych, pozwalają na jednoczesne wyznaczenie temperatury i naprężenia

niejednorodnego na długości zastosowanej siatki. Rozdział przedstawia sposób wykorzystania metody macierzy przejścia do modelowania periodycznej struktury czujnika złożonej z dwóch siatek Bragga.

Rozdział piąty dotyczy pomiaru rozkładu naprężenia o dowolnym, niesymetrycznym kształcie na mierzonej długości przy jednoczesnym pomiarze temperatury. Sformułowane równanie całkowe Fredholma pierwszego rodzaju w celu rekonstrukcji temperatury i rozkładu naprężenia, pozwala zaproponować sposób budowy i walidacji modelu prostego i odwrotnego czujnika do pomiaru określonych wielkości fizycznych. Przedstawiono metodę rozwiązania problemu odwrotnego dla tak postawionego zadania metrologicznego przy użyciu przykładowego algorytmu obliczeniowego.

Szczególne podziękowania i wyrazy wdzięczności winien jestem Panom:

- Profesorowi Waldemarowi Wójcikowi – Dziekanowi Wydziału Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Lubelskiej, obecnemu Dyrektorowi Instytutu Elektroniki i Technik Informacyjnych – za stworzenie mi warunków i miejsca gdzie mogłem rozwijać swoje zainteresowania naukowe, za słowa zachęty, życzliwość w chwilach zwątpienia, za pomoc organizacyjną w procesie przygotowania niniejszej pracy,

- Profesorowi Januszowi Mroczce – członkowi korespondentowi PAN - za umożliwienie mi odbycia stażu naukowego w Katedrze Metrologii Elektronicznej i Fotonicznej Politechniki Wrocławskiej. To tutaj odnalazłem drogę mojego dalszego rozwoju i wiarę w siłę prawdy w poczynaniach naukowych. To tutaj bliską stała się mi myśl ks. Jana Twardowskiego „Naszą ludzką siłą jest świadomość naszej słabości”.

2. Optoelektroniczne czujniki odkształcenia - niewrażliwe na zmiany temperatury

Stosując optoelektroniczne czujniki pomiarowe oparte na światłowodowych siatkach Bragga, bez względu na mierzoną przez nie wielkość, należy uwzględniać czynnik temperaturowy (wielkość, zmiany kierunkowe itp.). Optoelektroniczny czujnik odkształcenia pracujący w warunkach zmieniającej się temperatury zareaguje bowiem na zmiany obu tych wielkości. Czułość skrośna zdeterminowana zostanie wpływem temperatury na wynik pomiaru [177]. W celu rozwiązania problemu czułości skrośnej siatek Bragga na temperaturę i odkształcenie zaproponowanych zostało wiele metod. Wykorzystują one odmienne – często bardzo zróżnicowane – techniki pomiarowe [99, 111, 160, 199, 245, 279].

Istniejące metody pomiarowe pozwalające określić wartość odkształcenia bez względu na temperaturę w jakiej pracuje czujnik można podzielić na takie, które nie określają wartości temperatur oraz takie, które dodatkowo umożliwiają uzyskanie takiej informacji. Wartość pozbawiona informacji o temperaturze [56] oznacza, że wyznaczona wartość odkształcenia jest korygowana w sposób układowy. Natomiast wartość zawierająca informację o temperaturze – symultaniczny pomiar odkształcenia i temperatury [250, 284], pozwala dodatkowo na korekcję charakterystyki widmowej oraz umożliwia kalibrację układów pomiarowych. Analogicznego podziału układów pomiarowych opartych na FBG, można dokonać ze względu na dynamikę obciążeń i pomiaru na układy statyczne [95] i układy dynamiczne [27, 162]. Wyodrębnienie zmian pochodzących od rodzaju obciążeń stanowi przedmiot badań wielu ośrodków.

Kolejny podział układów pomiarowych opartych na FBG może być również wykonany ze względu na sposób kompensacji temperatury. W tym przypadku rozróżniamy układy o kompensacji wewnętrznej, np. wykorzystujące właściwości materiału [62], oraz układy o kompensacji zewnętrznej, np. wykorzystujące określoną instalację siatek na odpowiednio dobranych przetwornikach mechanicznych [113, 254]. Rozwijane są metody pomiarowe wykorzystujące światłowodowe siatki Bragga, czułe jedynie na odkształcenie [105] oraz metody wykazujące różną czułość na odkształcenie i temperaturę, ale przez to wymagające początkowej kalibracji siatek dla każdej czułości, co skutkuje większym stopniem skomplikowania samego układu [78]. Spośród wielu rozwiązań, pozwalających na określanie odkształcenia i jednocześnie nieczułych na temperaturę, zarysowuje się podział ze względu na sposób wykorzystania informacji o temperaturze. Wyróżnić tutaj można układy eliminujące wpływ temperatury oraz układy eliminujące wpływ temperatury z jednoczesnym jej pomiarem. Grupa metod umożliwiających symultaniczny pomiar odkształcenia i temperatury wykorzystuje zazwyczaj przynajmniej dwie siatki Bragga [210]. Często stosowane są techniki oparte na wykorzystaniu

jednej siatki Bragga, przy czym siatka jest w rzeczywistości układem dwóch nałożonych na siebie siatek [53] lub jedną siatką o dwóch dających się wyróżnić długościach fali Bragga. Często stosuje się również pomiar dwóch różnych parametrów w czujnikach optoelektronicznych. Wymienić tutaj można układy umożliwiające pomiar dwóch różnych długości fali lub pomiar dwóch różnych modów [60].

Przy pomiarach wielu wielkości fizycznych czułość siatek Bragga na temperaturę jest własnością niepożądaną i komplikuje możliwość ich wykorzystania w charakterze elementów przyrządów do pomiaru m.in. odkształcenia. W przypadku pomiaru przesunięcia długości fali Bragga pojedynczej siatki, problematyczne jest odróżnienie czy i w jakim stopniu zmianę tą wywołało wydłużenie siatki, czy temperatura. Często spotykane jest rozwiązanie tego problemu poprzez użycie pary FBG, która montowana jest na przeciwnych stronach powierzchni elementu ulegającemu zgięciom [253]. Układy zawierające parę FBG wykazują dość szerokie możliwości ich zastosowania. Pozwalają one na uzyskanie dużych rozdzielczości pomiarów temperatury [4] oraz czułości tych pomiarów [2]. Dotychczasowe wyniki badań wskazują jednak, że wspomniane układy różnicowe posiadają ograniczenia polegające na możliwości przesłuchiwania skończonej liczby siatek.

Jednoczesny pomiar odkształcenia i temperatury możliwy jest poprzez określenie przesunięcia długości fali dwóch siatek w sytuacji gdy ich czułość na obydwie wielkości są różne [195, 252]. Często spotykane jest podejście polegające na jednoczesnym pomiarze odkształcenia i temperatury, wykorzystujące hybrydowy czujnik złożony z dwóch siatek FBG oraz siatki Bragga długookresowej LPG (ang.: *Long Period Grating*). Siatka długookresowa LPG posiada znacznie większą czułość temperaturową od FBG, a mniejszą czułość na odkształcenie. Odpowiedzi FBG i LPG na wymienione wielkości fizyczne różnią się także pod względem jakościowym. Tak na przykład długość fali Bragga FBG jest liniowo proporcjonalna do okresu siatki pomnożonego przez współczynnik załamania światła rdzenia. Długość fali rezonansowej LPG jest proporcjonalna do okresu siatki przemnożonego przez różnicę współczynników załamania światła powstałą pomiędzy rdzeniem a płaszczem światłowodu, na którym zapisana jest siatka [230]. Wykazano, że pasmo odbiciowe siatki chirpowej zapisanej na włóknie światłowodowym o kształcie stożkowym jest czułe na wywołane odkształcenie i jednocześnie nieczułe na temperaturę [254]. Przedstawiono również metodę wykorzystującą siatkę długookresową LPG umieszczoną w lustrze pętli światłowodu o wysokiej dwójłomności HiBi-FLM (ang.: *High-Birefringence Fiber Loop Mirror*) [67]. Mniej więcej od roku 1999 czujniki HiBi-FLM wykorzystywane są do pomiaru odkształcenia [20, 282], temperatury [213], obydwu wielkości [69, 141, 217] oraz innych parametrów fizycznych, w tym np. poziomu cieczy [17]. W wielu pracach dokonuje się analizy układów opartych na parze LPG (LPGP – ang.: *LPG Pair*) składającej się z dwóch przeważnie słabych LPG (o dynamice rzędu

2-3 dB) [3]. Możliwość wykorzystania czujnika LPGP opiera się na zasadzie jego działania, która mówi, że sprzęgnięte mody rdzenia i płaszcz w pierwszej siatce LPG mieszają się ponownie w drugiej siatce LPG i formują prążki interferencyjne. Ścieżki rdzenia i płaszcz stanowią ramiona interferometru Macha-Zendera pracującego w trybie transmisyjnym [46] lub interferometru Michelsona, który pracuje w trybie odbiciowym [76].

Znane jest również wykorzystanie dwóch elementów czujnika optoelektronicznego w postaci siatek Bragga zapisanych na światłowodzie IFBG (*In-Fibre Bragg Grating*) oraz filtrów polaryzacyjnych [108]. Dzięki takiemu połączeniu możliwe jest uzyskanie układu czujnika, którego część pomiarowa posiada znaczną długość rzędu 25 cm, co w wielu zastosowaniach może być niepraktyczne.

Osobną grupę stanowią czujniki odkształcenia i temperatury wykorzystujące połączenie światłowodowych siatek Bragga z układem interferometru światłowodowego. Rozwiązania bazujące na interferometrze Sagnaca i siatkach LPG lub/i FBG charakteryzują się dużą czułością i małym kosztem wytworzenia [23]. Wspomniane zalety dotyczą jedynie układów wykorzystywanych do pomiaru pojedynczych parametrów i w sytuacji jednoczesnego pomiaru kilku wielkości. Czułość pomiarowa ulega w takim przypadku znacznemu zmniejszeniu, przy jednoczesnym wzroście kosztu wytworzenia czujnika. Poprzez umieszczenie siatki LPG w pętli światłowodowego interferometru Sagnaca ze światłowodem zachowującym polaryzację (PMF – ang.: *Polarization-Maintaining Fibers*) uzyskuje się również czujnik do pomiaru temperatury i odkształcenia. Często jednak ze względu na fakt połączenia światłowodu jednomodowego z LPG i PMF, posiadającego duże rozmiary fizyczne następuje zawężenie obszaru jego zastosowania [67].

Do pomiarów różnych wielkości nieelektrycznych zaproponowano wiele rozwiązań opartych na siatkach Bragga i interferometrii Fabry-Perota. Czujniki z zewnętrznymi interferometrami Fabry-Perota (EFPI – ang.: *Extrinsic Fabry-Pérot Interferometer*) wykorzystywane są coraz częściej w układach do badania kompozytów, konstrukcji betonowych, a także w medycynie, a nawet w charakterze czujników chemicznych [188]. Zintegrowany czujnik FBG/EFPI został po raz pierwszy wykorzystany do jednoczesnego pomiaru odkształcenia i temperatury struktur kompozytów w trzech wymiarach [189]. Przy tego rodzaju czujnikach najczęściej wykorzystywaną metodą połączenia włókna światłowodowego z kapilarą (rozumianą jako powierzchnia aktywna czujnika) jest użycie klejów epoksydowych lub stapiania termicznego. Różnice współczynnika rozszerzalności termicznej CTE (ang.: *Coefficient of Thermal Expansion*) pomiędzy klejem epoksydowym a kapilarą czujnika sprawiają, że czujniki takie są czułe również na zmiany temperatury. Rozwiązaniem tego problemu może być skomplikowane pod względem technologicznym ze względu na połączenie termiczne światłowodu z kapilarą i tym samym zmniejszenie CTE. Problem właściwego umieszczenia światłowodu w głowicy

czujnika (najczęściej w postaci kapilary) dotyczy większości czujników optoelektronicznych z siatkami Bragga. Układy EFPI łączy się nie tylko ze zwykłymi siatkami Bragga [64] (układy FBG/EFPI stosowane najczęściej do pomiaru temperatury i odkształcenia [65]), ale również z siatkami posiadającymi zmienny okres (chirp) – CFBG (*Chirped Fiber Bragga Gratings*). Czujniki CFBG/EFPI stosowane są najczęściej do jednoczesnego pomiaru temperatury i naprężenia.

Kolejne kryterium podziału czujników optoelektronicznych z siatkami Bragga do zastosowań w pomiarach odkształcenia i temperatury oprócz można na sposobach zróżnicowania czułości na podstawową wielkość mierzoną oraz temperaturę. Wymienić należy tutaj układy wykorzystujące pojedynczą siatkę [235], układ dwóch FBG [142] lub pojedynczą FBG łączoną z innymi elementami światłowodowymi o różnych czułościach na odkształcenie i temperaturę (połączenie interferometru Fabry-Perota z FBG [135] czy siatki FBG [61, 161] lub LPG [103] z interferometrem Sagnaca). Układy oparte na parze FBG lub FBG łączonej z innym elementem wykazującym czułość na jedną z rozważanych wielkości mierzonych, w celu możliwości ich praktycznego zastosowania, wymagają wcześniejszej kalibracji każdego elementu (siatki i interferometru), co komplikuje ich praktyczne zastosowania.

Drugim oprócz siatki Bragga elementem wykazującym czułość na temperaturę może być również inny niż interferometr element optyczny np. materiał termochromowy [62]. Stosowane są mieszaniny zawierające 0,1-1,0% substancji termochromowej, znajdujące największe zastosowanie jako czujniki temperatury. Fakt reakcji na temperaturę, w postaci zmiany koloru i związanego z nią np. współczynnika odbicia światła, wykorzystywany jest w układach pomiarowych również z siatkami Bragga. Informacja o temperaturze pozyskiwana jest przy wykorzystaniu materiału termochromowego i służy jako element kalibrujący czujnik FBG [63]. Odkształcenie jest mierzone poprzez zmiany przesunięcia centralnej długości fali FBG (długości fali Bragga), a temperatura określana jest na podstawie zmian mocy światła odbijanego przez materiał termochromowy. W przypadku pomiaru temperatury czujnik ze światłowodowymi siatkami Bragga posiada często histerezę charakterystyki przetwarzania [55].

Problem czułości skrośnej występuje w przypadku czujników światłowodowych większości wielkości fizycznych [150], a także czujników wielkości chemicznych [128]. Dotyczy to całego spektrum czujników światłowodowych, w tym również układów czujników ze światłowodowymi siatkami Bragga. Kluczowa staje się zatem eliminacja wpływu temperatury [240]. Proponowane są rozwiązania problemu czułości skrośnej na temperaturę przy pomiarze innych wielkości poprzez modelowanie czułości światłowodu, na którym zapisana jest siatka. Spotyka się również prace, w których prezentowane są wyniki pomiaru czułości siatki oraz światłowodu na temperaturę i odkształcenie dla wszystkich modów polaryzacyjnych i przestrzennych [35].

Badania potwierdzają możliwość określenia czułości siatki, przed jej wytworzeniem, poprzez modelowanie czułości włókna, na którym jest ona zapisana. Może to być kluczowym elementem gwarantującym możliwość zastosowania siatek Bragga np. na światłowodach wielomodowych z eliptycznym rdzeniem.

W pracy [183] zademonstrowany został niezależny od temperatury czujnik odkształcenia wykorzystujący siatkę CFBG, zapisaną na światłowodzie stożkowym. Sama głowica pomiarowa czujnika stanowi bardzo delikatny element. Uformowanie stożka na światłowodzie, do zapisania siatki (dokonane poprzez trawienie) ogranicza znacznie dopuszczalne obciążenie. To z kolei powoduje, iż rozwiązanie ma bardzo ograniczony zakres pomiaru wartości odkształcenia. Znałe są jednak inne układy pozwalające na niezależny od temperatury pomiar odkształcenia, z wykorzystaniem czujnika z chirpową siatką Bragga - częściowo otoczoną tuleją szklaną [110]. Istnieją metody pomiaru przemieszczenia, wykorzystujące siatki Bragga przymocowane na odpowiednio zaprojektowanym wsporniku [54, 283]. Spotykane są również czujniki do pomiaru ciśnienia z kompensacją temperatury wykorzystujące efekt dwójłomności [178] i różnice poprzecznego naprężenia w rdzeniu światłowodu jednomodowego oraz grupy czujników wysokiego ciśnienia [192, 260]. Rozwijane są metody pomiaru przyspieszeń jako funkcji przesunięcia długości fali Bragga wywołanego przyspieszeniem FBG czujnika. W jednych temperatura jest zakłóceniem niemierzalnym [227], w innych natomiast temperatura podlega pomiarom i kontroli [286, 287, 288].

Inne rozpatrywane czujniki, w których wyeliminowano wpływ temperatury bez dodatkowego układu kompensacji temperaturowej, pozwalają między innymi na pomiar: nachylenia [167], odkształcenia [246, 278], odkształcenia [117] poziomu płynu [209, 248, 256], defektów materiałowych [118], promieniowania gamma [259], współczynnika załamania światła [136, 143, 203, 271] jak również jego rozkładu [145]. Wśród tych ostatnich na uwagę zasługują rozwijane obecnie metody oparte na wykorzystaniu długookresowych siatek Bragga. W czujnikach z jednorodnymi siatkami Bragga, przy pomiarach współczynnika załamania światła, wymagane jest trawienie płaszcza w celu wywołania zanikającego pola prowadzonego modu [154]. Redukuje to siłę i trwałość czujnika oraz czyni go podatnym na zniszczenie, szczególnie w trudnych warunkach środowiskowych. Czujniki współczynnika załamania światła oparte na LPG oraz CFBG charakteryzują się większą trwałością, ponieważ nie wymagają naruszenia struktury światłowodu [22, 36, 292].

Istnieją również techniki wytwarzania siatek Bragga o różnych czułościach na temperaturę. Spośród kilku znanych, wyróżnić należy techniki zapisu na włóknie B/Ge (domieszkowanym borem i germanem), z różnym czasem ekspozycji na światło UV. Czujniki tak wytworzone posiadając dwa maksima odbiciowe Bragga. Mają one taką samą czułość na odkształcenie, a różną czułość na temperaturę, przez co pozwalają na wspólny pomiar temperatury

i odkształcenia osiowego [83]. Czulość maksimów odbiciowych siatki może być regulowana i dostosowywana do potrzeb w szerokim zakresie. Perspektywę praktycznego zastosowania układu pomiarowego poszerza tolerancja przez czujnik bardzo dużego zakresu odkształcenia oraz możliwość użycia pojedynczego źródła światła.

Kompensację temperatury uzyskuje się również poprzez odpowiedni sposób zamontowania siatki czujnika. W tym celu często stosowane są specjalne wsporniki, belki czy wiązki [165], do których mocowana jest siatka. Często wykorzystuje się wsporniki bimetalowe, w których siatka jest umieszczana na powierzchni specjalnie zaprojektowanej wiązki, składającej się z dwóch materiałów o różnym współczynniku rozszerzalności temperaturowej. Ściskanie i rozciąganie siatki spowodowane ruchami naprężeniowymi wspornika, umożliwia uzyskanie kompensacji temperatury poprzez automatyczną kompensację przesunięcia długości fali wywołanego temperaturą. Często rozważanym rozwiązaniem jest naklejenie siatek Bragga w miejscach, w których będą one posiadać różną czulość na odkształcenie i jednocześnie taką samą czulość temperaturową. W wielu publikacjach wykazano, że rozwiązanie takie posiada znacznie większą różnicę czulości na odkształcenie i temperaturę w stosunku do innych układów z kompensacją temperaturową, wykorzystującą dwie FBG [66]. Rozwijane również obecnie rozwiązanie problemu jednoczesnego pomiaru odkształcenia i temperatury polega na wykorzystaniu zależności szerokości widma siatki od wywołanego odkształcenia, które zarazem jest niezależne od zmian temperatury [165]. Takie własności posiada układ, w którym pojedyncza siatka Bragga zapisana jest na światłowodzie stożkowym [137].

Kolejną grupę czujników z jedną światłowodową siatką Bragga charakteryzuje zjawisko sprzęgania modów pomiędzy rdzeniem a płaszczem, które ma miejsce w ukośnych siatkach Bragga – TFBG [147]. Mody rdzenia i płaszcza charakteryzują się różną wartością czulości termicznej i zbliżoną wartością czulości na odkształcenie. Określenie, który z czynników (odkształcenie czy temperatura) i w jakim stopniu wywołał przesunięcie widma TFBG jest możliwe poprzez śledzenie zmian rezonansowej długości fali, dla której dochodzi do sprzęgania modów rdzeniowych oraz odpowiadającej mu rezonansowej długości fali, dla której zachodzi sprzęganie modów pomiędzy rdzeniem a płaszczem [29]. Oprócz siatek jednorodnych, długookresowych [14], długookresowych przestrajalnych [255], ukośnych i siatek z chirpem [34], do jednoczesnych pomiarów dwóch wielkości fizycznych stosuje się siatki superstrukturalne (np. układ do pomiaru krzywizny i odkształcenia [82]).

2.1. Uwarunkowania równań macierzowych układów z siatkami Bragga dla jednoczesnego pomiaru odkształcenia i temperatury

Modelowanie matematyczne pozwala na określenie wielu właściwości czujników bez konieczności każdorazowej budowy fizycznego elementu. W przypadku czujników optoelektronicznych zależności wiążące poszczególne wielkości i parametry są bardzo złożone. Stąd też modelowanie takich czujników wymaga podejścia macierzowego.

Równania macierzowe czujników z siatkami Bragga pozwalają określić zależności opisujące sposób przetwarzania wielkości mierzonych (np. odkształcenia i temperatury równocześnie) na wartości parametrów siatek, a na ich podstawie dokonać wyznaczenia tej wielkości. W niniejszym rozdziale zawarta została analiza budowy/konstrukcji równań macierzowych z podaniem postaci tych równań dla wybranych układów czujników FBG do pomiaru odkształcenia i temperatury. W związku z bardzo dużą liczbą rozwijanych obecnie układów ze światłowodowymi siatkami Bragga stosowanych do pomiaru odkształcenia i temperatury, dokonany został ich przegląd, analiza i podział na kategorie w oparciu o różne kryteria. Najważniejsze to: zasada działania wykorzystywana w czujniku, rodzaj parametru siatki, który zostaje wykorzystany do określania wielkości mierzonej, jak również rodzaj (typ) i ilość wykorzystywanych siatek.

Uzyskanie równań macierzowych układów z siatkami Bragga dla równoległego pomiaru odkształcenia i temperatury należy rozpocząć od zapisania zależności na długość fali Bragga dla siatki równomiernej, która przyjmuje następującą postać:

$$\lambda_B = 2n_{eff} \cdot \Lambda, \quad (2.1)$$

gdzie n_{eff} jest efektywnym współczynnikiem załamania światła w rdzeniu włókna, na którym zapisana jest siatka, Λ jest okresem siatki, nazywanym również stałą siatki. Pojawienie się zmian temperatury ΔT i odkształcenia $\Delta \varepsilon$ powoduje zmianę długości fali Bragga zgodnie z zależnością:

$$\Delta \lambda_B = 2 \left(\Lambda \frac{\partial n_{eff}}{\partial \varepsilon} + n_{eff} \frac{\partial \Lambda}{\partial \varepsilon} \right) \Delta \varepsilon + 2 \left(\Lambda \frac{\partial n_{eff}}{\partial T} + n_{eff} \frac{\partial \Lambda}{\partial T} \right) \Delta T, \quad (2.2)$$

w którym T oznacza temperaturę siatki, ε jest jej odkształceniem względnym, opisywanym zależnością:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}, \quad (2.3)$$

gdzie Δl określa zmianę długości siatki, l_0 jest jej długością początkową.

Niech P_1 oraz P_2 oznaczają dwa różne parametry siatki Bragga, które ulegną zmianie wskutek wywołanego odkształcenia lub zmian temperatury siatki. Macierzowe równanie przetwarzania czujnika temperatury i odkształcenia przyjmuje wówczas następującą postać:

$$\begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{T1} & K_{\varepsilon 1} \\ K_{T2} & K_{\varepsilon 2} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} T \\ \varepsilon \end{bmatrix}, \quad (2.4)$$

gdzie K_{T1} jest czułością parametru P_1 na temperaturę, K_{T2} jest czułością parametru P_2 na temperaturę, $K_{\varepsilon 1}$ to czułość parametru P_1 na odkształcenie, zaś $K_{\varepsilon 2}$ oznacza czułość parametru P_2 na odkształcenie. Analizując równanie (2.4) można zauważyć, że równoczesny pomiar odkształcenia i temperatury możliwy jest do realizacji wówczas, gdy dla danego układu pomiarowego wyznaczymy dwa różne parametry siatki (lub układu kilku siatek), które wykazują różną czułość na rozważane wielkości oraz spełniona będzie nierówność $P_1 \neq P_2$. Analiza równania (2.4) pozwala również wnioskować, że znając (lub wyznaczając, np. eksperymentalnie) czułości poszczególnych parametrów P_1 oraz P_2 na odkształcenia, odpowiednio K_{T1} , $K_{\varepsilon 1}$ oraz K_{T2} , $K_{\varepsilon 2}$, można wyznaczyć temperaturę i odkształcenie jednocześnie.

Wyznaczając dopełnienia algebraiczne wszystkich czułości K_{T1} , $K_{\varepsilon 1}$, K_{T2} oraz $K_{\varepsilon 2}$ z równania (2.4) otrzymuje się:

$$\begin{aligned} d_{11} &= (-1)^{1+1} \cdot K_{\varepsilon 2} = K_{\varepsilon 2}, & d_{12} &= (-1)^{1+2} \cdot K_{T2} = -K_{T2}, \\ d_{21} &= (-1)^{2+1} \cdot K_{\varepsilon 1} = -K_{\varepsilon 1}, & d_{22} &= (-1)^{2+2} \cdot K_{T1} = K_{T1} \end{aligned}, \quad (2.5)$$

co przy spełnieniu warunku niezerowego wyznacznika macierzy z równania (2.4) pozwala na budowę jej macierzy dopełnień, na podstawie równania (2.5), którą można zapisać w postaci:

$$\begin{bmatrix} T \\ \varepsilon \end{bmatrix} = \frac{1}{D} \begin{bmatrix} K_{\varepsilon 2} & -K_{\varepsilon 1} \\ -K_{T2} & K_{T1} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \end{bmatrix}, \quad (2.6)$$

gdzie D jest wyznacznikiem macierzy z równania (2.4) i jest równy:

$$D = K_{T1}K_{\varepsilon 2} - K_{T2}K_{\varepsilon 1}. \quad (2.7)$$

Warunek różnych stosunków czułości parametrów P_1 i P_2 na temperaturę i odkształcenie daje możliwość równoczesnego wyznaczenia odkształcenia i temperatury poprzez pomiar wartości tych parametrów. Zakładając, że mierzonymi parametrami P_1 i P_2 są przesunięcia długości fali Bragga $\Delta\lambda_{B1}$ i $\Delta\lambda_{B2}$ oraz znając wartości stałych światłowodu, na którym zapisana jest siatka, możemy wyznaczyć teoretyczne wartości czułości na temperaturę

i odkształcenie. Czułość długości fali na temperaturę zdefiniowana jest zależnością:

$$K_T = \frac{\Delta\lambda_B}{\Delta T} = k_T \cdot \lambda_B \quad (2.8)$$

gdzie k_T jest współczynnikiem względnej czułości na temperaturę równym.

$$k_T = (\alpha_\Lambda + \alpha_n) K^{-1} = \left[\left(\frac{1}{\Lambda} \frac{\partial \Lambda}{\partial T} \right) + \left(\frac{1}{n_{eff}} \frac{\partial n_{eff}}{\partial T} \right) \right] K^{-1}. \quad (2.9)$$

Parametr α_Λ jest współczynnikiem rozszerzalności temperaturowej światłowodu (dla szkła kwarcowego jego wartość wynosi $0,55 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$), α_n jest współczynnikiem termo-optycznym ($\alpha_n = 8,6 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$).

Czułość długości fali na odkształcenie definiowana jest z kolei następującą zależnością:

$$K_\varepsilon = \frac{\Delta\lambda_B}{\Delta\varepsilon} = k_\varepsilon \cdot \lambda_B, \quad (2.10)$$

w której k_ε oznacza współczynnik względnej czułości na odkształcenie i jest równy:

$$k_\varepsilon = 1 - p_e, \quad (2.11)$$

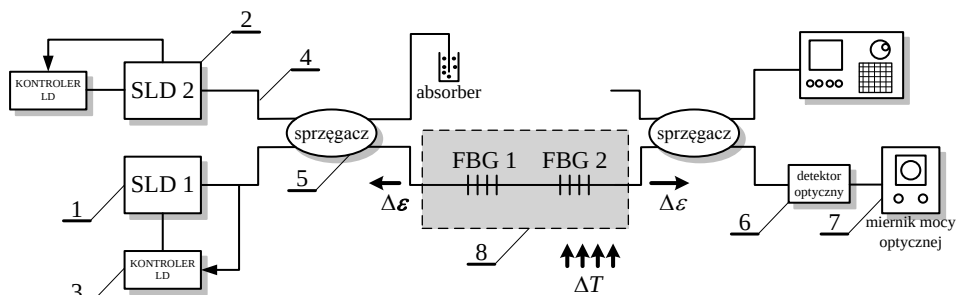
gdzie p_e jest współczynnikiem elastooptycznym opisującym zmianę współczynnika załamania światła włókna pod wpływem odkształcenia ($p_e \approx 0,22$).

Na podstawie analizy równania (2.8) i (2.10) możliwe jest określenie czułości odkształceniowej i temperaturowej siatki dla danej długości fali Bragga. Podstawiając równanie (2.9) do równania (2.8) oraz (2.11) do (2.10) i uwzględniając wartości charakterystycznych współczynników uzyskuje się teoretyczne wartości czułości siatki na temperaturę i odkształcenie równe odpowiednio $K_T = 14,2 \text{ pm/K}$ oraz $K_\varepsilon = 1,2 \text{ nm/m}\varepsilon$.

Skoro siatka reaguje na zmiany odkształcenia i temperatury przesunięciem długości fali Bragga, zgodnie z równaniem (2.2) to można przyjąć, że parametrami P_1 i P_2 , w oparciu o które wyznacza się rozważane wielkości będą przesunięcia długości fali Bragga, np. układu dwóch siatek $\Delta\lambda_{B1}$ i $\Delta\lambda_{B2}$. W tej sytuacji stosować można układ różnicowy, w którym wykorzystywane jest przesunięcie długości fali Bragga dwóch siatek $\Delta\lambda_{B1}$ i $\Delta\lambda_{B2}$ spowodowane zmianą temperatury [107], odkształcenia [100], siły [81] lub dyspersji [47]. Stosowany jest również pomiar dwóch różnych długości fali Bragga [191].

2.2. Równoczesny pomiar odkształcenia i temperatury z wykorzystaniem dwóch jednorodnych siatek Bragga

Teoretyczne rozważania i analiza z wykorzystaniem równań macierzowych zawarte w rozdziale 2.1 potwierdzone zostały empirycznie w laboratorium. Zastosowanie czujnika FBG do pomiaru odkształcenia zweryfikowano na zbudowanym stanowisku laboratoryjnym z wykorzystaniem dwóch światłowodowych siatek Bragga o różnej długościach fali Bragga, w układzie pomiarowym przedstawionym na rysunku 2.1.



Rys. 2.1. Schemat układu pomiarowego wykorzystywanego do jednoczesnego pomiaru odkształcenia i temperatury. SLD 1 i SLD 2 – diody superluminescencyjne na długości fali odpowiednio 1325 nm i 1550 nm

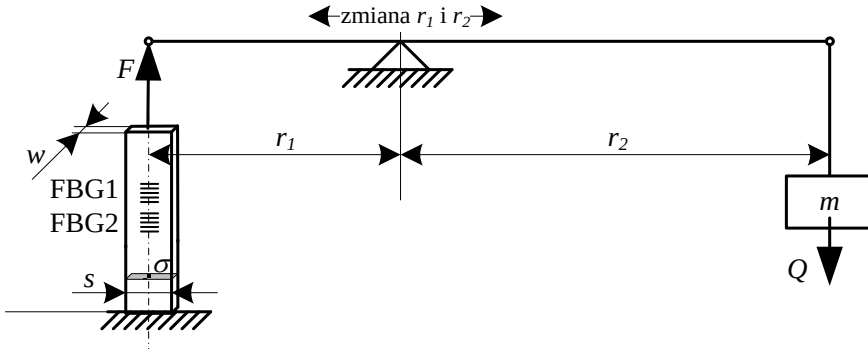
Światło z przestrajalnej diody superluminescencyjnej (nr 1 na rys. 2.1) o centralnej długości fali równej 1050 nm oraz szerokości połówkowej pasma (FWHM) równej 50 nm, sterowanej przy wykorzystaniu kontrolera (nr 3 na rys. 2.1) mocy i temperatury diody jest kierowane włóknem jednomodowym SMF-28 na sprzęgacz światłowodowy (nr 5 na rys. 2.1). Jednocześnie światło z drugiej diody SLD 2 (nr 2 na rys. 2.1) o środkowej długości fali 1550 nm i szerokości transmisyjnej charakterystyki widmowej równej 110 nm jest kierowane przez ten sam sprzęgacz światłowodowy do układu dwóch siatek FBG1 i FBG2. Siatki zapisane były na światłowodzie jednomodowym, pompowanym wodorem przy użyciu techniki maski fazowej w ten sposób, że ich długości fali Bragga wyniosły odpowiednio $\lambda_{B1} = 1035,250$ nm oraz $\lambda_{B2} = 1565,035$ nm. Sygnał po przejściu przez układ siatek był całkowany przy wykorzystaniu detektora optycznego, a widmo rejestrowane przy użyciu analizatora widma optycznego (OSA – ang.: *Optical Spectrum Analyzer*) o rozdzielczości 0,01 nm. Siatki naklejone do wspornika zostały umieszczone w specjalnie zaprojektowanej komorze temperaturowej (nr 8 na rys. 2.1) o kontrolowanej i regulowanej temperaturze przepływającego powietrza.

Dla takiego układu z dwiema siatkami Bragga o różnych długościach fali, przy różnych temperaturach równanie macierzowe (2.4) przyjmie następującą postać:

$$\begin{bmatrix} \Delta\lambda_{B1} \\ \Delta\lambda_{B2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{T1} & K_{\varepsilon1} \\ K_{T2} & K_{\varepsilon2} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta T \\ \Delta \varepsilon \end{bmatrix}, \quad (2.12)$$

gdzie $\Delta\lambda_{B1}$ i $\Delta\lambda_{B2}$ oznaczają zmianę (rozumianą jako przesunięcie) długości fali Bragga odpowiednio siatki FBG1 i FBG2, K_{T1} oraz $K_{\varepsilon1}$ są w rozważanym układzie czułościami siatki FBG1 odpowiednio na temperaturę i odkształcenie, natomiast K_{T2} i $K_{\varepsilon2}$ oznaczają czułości siatki FBG2 na temperaturę i odkształcenie.

Czułości na odkształcenie obydwu siatek $K_{\varepsilon1}$ i $K_{\varepsilon2}$ zostały określone eksperymentalnie poprzez pomiar przesunięć długości fali Bragga siatek oraz wywołanie ich odkształcenia przy stałej temperaturze. Czułości temperaturowe K_{T1} i K_{T2} wyznaczone zostały eksperymentalnie, podczas pomiaru przesunięć długości fali Bragga siatek w różnych temperaturach, ale przy stałym odkształceniu. Siatki zostały naklejone na metalową próbkę, która następnie była poddana sile rozciągającej o znanej wartości, w układzie przedstawionym na rysunku 2.2.



Rys. 2.2. Schemat układu eksperymentalnego wykorzystywanego do wywoływania zadanych wartości odkształcenia mierzonego zaproponowanym czujnikiem

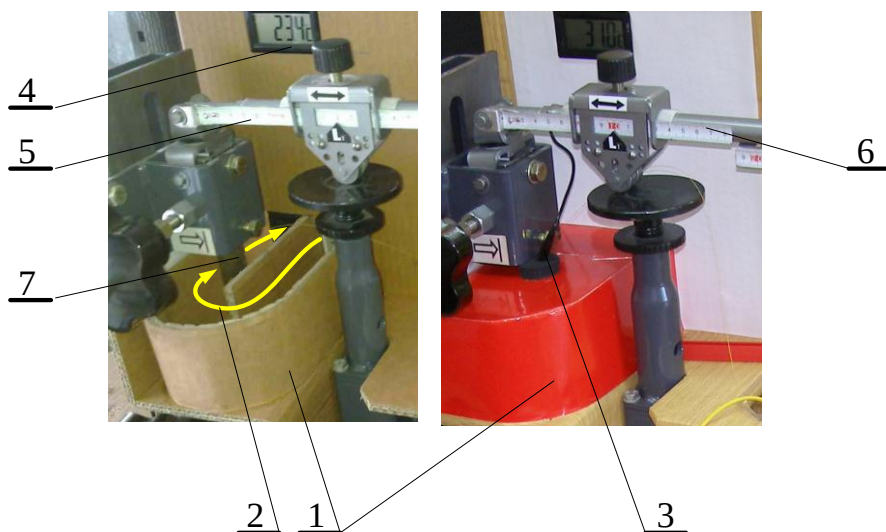
Uwzględniając równość momentów sił F i Q oraz równość długości ramion, na których działają siły, a także wartość naprężenia w próbce σ i jej fizyczne rozmiary, możliwe jest wyznaczenie wartości odkształcenia jakiemu ulegnie próbka, zgodnie z zależnością:

$$\varepsilon = \frac{m \cdot g \cdot r_2 / (r_1 \cdot w \cdot s)}{E}, \quad (2.13)$$

gdzie r_2 jest długością ramienia, na którym działa siła Q , r_1 jest długością ramienia, na którym działa siła F , Q jest siłą ciężkości, m jest masą ciężarka zamocowanego na końcu ramienia r_2 , g jest przyspieszeniem ziemskim, s i w są

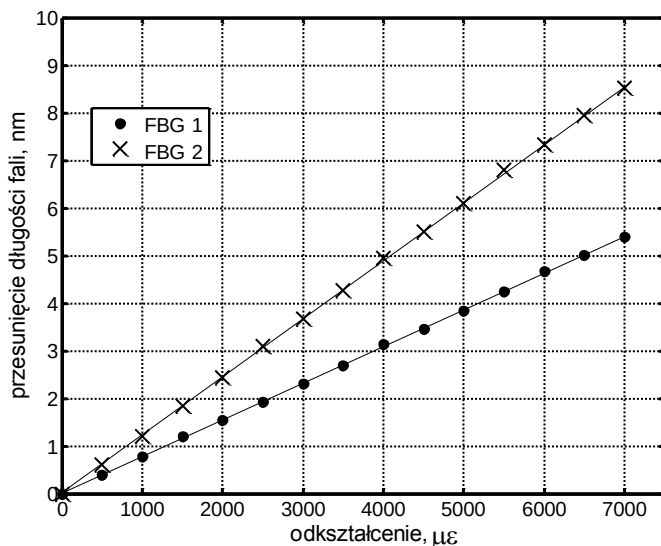
odpowiednio szerokością i grubością próbki ($s = 10 \text{ mm}$, $w = 1 \text{ mm}$), natomiast E jest modułem Younga ($E \approx 20,55 \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2$).

Badania temperaturowe wykonywane z wykorzystaniem komory termicznej (rys. 2.3) umożliwiły bezpośrednie pomiary temperatur, co wyeliminowało konieczność ich wyznaczania na podstawie wartości pośrednich, tak jak to miało miejsce w przypadku pomiaru poprzedniej wielkości (odkształcenia) – zgodnie z równaniem (2.13).



Rys. 2.3. Zdjęcie komory termicznej wykorzystywanej w eksperymencie z oznaczeniem elementów charakterystycznych. 1 – komora termiczna, 2 – kierunek przepływu powietrza, 3 – sonda termometru, 4 – pomiar temperatury, 5 – ramię r_1 , 6 – ramię r_2 , 7 – rozciągana próbka

Wykonanie serii pomiarów kalibracyjnych (wzorcujących) pozwala na wyznaczenie czułości siatek na obydwie wielkości mierzone. Następnie na podstawie zmian parametrów siatki oraz odwróceniu macierzy (2.12) możliwe jest jednocześnie wyznaczenie temperatury oraz odkształcenia. Inwolucja macierzy była możliwa ze względu na jej dobre uwarunkowanie. Wyniki pomiarów długości fali w funkcji odkształcenia zostały przedstawione na rysunku 2.4, a pomiary w funkcji zmiennej wartości temperatury przedstawiono na rysunku 2.5.



Rys. 2.4. Wyniki pomiarów eksperymentalnych dla zmiennego odkształcenia i stałej temperatury równej 23,5°C

Wyniki uzyskane podczas eksperymentów ze zmiennym odkształceniem, (rys. 2.4), zostały poddane regresji liniowej [6]. Wyznaczono proste, na podstawie których określony został błąd nieliniowości charakterystyki przetwarzania czujnika. Nieliniowość określona została na podstawie wielkości błędu nieliniowości, obliczonego zgodnie z zależnością (2.14) [115]:

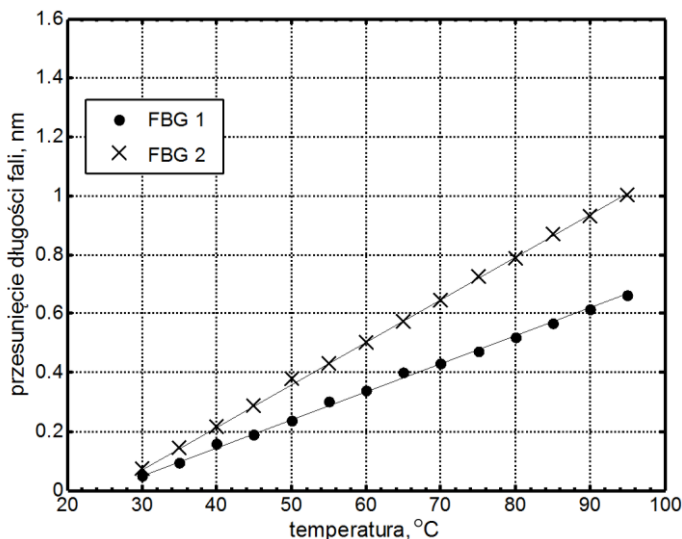
$$\delta_{nl} = \frac{\Delta(\Delta\lambda_{Bi})_{MAX}}{(\Delta\lambda_{Bi})_{MAX} - (\Delta\lambda_{Bi})_{MIN}} \cdot 100\%, \quad (2.14)$$

gdzie $\Delta(\Delta\lambda_{Bi})_{MAX}$ jest wartością maksymalną bezwzględnych różnic pomiędzy wyznaczoną na podstawie równania prostej regresji, a prostą uzyskaną z wyników pomiarów. Indeks i oznacza numer siatki, dla której obliczony jest błąd ($i = 1$ lub 2 odpowiednio dla FBG1 i FBG2), $(\Delta\lambda_{Bi})_{MAX}$ i $(\Delta\lambda_{Bi})_{MIN}$ są odpowiednio wartością maksymalną i minimalną różnic przesunięcia długości fali Bragga i -tej siatki.

Wyznaczone w ten sposób wartości błędów nieliniowości wyniosły $\delta_{nl\epsilon1} = 0,06\%$ oraz $\delta_{nl\epsilon2} = 0,08\%$ odpowiednio dla FBG1 i FBG2. Współczynniki korelacji regresji liniowej Pearsona [38] wyniosły 0,987 dla FBG1 i 0,985 dla FBG2.

Na podstawie kąta nachylenia prostych regresji określono wartości czułości na odkształcenie siatek stosowanych w badaniach. Wyniosły one odpowiednio $K_{\epsilon1} = 0,77 \text{ nm}/\mu\epsilon$ oraz $K_{\epsilon2} = 1,22 \text{ nm}/\mu\epsilon$.

Kolejnym krokiem badań laboratoryjnych było wyznaczenie błędów nieliniowości charakterystyki przetwarzania zbudowanego czujnika – tym razem wykorzystanego do pomiaru temperatury. Wyniki pomiarów przedstawiono na rysunku 2.5. W tym przypadku błędy nieliniowości wyniosły 3,43% oraz 2,36%, natomiast czułości temperaturowe $K_{T1} = 9,45 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ oraz $K_{T2} = 14,34 \text{ pm}/^\circ\text{C}$, odpowiednio dla siatki FBG1 i FBG2.



Rys. 2.5. Wyniki pomiarów eksperymentalnych dla zmiennej wartości temperatury i stałej wartości odkształcenia

Nową macierz z równania 2.6 można zapisać – po uwzględnieniu wartości wyznaczonych w eksperymencie – w postaci:

$$\begin{bmatrix} T \\ \varepsilon \end{bmatrix} = \frac{1}{0,49} \begin{bmatrix} 1,22\text{nm}/m\varepsilon & -0,77\text{nm}/m\varepsilon \\ -14,34\text{pm}/^\circ\text{C} & 9,45\text{pm}/^\circ\text{C} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta\lambda_{B1} \\ \Delta\lambda_{B2} \end{bmatrix}. \quad (2.15)$$

Niezerowy wyznacznik macierzy D , świadczy o tym, że macierz zawierająca współczynniki czułości długości fali na temperaturę i odkształcenie jest dobrze uwarunkowana.

Podsumowując powyższe rozważania można wywnioskować, że możliwe jest dokonywanie jednoczesnego pomiaru odkształcenia i temperatury przy wykorzystaniu dwóch siatek Bragga o dwóch różnych stałych rezonansowych. Błędy pomiaru przesunięcia długości fali zostają zdeterminowane rozdzielczością analizatora widma (0,01 nm). Znając rozdzielczość OSA możliwe staje się określenie błędów wyznaczenia współczynników K_{T1} , $K_{\varepsilon1}$, K_{T2} oraz $K_{\varepsilon2}$. To z kolei pozwala na wyznaczenie błędu standardowego wyznacznika macierzy D . Wniosek: w celu uzyskania dużej czułości pomiarowej należy tak konstruować układ pomiarowy, aby uzyskać jak największą wartość

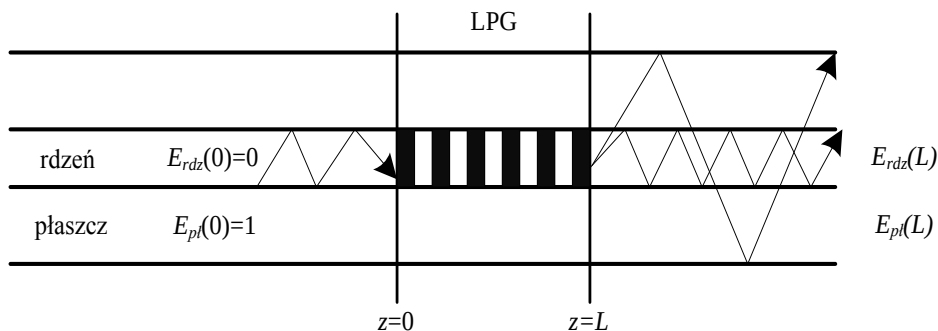
bezwzględny wyznacznik macierzy $|D|$. Jest to możliwe gdy dwa składniki w równaniu (2.7) $K_{T1} K_{\varepsilon 2}$ oraz $K_{T2} K_{\varepsilon 1}$ będą miały przeciwne znaki. Warto zwrócić uwagę na ten element, bowiem w wielu pracach bezwzględne wartości analogicznych czynników są bardzo niekorzystnie zbliżone [285]. Większą różnicę pomiędzy przedmiotowymi czynnikami można by było uzyskać poprzez dobór innego rodzaju światłowodu o dużej dwójłomności (np. włókna z eliptycznym rdzeniem) [67].

Z przeprowadzonej analizy wynika dodatkowo wniosek, że jeżeli w charakterze czujnika do pomiaru odkształcenia i temperatury wykorzystujemy dwa elementy światłowodowe (np. siatki Bragga) o podobnych czułościach, należy dobierać elementy o przeciwnych kierunkach reakcji na jeden typ wielkości (np. odkształcenia) i jednocześnie o takich samych kierunkach reakcji na drugą wielkość (np. temperaturę).

Przenosząc powyższą zasadę w obszar innych zastosowań pomiarowych, należałoby tak dobierać dwa typy elementów światłowodowych (nie muszą to być jedynie siatki Bragga) lub tak organizować sposób ich umieszczania i montowania na obiekcie mierzonym, aby ich czułości na jedną z mierzonych wielkości miały przeciwny znak i jednocześnie miały taki sam znak i wartość dla drugiej z mierzonych wielkości.

2.3. Wykorzystanie właściwości siatki długookresowej

Równoczesnego pomiaru odkształcenia i temperatury można również dokonywać przy wykorzystaniu długookresowych siatek Bragga [230]. Właściwości propagacyjne LPG sprawiają, że tryby rdzeniowe ulegają sprzęgnięciu do trybów płaszczowych (rys. 2.6).

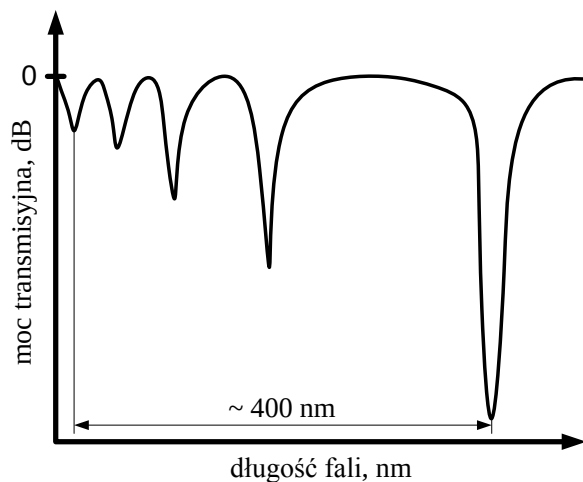


Rys. 2.6. Mechanizm sprzęgnięcia trybów w siatce LPG o długości L

Sprzęgnięte tryby płaszczowe zanikają gwałtownie podczas propagacji wzdłuż światłowodu z powodu jego zgięć. Granica pomiędzy płaszczem a materiałem otaczającym płaszcz charakteryzuje się dużą stratnością, co dodatkowo wytłumia tryby płaszczowe. W wyniku tego zjawiska w widmie transmisyjnym siatki powstaje szereg rezonansowych pasm zaporowych [214]. Podobnie jak w przypadku zwykłej siatki Bragga, długość fali, dla której zachodzi rezonans w przypadku siatki LPG musi spełniać warunek dopasowania fazy [169]:

$$\lambda_{rez} = (n_{co,eff}^{01} - n_{cl,eff}^m) \Lambda, \quad (2.15)$$

gdzie $n_{co,eff}^{01}$ oraz $n_{cl,eff}^m$ są efektywnymi współczynnikami załamania światła odpowiednio głównego trybu rdzenia oraz m -tego trybu płaszczu, Λ jest okresem siatki.



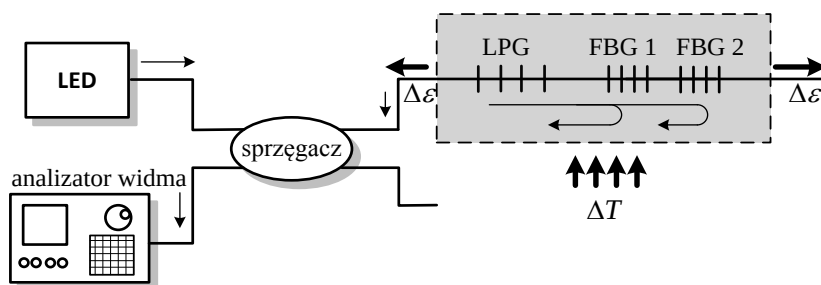
Rys. 2.7. Widmo transmisyjne siatki LPG w szerokim zakresie długości fal, na którym widać kilka różnych modów LP_{0m} , do których sprzęgany jest podstawowy mod rdzeniowy

Na rysunku 2.7 przedstawione zostało widmo transmisyjne LPG. Charakterystyka ta wykazuje szereg zaporowych minimów w zakresie długości fali od 900 nm do 1400 nm. Obecnie rozwijane są metody syntezy siatek długookresowych, które pozwalają na modelowanie zarówno ich charakterystyk transmisyjnych jak i odbiciowych [124]. Modulacja właściwości sprzęgania modu rdzeniowego do modów płaszczowych zmienia odpowiedź widmową LPG, co jest kluczowym efektem wykorzystywanym w czujnikach LPG do pomiaru odkształcenia [92], temperatury [15, 182], odkształcenia [10], zgięcia [31], ciśnienia [21, 166], obciążenia mechanicznego [272, 291], koncentracji substancji [59] oraz współczynnika załamania światła [11, 91, 168, 261].

Zmiany wielkości mierzonych są widoczne w postaci modulacji pasm zaporowych LPG, zależnych od długości fali. Średnia czułość temperaturowa LPG jest znacznie większa niż w przypadku FBG i jednocześnie jest silnie zależna od typu światłowodu, na którym zapisana jest siatka LPG oraz od struktury samej siatki. Należy zwrócić uwagę, że w przypadku pomiarów temperatury i odkształcenia przesunięcie długości fali modów płaszczowych LPG może odbywać się jako niebieskie (przesunięcie w kierunku krótszych długości fali) lub czerwone (przesunięcie w kierunku dłuższych fal) [149, 206], w zależności od właściwości dyspersyjnych światłowodu, na którym zapisana jest LPG. Duża czułość temperaturowa siatek LPG – poza pracami, gdzie jest ona szczególnie potrzebna [231] – wpływa w sposób niezamierzony na ich charakterystykę spektralną. Zjawisko czułości skrośnej LPG na temperaturę ma znaczący wpływ na pomiary innych wielkości fizycznych przy ich wykorzystaniu. Problem ma dwojaki charakter. W niektórych zastosowaniach czułość na temperaturę jest potrzebna, ze względu na potrzebę pomiaru tej

wielkości. W innych układach istnieje konieczność skutecznego wyeliminowania czułości temperaturowej, gdyż prowadzi ona do niestabilności pomiaru innej niż temperatura wielkości.

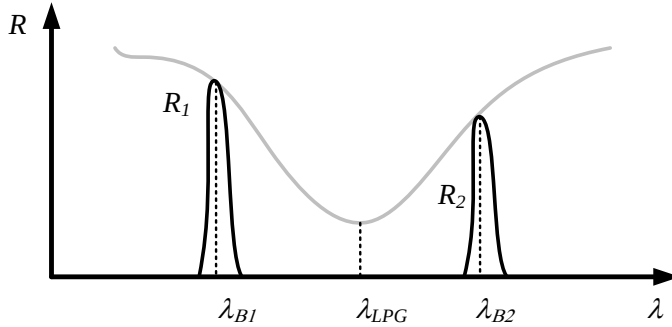
Przesunięcie widmowe LPG spowodowane zmianami wielkości zewnętrznej jest funkcją właściwości światłowodu, na którym zapisana jest siatka, okresu siatki oraz rzędu odpowiedniego modu płaszczowego. Spotykane są rozwiązania, w których do jednoczesnego pomiaru kilku parametrów wykorzystuje się różnicową modulację kilku rezonansowych pasm zaporowych LPG [77]. Rozwijane są układy wykorzystujące siatki długookresowe pracujące razem ze zwykłymi, jednorodnymi siatkami Bragga [57, 175, 270, 275]. Analizowane poniżej metody wykorzystują różnice w odpowiedziach na odkształcenie i temperaturę siatki długookresowej i zwykłej siatki jednorodnej. Przy pomiarach wykorzystuje się wówczas fakt, że siatka długookresowa posiada znacznie większą odpowiedź na zmiany temperatury niż siatka FBG i jednocześnie mniejszą czułość na odkształcenie niż w przypadku FBG. Najczęściej wykorzystuje się w takim przypadku metodę przesłuchiwania charakterystyki transmisyjnej LPG przy użyciu widm odbiciowych dwóch siatek FBG, co wykonywane jest w układzie przedstawionym na rysunku 2.8.



Rys. 2.8. Schemat układ pomiarowego wykorzystywanego do równoczesnego pomiaru odkształcenia i temperatury czujnikiem z siatkami LPG i FBG

Czujnik składa się zwykle z trzech siatek o zbliżonych długościach fali głównego rezonansu dobranych tak, że spełniony jest warunek: $\lambda_{B1} < \lambda_{LPG} < \lambda_{B2}$, przy czym długości fal siatek FBG leżą w punkcie, gdzie występuje 50% transmisji LPG (rys. 2.9). FBG są zapisywane na jednym włóknie, a następnie łączone z LPG. Odpowiedź FBG na zmianę odkształcenia i temperatury zależy od zmiany okresu siatki oraz zmiany współczynnika załamania rdzenia włókna, na którym zapisana jest siatka. Odpowiedź LPG zależy od zmiany okresu siatki oraz od różnicowej zmiany współczynników załamania światła rdzenia i płaszczu i zależy silnie od typu światłowodu. Rysunek 2.9 zawiera przykładowe widma dwóch FBG i jednej LPG, dla układu przedstawionego na rysunku 2.8. Światło z szerokopasmowego źródła światła przechodząc przez LPG jest odbijane przez FBG i po ponownym przejściu przez LPG jest

kierowane do analizatora widma optycznego, który mierzy jedynie moc odbitą przez dwie siatki FBG.



Rys. 2.9. Widmo transmisyjne siatki LPG wraz z charakterystykami odbiciowymi dwóch FBG

Na rysunku 2.9 R_1 i R_2 oznaczają współczynniki odbicia, które określają jednocześnie wysokości maksimów odbiciowych, odpowiednio siatki FBG1 i FBG2.

Czułość temperaturowa siatki LPG jest kilkukrotnie większa od czułości FBG, podczas gdy czułość na odkształcenie siatki LPG jest w przybliżeniu dwukrotnie mniejsza niż w przypadku siatki FBG. Wywołanie odkształcenia czujnika lub zmiana temperatury powodują zmianę różnicy R_1 i R_2 gdyż czułość siatki LPG jest różna od czułości siatek FBG. Wartość przesunięcia długości fali odpowiadającej głównemu rezonansowi, spowodowanego zmianą odkształcenia λ_{LPG} , jest mniejsza od wartości przesunięcia długości fal λ_{B1} i λ_{B2} , zatem zmiana odkształcenia powodować będzie spadek R_1 i nieznaczny wzrost R_2 . Przesunięcie długości fali λ_{LPG} wywołane temperaturą jest jednak większe niż odpowiednie przesunięcia λ_{B1} i λ_{B2} , stąd zmiana temperatury spowoduje wzrost R_1 i znaczny spadek wartości R_2 . Opisany typ czujnika może być wykorzystany do określenia odkształcenia na podstawie zmian długości fali FBG oraz temperatury na podstawie wielkości, której wartość opisana jest funkcją współczynników odbicia zarówno R_1 jak i R_2 . W ten sposób równanie macierzowe (2.12) w przypadku opisywanego układu pomiarowego przyjmie postać:

$$\begin{bmatrix} \Delta\lambda_{B2} \\ X(R_1, R_2) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{T2} & K_{\varepsilon 2} \\ K_{TX} & K_{\varepsilon X} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta T \\ \Delta \varepsilon \end{bmatrix}, \quad (2.16)$$

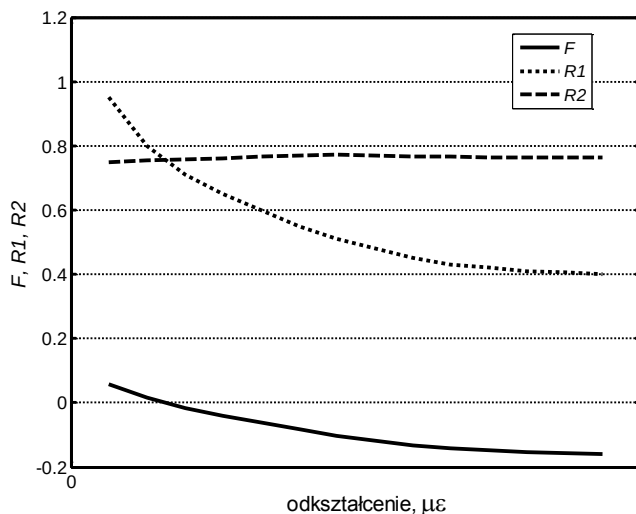
gdzie $X(R_1, R_2)$ jest wspomnianą funkcją współczynników odbicia siatek FBG1 i FBG2, $\Delta\lambda_{B2}$ jest przesunięciem długości fali Bragga siatki FBG2. K_{TX} jest czułością parametru funkcji $X(R_1, R_2)$ na temperaturę, K_{T2} jest czułością zmian długości fali Bragga drugiej siatki FBG ($\Delta\lambda_{B2}$) na temperaturę, $K_{\varepsilon X}$ oznacza

czułość funkcji $X(R_1, R_2)$ na odkształcenie, zaś $K_{\lambda 2}$ oznacza czułość długości fali Bragga siatki FBG2 na odkształcenie. Równanie macierzowe (2.16) może być wykorzystywane do wzorcowania i jednoczesnych pomiarów odkształcenia i temperatury przy wykorzystaniu czujnika LPG/FBG. Zakładając, że przy odpowiednio dobranych siatkach, macierz z równania (2.16) jest dobrze uwarunkowana, uzyskujemy – po odwróceniu równania – macierz opisującą równania przetwarzania czujnika. Mogą one być wykorzystane do wyznaczania odkształcenia i temperatury na podstawie zmian długości fali Bragga siatki FBG2 i funkcji X . Czujnik można wzorcować poprzez pomiar przesunięcia długości fali jednej z FBG oraz wyznaczenie wartości funkcji X przy znanych wartościach temperatury otoczenia i wywołanego odkształcenia. Wartości X oraz λ_{B2} dla celów kalibracji można zmierzyć stosując analizator widma. W celu analizy sygnałów odbitych od siatek, funkcję X zmiennych R_1 i R_2 zdefiniowano w następujący sposób [175, 212]:

$$F(R_1, R_2) = \frac{(\sqrt{R_1} - \sqrt{R_2})}{(\sqrt{R_1} + \sqrt{R_2})}. \quad (2.17)$$

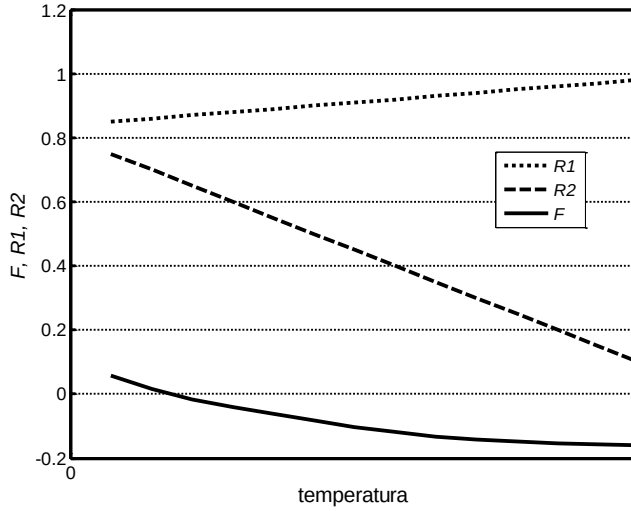
Różnica $\sqrt{R_1} - \sqrt{R_2}$ podzielona przez sumę $\sqrt{R_1} + \sqrt{R_2}$ uniezależnia układ pomiarowy od fluktuacji mocy źródła światła.

Na rysunku 2.10 przedstawiono wyniki symulacji współczynników odbicia R_1 i R_2 oraz parametru $F(R_1, R_2)$ przy zmiennym odkształceniu i stałej temperaturze.



Rys. 2.10. Wykresy przedstawiające wyniki symulacji współczynników odbicia R_1 , R_2 oraz parametru F dla stałej temperatury i zmiennego odkształcenia

Kształt charakterystyki zmian R_1 , R_2 oraz parametru F dla zmiennej temperatury i stałego naprężenia przedstawia rysunek 2.11.



Rys. 2.11. Wykresy przedstawiające wyniki symulacji współczynników odbicia R_1 , R_2 oraz parametru F dla stałego naprężenia i zmiennej temperatury

Uzyskane wyniki pozwalają na określenie czułości elementów macierzy z równania (2.16) i zapisanie układu równań dla $F(R_1, R_2)$ oraz λ_{B2} w funkcji odkształcenia ε i temperatury T :

$$\begin{bmatrix} F(R_1, R_2) \\ \Delta\lambda_{B2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -5 \times 10^{-5} & 7 \times 10^{-3} \\ 1.03 \times 10^{-3} & 8.7 \times 10^{-3} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \varepsilon \\ T \end{bmatrix}. \quad (2.18)$$

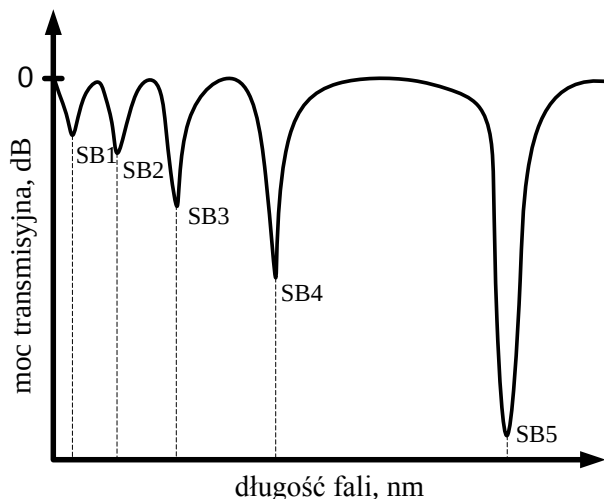
W celu określenia odkształcenia i temperatury na podstawie wielkości $F(R_1, R_2)$ i λ_{B2} , należy odwrócić równanie macierzowe 2.18.

Prezentowane wyniki potwierdzają, że przedstawiony układ czujnika ze światłowodowymi siatkami Bragga FBG i LPG może być wykorzystany do niezależnego i jednoczesnego pomiaru rozważanych w niniejszym rozdziale wielkości mierzonych (odkształcenia i temperatury). Czujnik do równoczesnego pomiaru odkształcenia i temperatury mógłby również składać się z jednej siatki LPG i jednej siatki FBG. W takiej sytuacji określenie wielkości mierzonych wymagałoby pomiaru długości fali rezonansu podstawowego modu rdzeniowego siatki LPG oraz długości fali Bragga siatki FBG. Podejście takie jest trudne do realizacji, gdyż siatka LPG posiada szerokie (kilka razy szersze w porównaniu do FBG) pasmo. Układ detekcji przesunięcia długości fali LPG wymagałby zastosowania oprzyrządowania podobnego do tego, które wykorzystuje się podczas pomiaru widma odbiciowego FBG. Występujące w widmie siatki LPG błędy zmniejszają dokładność metody.

2.4. Układy oparte na parze siatek długookresowych (LPGP)

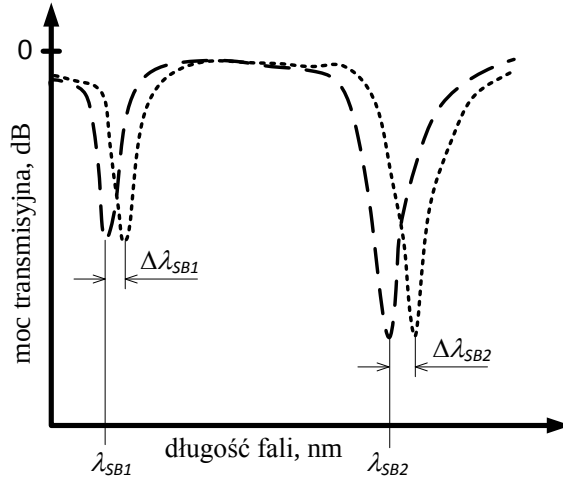
Równoczesnego pomiaru odkształcenia i temperatury można dokonywać przy wykorzystaniu pojedynczych FBG lub układu FBG + LPG. Poniżej przedstawiono zasadę i wyniki pomiarów wspomnianych wielkości metodą wykorzystującą parę siatek LPG (LPGP) [48]. Porównaniem zostaną objęte również uwarunkowania metrologiczne układu LPGP z dwoma układami opartymi na poszczególnych siatkach wchodzących w skład pary LPGP. Układ z pojedynczą siatką FBG1 oraz układ z pojedynczą FBG2, która wchodziła w skład LPGP przeanalizowano osobno pod kątem wybranych właściwości metrologicznych i możliwości zastosowania.

W pomiarach z zastosowaniem siatek długookresowych wykorzystuje się fakt, że w widmie siatki można wyróżnić wiele pasm zaporowych (SB – ang.: *Stop Bands*) [1], zaznaczonych na rysunku 2.12.



Rys. 2.12. Widmo transmisyjne siatki LPG z zaznaczonymi pasmami zaporowymi

Występowanie kilku pasm zaporowych jest szczególnie pożądaną cechą, wykorzystywaną głównie do pomiarów kilku wielkości fizycznych [15, 269, 277]. Na rysunku 2.12 przedstawione są charakterystyki widmowe siatki LPG w przypadku zmiany temperatury.



Rys. 2.13. Przesunięcie pasm zaporowych siatki długookresowej zapisanej na standardowym światłowodzie telekomunikacyjnym przy zmianie temperatury

Przesunięcie długości fali $\Delta\lambda_{SB1}$ na jednostkę zmiany temperatury zostało oznaczone jako A , natomiast przesunięcie tego samego pasma zaporowego na jednostkę zmiany odkształcenia jako B . Opisując analogiczne przesunięcia zmiany długości fali $\Delta\lambda_{SB2}$ na jednostkę temperatury i odkształcenia odpowiednio jako C i D , można dla równoczesnego pomiaru zmiany temperatury ΔT oraz odkształcenia $\Delta\epsilon$ macierzowe równanie przetwarzania czujnika zapisać w następującej postaci:

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta T \\ \Delta\epsilon \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta\lambda_{SB1} \\ \Delta\lambda_{SB2} \end{bmatrix}. \quad (2.19)$$

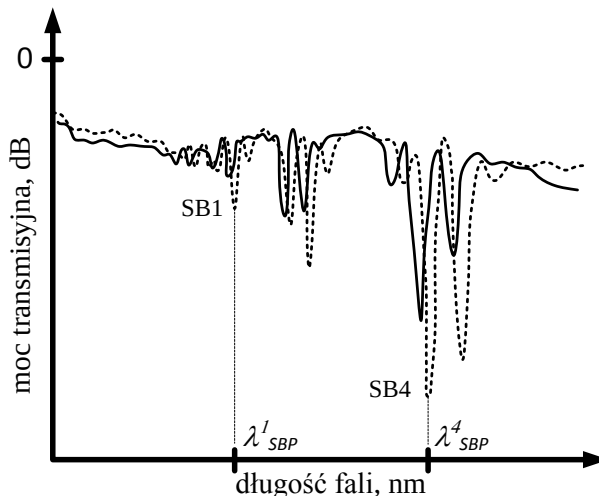
Na bazie równania (2.19), tj. poprzez jego odwrócenie względem ΔT i $\Delta\epsilon$, w przypadku dobrego uwarunkowania macierzy czułości siatki, istnieje możliwość wyznaczenia wartości mierzonych na podstawie zmierzonych zmian (przesunięć) długości fal pasm zaporowych $\Delta\lambda_{SB1}$ oraz $\Delta\lambda_{SB2}$.

Wobec powyższego istnieje możliwość wykorzystania pary siatek LPG do równoczesnego pomiaru odkształcenia i temperatury. W przypadku zastosowania dwóch siatek długookresowych, mody rdzeniowy i płaszczowe pierwszej siatki LPG1 mieszają się z odpowiadającymi im (pod względem rzędu) modami drugiej siatki LPG2 o odpowiednio dobranych parametrach, formując prążki interferencyjne. Ramiona interferometru np. Macha-Zendera [72] tworzy w takim przypadku ścieżka pomiędzy rdzeniem a płaszczem siatek. Należy zwrócić uwagę, że w przypadku opisywanych układów kluczową rolę stanowi odległość pomiędzy siatkami. W miarę jej zmniejszania powstające

prążki interferencyjne posiadają coraz mniejszą rozdzielczość, natomiast wartość ich przesunięcia jest większa niż wartość przesunięcia pasm zaporowych pojedynczej LPG. Z powyższej obserwacji wynika wniosek, że w przypadku pomiaru temperatury przy wykorzystaniu pary LPG tworzącej interferometr światłowodowy, czułość zostaje poprawiona w stosunku do pojedynczych siatek tworzących parę interferometryczną. Jednakże w miarę zwiększania odległości pomiędzy siatkami LPG, zmniejsza się szerokość prążków interferencyjnych. Wzrost odległości pomiędzy LPG powoduje również wzrost długości głowicy czujnika, zmniejszając możliwość wykonania pomiaru punkowego. Im krótsze są siatki LPG i odległość pomiędzy nimi, tym mniejsza będzie rozdzielczość pomiarowa układu LPGP, ale jednocześnie zmniejszy się rozmiar fizyczny głowicy pomiarowej. Są to więc wielkości przeciwstawne.

Długości fal rezonansowych pasm zaporowych układu LPGP oznaczono jako λ_{SBP}^i , natomiast długości fal pasm zaporowych siatek LPG1 i LPG2, tworzących parę LPGP oznaczono odpowiednio przez: λ_{SB1}^i i λ_{SB2}^i , gdzie i jest liczbą całkowitą oznaczającą kolejny numer (liczony od lewej strony na charakterystyce widmowej) pasma zabronionego. Na potrzeby niniejszej analizy przyjęto $i = 1 \div 4$.

Na rysunku 2.14 przedstawiono charakterystyki widmowe dwóch układów LPGP z zaznaczeniem charakterystycznych pasm zaporowych, wykorzystywanych w równoczesnych pomiarach kilku wielkości. Analogiczne widma, ale dla FBG1 i FBG2 przedstawione zostały na rysunku 2.15.

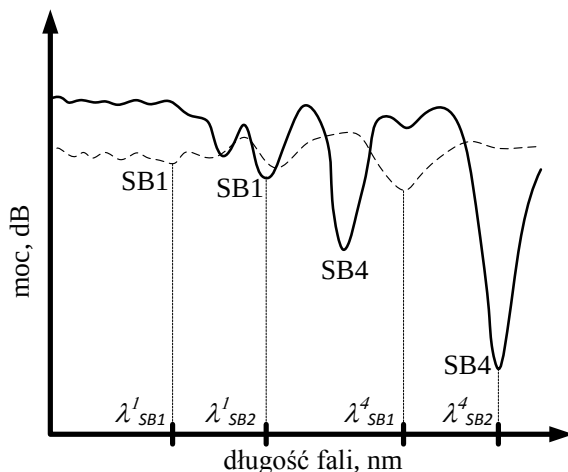


Rys. 2.14. Charakterystyki widmowe dwóch układów LPGP

W rozwijanych obecnie badaniach czujników odkształcenia i temperatury wykorzystuje się zaznaczone na rysunku 2.15 charakterystyczne pasma zaporowe siatek LPG i LPGP. Wobec powyższego, wielkości mierzone można określić przy zastosowaniu ogólnej macierzy przetwarzania, którą dla rozważanego układu LPGP, przy uwzględnieniu równania 2.6 można zapisać:

$$\begin{bmatrix} \Delta T \\ \Delta \varepsilon \end{bmatrix} = \frac{1}{D} \begin{bmatrix} K_{\varepsilon}^i & -K_{\varepsilon}^i \\ -K_T^i & K_T^i \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta \lambda^i \\ \Delta \lambda^i \end{bmatrix}, \quad (2.20)$$

gdzie i jest indeksem oznaczającym numer kolejny pasma zabronionego, K_{ε}^i oznacza czułość długości fali rezonansowej λ^i i -tego pasma zabronionego na odkształcenie, natomiast współczynniki K_T^i oznaczają czułość długości fali rezonansowej λ^i i -tego pasma zabronionego na temperaturę.



Rys. 2.15. Charakterystyki widmowe FBG1 i FBG2, tworzących parę LPGP

W rzeczywistości, w macierzy czułości wykorzystywane są skrajne pasma zaporowe (najczęściej pasmo pierwsze i czwarte), równanie (2.20) przyjmie zatem postać:

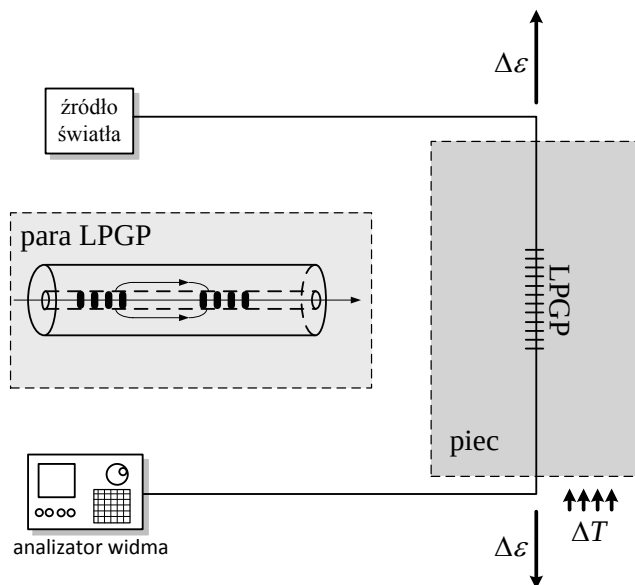
$$\begin{bmatrix} \Delta T \\ \Delta \varepsilon \end{bmatrix} = \frac{1}{D} \begin{bmatrix} K_{\varepsilon 4} & -K_{\varepsilon 1} \\ -K_{T4} & K_{T1} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta \lambda_1 \\ \Delta \lambda_4 \end{bmatrix}. \quad (2.21)$$

$K_{\varepsilon 1}$ i $K_{\varepsilon 4}$ są wtedy czułościami na odkształcenie, na które składają się efekt elastooptyczny i zmiana okresu siatki. K_{T1} i K_{T4} to czułości odpowiednich pasm zaporowych określone przez współczynniki termo-optyczne i współczynniki rozszerzalności temperaturowej światłowodu. Indeksy o wartości 1 odnoszą się ogólnie do pierwszego pasma zaporowego siatki LPG lub LPGP, natomiast

indeksy o wartości 4 określają czwarte pasmo zaporowe siatki LPG lub LPGP. Wyznacznik D z równania (2.21) jest równy:

$$D = K_{T1}K_{\varepsilon 4} - K_{T4}K_{\varepsilon 1}. \quad (2.22)$$

Układ pomiarowy wykorzystywany do jednoczesnej detekcji odkształcenia i temperatury przy wykorzystaniu pary długookresowych siatek Bragga przedstawiono na rysunku 2.16. Światło z szerokopasmowego źródła światła kierowane jest do pary LPGP, której widmo transmisyjne jest rejestrowane na analizatorze widma optycznego. Kalibracja czujnika polega na zadaniu znanej wartości odkształcenia przy stałej temperaturze oraz podgrzaniu czujnika do zadanych wartości temperatury przy stałym i znanym jego odkształceniu. Zmierzone charakterystyki przesunięcia pasm zaporowych w funkcji odkształcenia i temperatury są następnie wykorzystywane w celu określenia odpowiednich czułości (wrażliwości przesunięcia konkretnych pasm zaporowych na obydwie wielkości mierzone). Wyznaczone wartości czułości temperaturowych i odkształceniowych są wykorzystywane przy pomiarach pośrednich rozważanych wielkości. Na podstawie zmierzonych wartości przesunięć pasm zaporowych, wyznaczonych czułości oraz równania macierzowego (2.21), dokonuje się określenia wartości (lub zmian wartości) jednocześnie temperatury i odkształcenia.



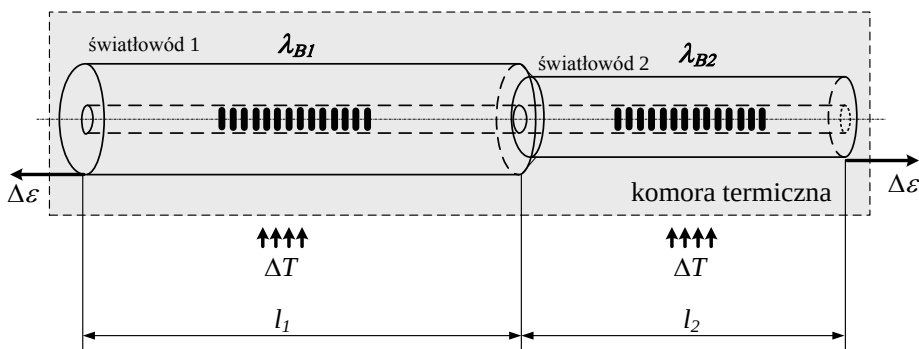
Rys. 2.16. Schemat układu do jednoczesnego i niezależnego pomiaru odkształcenia i temperatury z wykorzystaniem optoelektronicznego czujnika z parą długookresowych siatek Bragga (FBGP)

Spotykane są prace, w których czujnik LPGP, celem jego kalibracji, poddaje się badaniom w szerokim zakresie temperatur, np. od 25°C do 125°C [3]. Siatki używane w testach poddaje się często procesowi wyżarzania w temperaturze 150°C przez 15 h, w celu uzyskania wysokiej stabilności parametrów przy zmiennej temperaturze. Widma rejestruje się przy wykorzystaniu OSA o rozdzielczości rzędu 0,01 nm. Wyznaczone czułości temperaturowe pasm zabronionych SB1 w siatkach LPG1, LPG2 i LPGP wynoszą odpowiednio 0,29 nm/°C, 0,27 nm/°C oraz 0,31 nm/°C. Analogiczne wartości, dla pasma zaporowego SB4 wynoszą odpowiednio 0,49 nm/°C, 0,45 nm/°C oraz 0,5 nm/°C. Wartości czułości temperaturowych pasm zaporowych SB1 trzech rozważanych układów LPG1, LPG2 i LPGP są zbliżone, podobnie jak wartości trzech pasm zaporowych SB4. W celu wyznaczenia czułości na odkształcenie, siatki rozciąga się do pewnej maksymalnej wartości odkształcenia (równej np. 2000 $\mu\epsilon$, z krokiem 500 $\mu\epsilon$) w stałej temperaturze. Pasma zaporowe SB wyższego rzędu doznają przesunięcia w kierunku fal dłuższych (w przeciwieństwie do reakcji na wzrost temperatury). Czułości na odkształcenie osiągają dla siatek LPG1, LPG2 i LPGP wartości odpowiednio: 0,00002 nm/ $\mu\epsilon$, 0,0005 nm/ $\mu\epsilon$ oraz 0,0008 nm/ $\mu\epsilon$. Współczynniki odpowiadające każdemu czujnikowi, różnią się więcej niż tylko błędem pochodzącym z rozdzielczości pomiarowej, zatem technika odwrotnej macierzy może być wykorzystana do równoczesnego pomiaru temperatury i odkształcenia.

Zaprezentowanie przykładowych wartości charakterystycznych miało na celu wykazanie że LPGP mogą być wykorzystane do równoczesnych pomiarów odkształcenia i temperatury w sytuacji, w której siatki LPG są mniej efektywne. W celu poprawienia rozdzielczości czujnika LPGP konieczne wydaje się użycie maski fazowej o mniejszym okresie (~200 nm) i zapis siatki na światłowodzie domieszkowanym B-Ge, z powodu jego dużej odpowiedzi na odkształcenie. Możliwe jest również wykonanie optymalizacji odległości pomiędzy siatkami LPG np. w celu zmniejszenia pochyłości prążków interferencyjnych, a przez to zwiększenia rozdzielczości pomiarowej.

2.5. Wykorzystanie sposobu umieszczenia czujnika oraz właściwości światłowodu do budowy czujników odkształcenia i temperatury

Kolejna grupa rozwijanych obecnie czujników do jednoczesnego pomiaru kilku wielkości fizycznych wykorzystuje odpowiedni sposób umieszczenia siatek Bragga na specjalnie do tego celu zaprojektowanych światłowodach [7, 25, 95, 137, 171, 254, 289] lub wspornikach [66, 110, 112, 210, 226]. Opracowanych zostało wiele rozwiązań mających na celu oddzielenie reakcji czujników FBG na odkształcenie i temperaturę. W tym celu wykorzystuje się np. względną odpowiedź dwóch siatek zapisanych na światłowodach o różnej średnicy, co przedstawiono na rysunku 2.17.



Rys. 2.17. Układ dwóch FBG zapisanych na włóknach o różnych średnicach, wykorzystywanych do pomiaru odkształcenia i temperatury

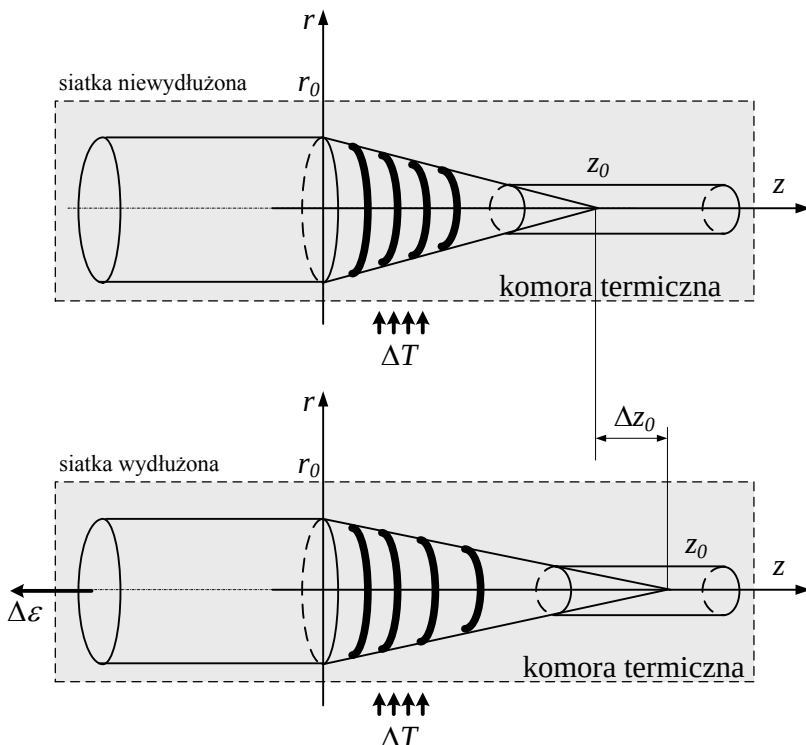
W przedstawionym układzie czujnika wykorzystuje się zmiany długości fali Bragga pierwszej siatki $\Delta\lambda_{B1}$ oraz drugiej $\Delta\lambda_{B2}$, zapisanych odpowiednio na światłowodach o długościach l_1 oraz l_2 . Zmiana długości fal Bragga dwóch siatek spowodowana jest zmianami temperatury (ΔT) i odkształcenia ($\Delta\epsilon$), zatem zależność pomiędzy przesunięciami długości fali i całkowitym odkształceniem doznawanym przez parę siatek może być wyrażona w postaci macierzowej:

$$\begin{bmatrix} \Delta\lambda_{B1} \\ \Delta\lambda_{B2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{\epsilon 1} & K_{T1} \\ K_{\epsilon 2} & K_{T2} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta\epsilon \\ \Delta T \end{bmatrix}. \quad (2.23)$$

Spotykane są również układy wykorzystujące pojedynczą siatkę Bragga zapisaną na światłowodzie specjalnym, np. w kształcie stożka. Poprzez zapisanie siatki na liniowo wytrawionym włóknie wykorzystuje się informację zawartą w długości fali rezonansu widma odbiciowego oraz szerokości widmowej FBG. Szerokość widmowa siatki zależy jednoznacznie od wywołanego odkształcenia i jednocześnie jest niezależna od temperatury. Na rysunku 2.18 przedstawiono siatkę Bragga zapisaną na światłowodzie stożkowym, najczęściej uzyskiwanym

poprzez trawienie włókna poprzez jego zanurzenie w roztworze kwasu fluorowodorowego [132, 137, 151, 258].

W układzie z rysunku 2.17, do jednoczesnego pomiaru zmian odkształcenia $\Delta\varepsilon$ i temperatury ΔT , wykorzystuje się zmiany długości fali Bragga $\Delta\lambda_B$ siatki oraz zmiany szerokości połówkowej jej widma odbiciowego $\Delta FWHM$.



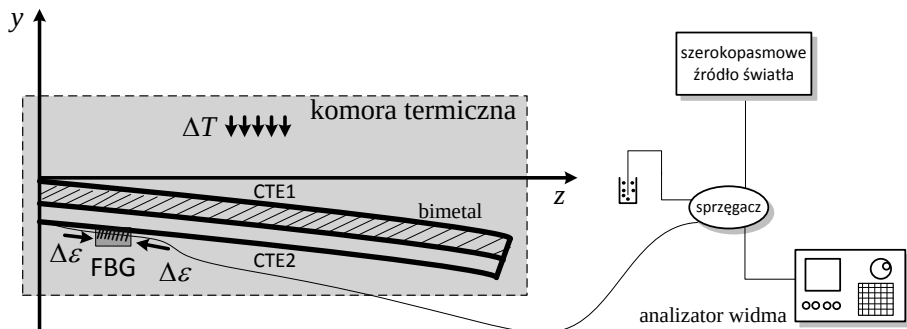
Rys. 2.18. Siatka Bragga zapisana na światłowodzie stożkowym przed (góra) i po (dół) odkształceniu

W tym przypadku postać macierzową zależności parametrów siatki od zmian temperatury i odkształcenia należy zapisać w sposób następujący:

$$\begin{bmatrix} \Delta\lambda_B \\ \Delta FWHM \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{T1} & K_{\varepsilon1} \\ K_{T2} & K_{\varepsilon2} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta\varepsilon \\ \Delta T \end{bmatrix}. \quad (2.23)$$

Niekiedy eliminację wpływu temperatury na pomiar odkształcenia uzyskuje się poprzez odpowiedni sposób umiejscowienia FBG [52, 201, 224, 225], uzyskując automatyczną kompensację temperaturową, bez potrzeby stosowania dodatkowych komponentów, np. w postaci kompensacyjnych układów elektronicznych. W przypadku, gdy jako element transferujący zmiany

rozważanych w niniejszym rozdziale wielkości mierzonych do siatki Bragga wykorzystamy wspornik bimetalowy, uzyskamy również układ pozwalający na pomiar niezależny od temperatury [28]. Idea takiego układu przedstawiona została na rysunku 2.19.



Rys. 2.19. Czujnik z siatką Bragga zamontowany na specjalnym bimetalowym wsporniku metalowym

FBG w układzie przedstawionym na rysunku 2.19 pozwala na wykonanie pomiaru odkształcenia i temperatury. Posiada on zdolność detekcji obciążenia lub innego parametru powodującego odkształcenie siatki (FBG). W przypadku przedstawionym na rysunku 2.19 dla siły będzie to odkształcenie ujemne (ściskanie) siatki. Siatka naklejona jest na tej części bimetalu, która charakteryzuje się mniejszym współczynnikiem rozszerzalności termicznej ($CTE1 < CTE2$). Źródło światła, np. w postaci szerokopasmowego wzmacniacza emisji spontanicznej (szerokość widmowa rzędu 40 nm), jest wykorzystywane do oświetlenia siatki Bragga poprzez jednomodowy sprzęgacz 50:50. Część widma, które zostaje odbite od siatki, jest rejestrowana przy zastosowaniu analizatora widma (OSA). Wychodząc z równania (2.2) można otrzymać dwie pochodne cząstkowe długości fali Bragga po temperaturze (2.24) oraz po odkształceniu (2.25) w następującej postaci:

$$\frac{\partial \lambda_B}{\partial T} = 2\Lambda \left(\frac{dn_{eff}}{dT} + n_{eff} \alpha_\Lambda \right), \quad (2.24)$$

$$\frac{\partial \lambda_B}{\partial \varepsilon} = 2(1 - p_e) n_{eff} \Lambda, \quad (2.25)$$

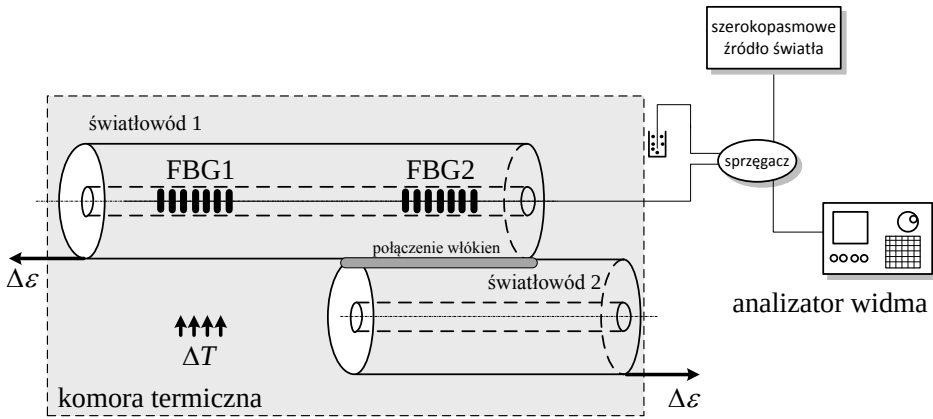
gdzie zgodnie z równaniami (2.9) oraz (2.11) α_Λ i p_e są odpowiednio współczynnikiem rozszerzalności termicznej oraz współczynnikiem elastooptycznym.

Uwzględniając zależności (2.24) i (2.25) w równaniu (2.2) sumaryczną zależność długości fali od temperatury można teraz wyrazić zależnością:

$$\frac{d\lambda_B}{dT} = 2n_{eff} \Lambda \left[\frac{1}{n} \frac{dn}{dT} + \alpha_\Lambda + (1 + p_e) \alpha_n \right], \quad (2.26)$$

gdzie zgodnie z równaniem (2.9) α_n jest współczynnikiem termo-optycznym. Zauważmy, że jeżeli $\alpha_n < 0$, wówczas przesunięcie długości fali zależne od temperatury może zostać częściowo skompensowane.

Na uwagę zasługują rozwiązania polegające na odpowiednim umieszczeniu siatek Bragga w głowicy czujnika. W ten sposób wymusza się różną czułość na odkształcenie dwóch siatek, utrzymując jednocześnie taką samą czułość temperaturową [66]. Głowicę czujnika konstruuje się poprzez połączenie równoległe dwóch światłowodów, przy czym FBG montowane są tylko na jednym włóknie. W takim przypadku nie ma konieczności spawania światłowodów, które staje się problematyczne, szczególnie gdy mamy do czynienia z różnymi rodzajami włókien oraz różnymi średnicami. Zbliżona czułość temperaturowa rezonansowych długości fal dwóch siatek umożliwia wyeliminowanie wpływu temperatury podczas pomiaru odkształcenia. Schemat układu pomiarowego, wykorzystującego czujnik z siatkami Bragga na sklejonych światłowodach przedstawia rysunek 2.20.



Rys. 2.20. Czujnik do pomiaru odkształcenia i temperatury z siatkami Bragga zapisanymi na sklejonych światłowodach

Należy zauważyć, że strefa połączenia włókien pokrywa się tylko z miejscem zapisu jednej siatki – FBG2. Odkształcenie jest wywoływane poprzez przyłożenie siły rozciągającej na końcach włókien. Układ pomiarowy składa się z szerokopasmowego źródła światła, sprzęgacza lub cyrkulatora optycznego oraz analizatora widma optycznego. Zmieniając średnicę światłowodów możliwe jest sterowanie współczynnikiem czułości na odkształcenie. W przypadku połączenia dwóch światłowodów, jak na rysunku 2.20, dwie siatki wykazywać będą różne czułości na odkształcenie. Informacja o zmianie temperatury ΔT oraz

odkształcenia $\Delta\varepsilon$ będzie zawarta w zmianie długości fali obydwu siatek. Zmiany długości tych fal oznaczmy jako $\Delta\lambda_{B1}$ oraz $\Delta\lambda_{B2}$. Zgodnie z zależnością (2.4) równanie przetwarzania układu można wyrazić w postaci macierzowej:

$$\begin{bmatrix} \Delta\lambda_{B1} \\ \Delta\lambda_{B2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{T1} & K_{\varepsilon1} \\ K_{T2} & K_{\varepsilon2} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta T \\ \Delta\varepsilon \end{bmatrix}. \quad (2.27)$$

W przypadku czujników do równoczesnego pomiaru odkształcenia i temperatury wykorzystujących odpowiedni sposób umiejscowienia siatek Bragga na specjalnie zaprojektowanych światłowodach lub wspornikach można wykazać, że zależność pomiędzy parametrami siatek (najczęściej są to przesunięcia długości fali lub szerokość pasma widma odbiciowego) i całkowitym odkształceniem doznawanym przez parę siatek może być wyrażona w postaci macierzowej.

W celu wykazania który parametr siatki lub układu siatek Bragga, w jakim stopniu i od której wielkości (temperatury czy odkształcenia) jest uzależniony, należy dokonać analizy macierzowych równań przetwarzania wybranych układów. Zmianę długości fal Bragga dwóch siatek $\Delta\lambda_{B1}$ oraz $\Delta\lambda_{B2}$ czujnika przedstawionego na rys. 2.17, powodowanych zmianami temperatury (ΔT) i odkształcenia ($\Delta\varepsilon$) można wyrazić, zgodnie z równaniem (2.4), następującymi zależnościami:

$$\Delta\lambda_{B1} = K_{\varepsilon1}\Delta\varepsilon_1 + K_{T1}\Delta T, \quad (2.28)$$

$$\Delta\lambda_{B2} = K_{\varepsilon2}\Delta\varepsilon_2 + K_{T2}\Delta T. \quad (2.29)$$

Zauważmy, że w przypadku rozważanego układu dla danego obciążenia, odkształcenia doznawane przez światłowody związane są następującym równaniem:

$$\frac{\Delta\varepsilon_1}{\Delta\varepsilon_2} = \frac{A_2}{A_1}, \quad (2.30)$$

gdzie A_1 i A_2 są polami przekroju poprzecznego światłowodów odpowiednio pierwszego i drugiego. Zmiana odkształcenia $\Delta\varepsilon$ jest wyrażona w zależności od długości światłowodów l_1 i l_2 następującym równaniem:

$$\Delta\varepsilon = \frac{(\Delta l_1 + \Delta l_2)}{l_1 + l_2}, \quad (2.31)$$

z kolei Δl_1 i Δl_2 są odkształceniami światłowodów odpowiednio pierwszego i drugiego.

Analizując równanie (2.24) i (2.25) należy zauważyć, że współczynniki czułości na odkształcenie i temperaturę można wyznaczyć poprzez ustalenie

pochodnych cząstkowych długości fali Bragga poszczególnych siatek po ich odkształceniu i temperaturze zgodnie z następującymi wyrażeniami:

$$\kappa_{\varepsilon i} = \partial \lambda_i / \partial \varepsilon_i, \quad (2.32)$$

$$\kappa_{T i} = \partial \lambda_i / \partial T_i, \quad (2.33)$$

gdzie i jest indeksem oznaczającym siatkę ($i = 1, 2$).

Obliczając pochodne cząstkowe (2.32) i (2.33), uwzględniając zależności (2.31) i (2.32) oraz wstawiając wyniki do równania macierzowego (2.23) otrzymuje się następującą macierz przetwarzania czujnika:

$$\begin{bmatrix} \Delta \lambda_{B1} \\ \Delta \lambda_{B2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{K_{\varepsilon 1}(l_1 + l_2)}{l_1 \left(1 + \frac{A_1 l_2}{A_2 l_1} \right)} & K_{T1} \\ \frac{K_{\varepsilon 2}(l_1 + l_2)}{l_2 \left(1 + \frac{A_2 l_1}{A_1 l_2} \right)} & K_{T2} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta \varepsilon \\ \Delta T \end{bmatrix}. \quad (2.34)$$

Wykazano zatem, że w postaci macierzowej można wyrazić zależność pomiędzy przesunięciami długości fali i całkowitym odkształceniem doznawanym przez parę siatek. Zakładając, że obydwie światłowody posiadają takie same czułości temperaturowe ($K_{T1} \approx K_{T2}$), zmiana temperatury spowoduje zbliżone przesunięcia długości fali Bragga $\Delta \lambda_{B1}$ i $\Delta \lambda_{B2}$, zatem odległości pomiędzy długościami fal λ_{B1} i λ_{B2} pozostaną stałe. Z kolei odkształcenie spowoduje zmianę długości fal Bragga siatek w różnym stopniu, zmieniając tym samym odległości pomiędzy λ_{B1} i λ_{B2} . Zauważmy, że względna odległość λ_{B1} od λ_{B2} może być wykorzystana do wyznaczenia odkształcenia, podczas gdy bezwzględna wartość przesunięcia długości fali zawiera informacje zarówno o temperaturze jak i odkształceniu. Wyznaczenie wartości odkształcenia i temperatury jest zatem możliwe poprzez wykorzystanie macierzy odwrotnej do (2.34):

$$\begin{bmatrix} \Delta \varepsilon \\ \Delta T \end{bmatrix} = \frac{1}{D} \begin{bmatrix} \frac{K_{\varepsilon 2}(l_1 + l_2)}{l_2(1 + A_2 l_1 / A_1 l_2)} & - \frac{K_{\varepsilon 1}(l_1 + l_2)}{l_1(1 + A_1 l_2 / A_2 l_1)} \\ - K_{T2} & K_{T1} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta \lambda_{B1} \\ \Delta \lambda_{B2} \end{bmatrix}, \quad (2.35)$$

gdzie zgodnie z równaniem (2.7) wyznacznik D jest równy

$$D = \frac{K_{T1} K_{\varepsilon 2}(l_1 + l_2)}{l_2(1 + A_2 l_1 / A_1 l_2)} - \frac{K_{T2} K_{\varepsilon 1}(l_1 + l_2)}{l_1(1 + A_1 l_2 / A_2 l_1)}. \quad (2.36)$$

Z analizy równania (2.35) wynika, że zmieniając długości i typy (w tym również średnice) światłowodów z siatkami Bragga można wpływać na wartości czułości na odkształcenie obydwu siatek.

W przypadku układu przedstawionego na rysunku 2.18, poprzez analizę geometrii włókien i jej uwzględnienie w macierzowych równaniach przetwarzania czujnika, istnieje możliwość wykazania, który parametr siatki i w jakim stopniu zależy od temperatury i odkształcenia.

W sytuacji zmieniającej się temperatury i odkształcenia długość fali Bragga siatki ulegnie zmianie zgodnie ze wzorem:

$$\Delta\lambda_B = K_{T1}\Delta T + K_{\varepsilon1}\Delta\varepsilon, \quad (2.37)$$

gdzie K_{T1} i $K_{\varepsilon1}$ są odpowiednio czułościami długości fali Bragga na temperaturę i odkształcenie.

Można udowodnić, że w układzie z rysunku 2.18 drugim parametrem, wykorzystywanym do równoczesnego pomiaru odkształcenia i temperatury może być szerokość połówkowa $FWHM$ charakterystyki widmowej siatki. Szerokość spektralna siatki $\Delta\lambda_{chirp}$ jest proporcjonalna do zakresu okresu siatki:

$$\Delta\lambda_{chirp} = 2n_{eff}(\Lambda_{max} - \Lambda_{min}), \quad (2.38)$$

gdzie Λ_{max} i Λ_{min} są odpowiednio największym i najmniejszym okresem siatki, która po rozciągnięciu doznała chirpu.

Można także udowodnić zależność (najlepiej liniową) szerokości spektralnej siatki od wymuszenia w postaci siły, wywołującej odkształcenie siatki. Pole przekroju poprzecznego okrągłego włókna wyraża się zależnością:

$$A(z) = \pi r(z)^2, \quad (2.39)$$

gdzie $r(z)$ jest promieniem wzdłuż osi z włókna wytrawionego liniowo. Przyjmując parametry niewytrawionego włókna r_0 – promień oraz z_0 – jego środek, możemy zapisać zależność:

$$r(z) = r_0 \left(1 - \frac{z}{z_0} \right). \quad (2.40)$$

Odształcenie wzdłuż osi z spowodowane siłą F zgodnie z prawem Hooke’a jest równe:

$$\varepsilon(z) = \frac{F}{A(z)E} = \frac{F}{E\pi(r_0)^2 \left(1 - \frac{z}{z_0} \right)^2}, \quad (2.41)$$

gdzie E jest modułem Younga.

Rozciągnięcie włókna powoduje powstanie chirpu, wskutek którego okres siatki będzie funkcją pozycji wzdłuż osi z . Efekt ten jest spowodowany różnymi wartościami odkształcenia w każdym punkcie siatki. Zależność okresu siatki od pozycji wzdłuż osi z można zapisać następująco:

$$\Lambda(z) = \Lambda_0(1 + \varepsilon(z)), \quad (2.42)$$

gdzie Λ_0 jest okresem siatki nieodkształconej, $\varepsilon(z)$ jest odkształceniem siatki dla danego punktu wzdłuż osi z . Powstały chirp okresu siatki wyrazić można zatem w funkcji maksymalnego $\varepsilon_{\max}$ i minimalnego $\varepsilon_{\min}$ odkształcenia siatki:

$$\Delta\Lambda_{\text{chirp}} = \Lambda_0(\varepsilon_{\max} - \varepsilon_{\min}). \quad (2.43)$$

Dokonując podstawienia równania (2.43) do (2.38) otrzymuje się równanie określające zależność szerokości widma od okresu rozciągniętej siatki:

$$\Delta\lambda_{\text{chirp}} = 2n_{\text{eff}} \Delta\Lambda_{\text{chirp}}. \quad (2.44)$$

Zatem szerokość widmowa siatki zmieni się liniowo wraz z przyłożoną siłą:

$$\Delta\lambda_{\text{chirp}} = 2n_{\text{eff}} \Lambda_0 \frac{F \left(\frac{1}{\left(1 - \frac{z_{\max}}{z_0}\right)^2} - 1 \right)}{E \pi (r_0)^2}. \quad (2.45)$$

Szerokość połówkowa zmienia się w zależności od siły wywołującej odkształcenie siatki i zgodnie z (2.45) nie jest funkcją temperatury. Uwzględniając fakt, że czułość temperaturowa $FWHM$ jest równa zero oraz zapisując jej zależność od odkształcenia jako:

$$\Delta FWHM = K_{\varepsilon 2} \Delta \varepsilon, \quad (2.46)$$

oraz dodając równanie (2.37) otrzymamy zredukowane równanie macierzowe czujnika w postaci:

$$\begin{bmatrix} \Delta T \\ \Delta \varepsilon \end{bmatrix} = \frac{1}{K_{T1} K_{\varepsilon 2}} \begin{bmatrix} K_{\varepsilon 2} & -K_{\varepsilon 1} \\ 0 & K_{T1} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta\lambda_B \\ \Delta FWHM \end{bmatrix}. \quad (2.47)$$

Należy zauważyć, że fakt powstania chirpu wywołanego odkształceniem pozwolił na uzyskanie informacji o wielkościach mierzonych, które zostały zakodowane nie tylko w długości fali Bragga, ale również w szerokości połówkowej $FWHM$ widma siatki. Analizując równanie (2.47) widać, że zmianę odkształcenia i temperatury można określić na podstawie przesunięcia długości

fali Bragga i szerokości połówkowej pojedynczej siatki jednorodnej. Dowodzi to możliwości równoczesnego pomiaru odkształcenia i temperatury przy wykorzystaniu pojedynczej FBG.

W przypadku zastosowania czujnika przedstawionego na rysunku 2.19 istnieje również możliwość równoczesnego pomiaru odkształcenia i temperatury. W tym przypadku aby zrealizować całkowitą kompensację temperaturową, należy tak dobrać wartość współczynnika termo-optycznego α_n , aby stosunek $d\lambda_B/dT$ był równy zero. Analizując równanie (2.26) widać, że spełnienie tego warunku jest możliwe gdy:

$$\alpha_n = -\frac{1}{1-p_e} \left(\frac{1}{n_{eff}} \frac{dn_{eff}}{dT} + \alpha_\Lambda \right). \quad (2.48)$$

Ugięcie wiązki bimetalowej rozważanego układu można opisać równaniem:

$$y_z = \frac{h(\alpha_1 - \alpha_2)\Delta T}{2\xi d} \chi(z), \quad (2.49)$$

gdzie h reprezentuje grubość wiązki bimetalu, α_1 i α_2 są współczynnikami rozszerzalności cieplnej odpowiednio materiału pierwszego (oznaczonego na rysunku współczynnikiem CTE1) oraz drugiego – CTE2 [215]. Wielkość d jest sumą sztywności zginania bimetalu [216], ξ jest funkcją d , $\chi(z)$ opisuje funkcję rozkładu siły i spowodowanego nią odkształcenia normalnego wzdłuż wiązki termobimetalowej [216]. W przypadku danego odkształcenia wiązki, np. o długość równej h , odkształcenie wzdłuż osi z zaznaczonej na rysunku 2.19 będzie wyrażać się równaniem:

$$\varepsilon_z = h \frac{d^2 y_z}{dz^2} = \frac{h^2(\alpha_1 - \alpha_2)\Delta T}{2\xi d} \frac{d^2 \chi(z)}{dz^2}. \quad (2.50)$$

Zakładając, że transfer odkształcenia pomiędzy wiązką i siatką jest idealny, siatka będzie poddana średniemu odkształceniu zależnemu od temperatury zgodnie z następującą zależnością:

$$\varepsilon(T) = \frac{1}{L} \int_0^L \varepsilon_z dz, \quad (2.51)$$

gdzie L jest długością siatki Bragga. Na podstawie równania (2.51) można wnioskować, że istnieje możliwość regulacji wartości $\varepsilon(T)$ poprzez dobór odpowiednich wartości rozmiarów wiązki bimetalowej. W efekcie osiągnąć można spełnienie równania (2.48), tym samym przyczyniając się do kompensacji temperaturowej. Jest to dowód, że w przypadku przedstawianej konstrukcji czujnika FBG, wywołane odkształcenie może całkowicie

skompensować przesunięcie długości fali wywołane temperaturą i utrzymać długość fali Bragga w stałym miejscu przy zmianie temperatury.

Rozważając układ czujnika przedstawionego na rysunku 2.20, można również wykazać możliwość wykonywania równoczesnych pomiarów odkształcenia i temperatury. Problem sprowadzi się do wykazania zróżnicowanej czułości na odkształcenie siatek i jednocześnie zbliżonych wartości czułości temperaturowych FBG.

W celu wykazania zróżnicowanych wartości czułości na odkształcenie wykorzystano fakt, że wraz ze wzrostem pola przekroju poprzecznego włókna, zarówno odkształcenie jak i jego zmiana będzie mniejsza. Rozważmy czujnik z dwiema siatkami Bragga zapisanymi na włóknach o różnej średnicy. Uwzględniając równanie (2.30) w przypadku czujnika przedstawionego na rysunku 2.20 relację pomiędzy wywołanymi odkształceniami siatki pierwszej ε_1 i drugiej ε_2 , a polami przekrojów poprzecznych odpowiednio A_1 i A_2 należy zapisać następująco:

$$\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} = \frac{A_2}{A_1}, \quad (2.52)$$

w tym przypadku $\varepsilon_1 = \Delta L_1 / L_{01}$ oraz $\varepsilon_2 = \Delta L_2 / L_{02}$, gdzie ΔL_1 i ΔL_2 oznaczają zmiany długości (odkształcenia bezwzględne) obydwu siatek, natomiast L_{01} i L_{02} są ich długościami początkowymi. Sumaryczne odkształcenie czujnika wyrazić można analogicznie do układu opisanego równaniem (2.31) w postaci:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L_1 + \Delta L_2}{L_{01} + L_{02}}, \quad (2.53)$$

co po uwzględnieniu związku pomiędzy odkształceniem każdej siatki i odkształceniem całkowitym pozwoli na wyrażenie zmian długości fali Bragga siatek czujnika, w zależności od długości siatek i ich zmian oraz czułości na odkształcenie w sposób następujący:

$$\Delta \lambda_{B1} = K_\varepsilon \frac{(L_{01} + L_{02})\varepsilon}{L_{01} \left(1 + \frac{A_1 l_2}{A_2 l_1} \right)}, \quad (2.54)$$

$$\Delta \lambda_{B2} = K_\varepsilon \frac{(L_{01} + L_{02})\varepsilon}{L_{02} \left(1 + \frac{A_2 l_1}{A_1 l_2} \right)}. \quad (2.55)$$

Analizując zależności (2.54) i (2.55) należy zauważyć, że stała wartość czułości każdej siatki na odkształcenie (w obydwu równaniach występuje ta sama wielkość K_ε) została przemnożona przez różne czynniki, zarówno

w przypadku wyrażenia opisującego przesunięcie długości fali siatki pierwszej $\Delta\lambda_{B1}$ jak i drugiej $\Delta\lambda_{B2}$. W rzeczywistości powstały dwie nowe czułości na odkształcenie, różniące się od siebie. Nowa czułość na odkształcenie siatki pierwszej wynosi K_{ε}^1 :

$$K_{\varepsilon}^1 = (L_{01} + L_{02}) / [L_{01}(1 + A_1 l_2 / A_2 l_1)] \cdot K_{\varepsilon}, \quad (2.56)$$

natomiast w przypadku siatki drugiej czułość na odkształcenie jest teraz równa:

$$K_{\varepsilon}^2 = (L_{01} + L_{02}) / [L_{02}(1 + A_2 l_1 / A_1 l_2)] \cdot K_{\varepsilon}. \quad (2.57)$$

Możliwy jest zatem dobór długości siatek i pola przekroju światłowodów na którym siatki są zapisane tak, aby: $K_{\varepsilon}^1 \neq K_{\varepsilon}^2$. Warunkiem jest jedynie, aby długości siatek lub/i pola przekroju poprzecznego były różne.

Czułości temperaturowe siatek K_{T1} i K_{T2} zależą głównie od wartości współczynników rozszerzalności termicznej oraz współczynników termooptycznych włókna, które są niezależne od geometrii głowicy czujnika. Dlatego zakładamy, że K_{T1} i K_{T2} mają zbliżone wartości. Uwzględniając powyższy wniosek, w wyniku odwrócenia równania macierzowego (2.27) otrzymamy układ równań macierzowych dobrze uwarunkowanych, na podstawie którego można równocześnie wyznaczyć wartości zmiany temperatury jak i odkształcenia:

$$\begin{bmatrix} \Delta T \\ \Delta \varepsilon \end{bmatrix} = \frac{1}{K_{T1}K_{\varepsilon 2} - K_{\varepsilon 1}K_{T2}} \begin{bmatrix} K_{\varepsilon 2} & -K_{\varepsilon 1} \\ -K_{T2} & K_{T1} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta\lambda_{B1} \\ \Delta\lambda_{B2} \end{bmatrix}. \quad (2.58)$$

Mierząc przesunięcia długości fali obydwu siatek czujnika, istnieje zatem możliwość wyznaczenia zmian temperatury i odkształcenia jednocześnie i niezależnie.

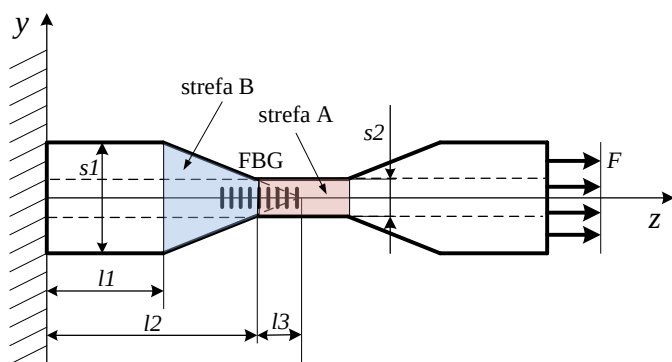
2.6. Tworzenie chirpu strefowego w FBG jako sposób na uzyskanie 2-funkcyjności czujnika

Zgodnie z analizą zaprezentowaną w poprzednich rozdziałach, równoczesnych pomiarów odkształcenia i temperatury dokonuje się zwykle wykorzystując dwie siatki Bragga [232, 233] (najczęściej wytworzone przy wykorzystaniu jednej maski fazowej [68]) lub siatkę Bragga połączoną z innym elementem optoelektronicznym, którego charakterystyka widmowa jest modulowana temperaturą i odkształceniem [135].

Jedną z metod jednoczesnego pomiaru odkształcenia i temperatury jest zapis FBG z różnymi długościami Bragga na tej samej pozycji wzdłuż włókna światłowodowego [83]. W celu detekcji zmian parametrów dwóch FBG, technika ta wymaga zastosowania dwóch masek fazowych i dwóch szerokopasmowych źródeł światła. Dwukrotna ekspozycja na światło UV światłowodu, może osłabić mechaniczną wytrzymałość światłowodu.

W kolejnych badaniach eksperymentalnych czujników optoelektronicznych, do równoczesnych pomiarów rozważanych wielkości (odkształcenie i temperatura), użyta została do tego celu specjalna głowica pomiarowa czujnika. Składała się ona z pojedynczej siatki Bragga umieszczonej na specjalnie zaprojektowanej próbce metalowej.

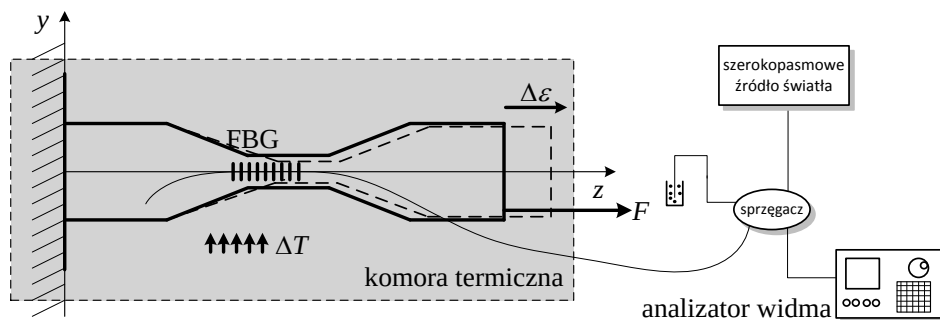
Kształt próbki i miejsce naklejenia FBG zostały tak zaprojektowane, by w tej samej siatce uzyskać różne czułości – na odkształcenie i temperaturę. Ważne zatem stało się uzyskanie takiej samej czułości temperaturowej i różnej czułości na odkształcenie czujnika oraz sprawdzenie zaproponowanego układu czujnika poprzez jego kalibrację (eksperymentalne wyznaczenie czułości), a następnie weryfikacja wyników uzyskanych podczas badań laboratoryjnych. Próbką, na którą naklejona została siatka Bragga została tak zaprojektowana, aby uzyskać odpowiedni gradient odkształcenia wzdłuż osi z , powodujący zmianę szerokości pasma widma odbitego od siatki – jak prezentuje schemat rys. 2.21.



Rys. 2.21. Wymiary i kształt próbki wykorzystywanej w układzie czujnika z pojedynczą FBG do równoczesnego pomiaru odkształcenia i temperatury

Wartości poszczególnych wielkości charakterystycznych, zaznaczonych na rysunku są następujące: odległości l_1 , l_2 , l_3 - odpowiednio o wartościach: 84 mm, 94 mm, 4 mm, szerokości w strefach próbki s_1 i s_2 – odpowiednio o wartościach 25 mm i 6 mm, grubość próbki $g = 1$ mm. Siatka umieszczona została w taki sposób, aby jej połowa znajdowała się w strefie B o zmiennej wartości odkształcenia osiowego wskutek zmian przekroju poprzecznego próbki (strefa niebieska na rysunku 2.21), natomiast druga połowa siatki znajdowała się w strefie A o stałej szerokości próbki i stałej wartości odkształcenia wynikającego z przyłożonej siły rozciągającej próbkę F (strefa różowa na rysunku 2.21). Próbka wykonana została ze stali o znanym współczynniku Younga $E = 20,53 \cdot 10^{10}$ N/m² i współczynniku rozszerzalności temperaturowej $\alpha_p = 12 \cdot 10^{-6}$ K⁻¹.

Schemat układu eksperymentalnego do równoczesnych pomiarów odkształcenia i temperatury przy wykorzystaniu czujnika w postaci jednej FBG prezentuje rys. 2.22. Światło z diody SLED (ang.: *Superluminescent Light Emitting Diode*) poprzez sprzęgacz 3 dB kierowane jest na siatkę Bragga, której widmo odbiciowe zostaje rejestrowane na analizatorze widma optycznego o rozdzielczości 0,01 nm. Próbka wraz siatką obciążone siłą rozciągającą F , ulegają odkształceniom (wzdłuż osi z).

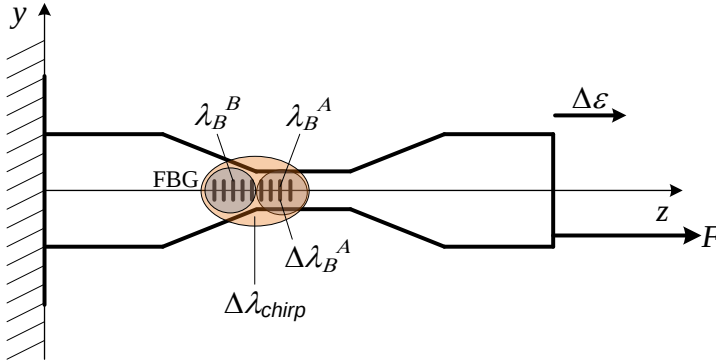


Rys. 2.22. Układ eksperymentalny do pomiaru odkształcenia i temperatury czujnikiem z jedną FBG. BSS – szerokopasmowe źródło światła, OSA – analizator widma optycznego

Odształcenie wolnego końca próbki (kształt zaznaczony linią przerywaną) powoduje powstanie rezonansowych długości fali FBG. Są to dwa widma zachodzące na siebie wskutek zmiennego kształtu wspornika-próbki. Obydwa widma odbiciowe posiadają taką samą czułość temperaturową, gdyż współczynnik rozszerzalności termicznej oraz stała elastooptyczna determinujące ten współczynnik – zgodnie z zależnością (2.9), są takie same dla obydwu części tej samej siatki: części w strefie A i części w strefie B. Zmiana długości fali Bragga, spowodowana odkształceniem dla każdej strefy (i części siatki), jest proporcjonalna do osiowego odkształcenia siatki. Oznaczając długość fali Bragga części siatki w strefie A jako λ_B^A oraz analogicznie długość

fali Bragga części siatki w strefie B przez λ_B^B , możliwe staje się śledzenie zjawisk jednocześnie w obu strefach.

W celu przeprowadzenia równoczesnego pomiaru zmian odkształcenia $\Delta\varepsilon$ oraz temperatury ΔT wykorzystano zmiany długości fali Bragga części siatki znajdującej się w strefie A, (po uprzednim umieszczeniu całego układu w komorze termicznej o kontrolowanej temperaturze) oznaczonej jako $\Delta\lambda_B^A$ oraz zmiany szerokości pasma widma odbiciowego całej siatki oznaczonej dalej jako $\Delta\lambda_{chirp}$ (rysunek 2.23).



Rys. 2.23. Oznaczenie długości fal i szerokości widmowych wykorzystywanych w obliczeniach i analizie matematycznej

Dla takiego przypadku macierzową zależność parametrów siatki od zmian temperatury i odkształcenia należy zapisać w następującej postaci:

$$\begin{bmatrix} \Delta\lambda_B^A \\ \Delta\lambda_{chirp} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{T\lambda A} & K_{\varepsilon\lambda A} \\ K_{T\lambda chirp} & K_{\varepsilon\lambda chirp} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta\varepsilon \\ \Delta T \end{bmatrix}, \quad (2.59)$$

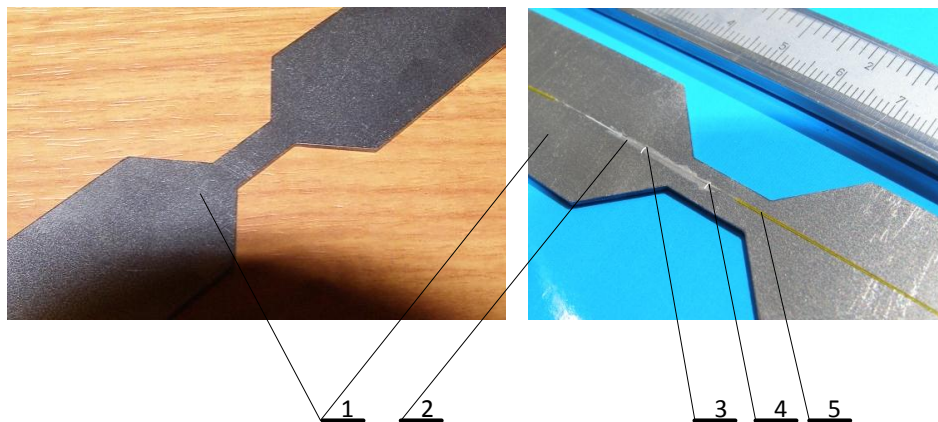
gdzie $K_{T\lambda A}$ i $K_{\varepsilon\lambda A}$ są czułościami przesunięcia długości fali Bragga $\Delta\lambda_B^A$ części siatki umieszczonej w strefie A odpowiednio na temperaturę i odkształcenie, natomiast $K_{T\lambda chirp}$ oraz $K_{\varepsilon\lambda chirp}$ określają czułości szerokości charakterystyki widmowej odbiciowej siatki Bragga $\Delta\lambda_{chirp}$ odpowiednio na temperaturę oraz odkształcenie.

Zmiana temperatury i odkształcenia spowoduje zmianę długości fali Bragga części siatki znajdującej się również w strefie B, co wyraża się zależnością:

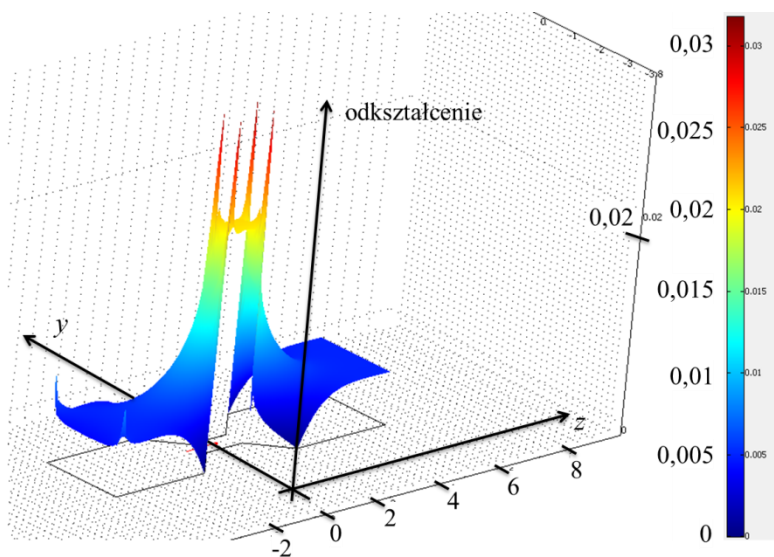
$$\Delta\lambda_B^A = K_{T\lambda A} \Delta T + K_{\varepsilon\lambda A} \Delta\varepsilon, \quad (2.60)$$

gdzie $K_{T\lambda A}$ i $K_{\varepsilon\lambda A}$ są czułościami długości fali Bragga siatki w sekcji A odpowiednio na temperaturę i odkształcenie.

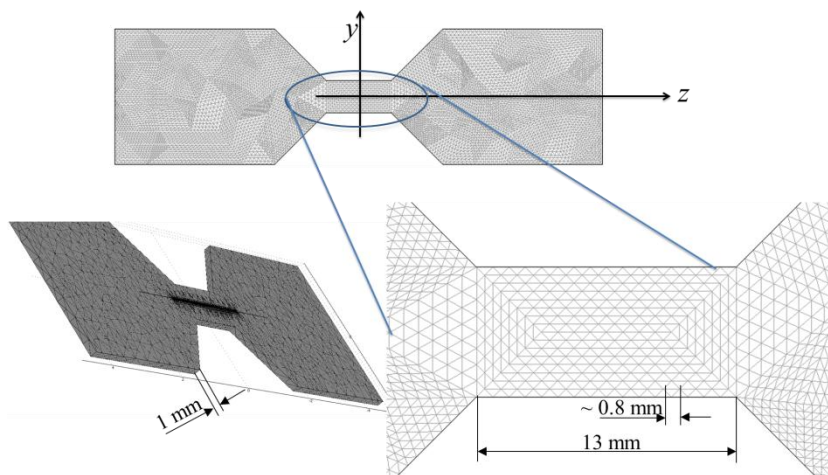
Rys. 2.24a prezentuje zdjęcie próbki z naklejoną siatką Bragga, a rys. 2.24b – rozkład odkształcenia (kształt płaszczyzny) i naprężenia (kolor) w próbce, obliczony metodą elementów skończonych (MES).



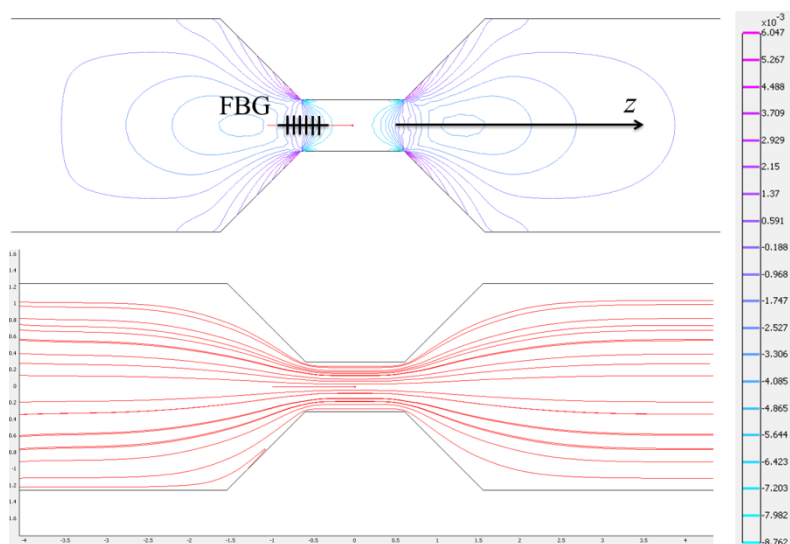
Rys. 2.24a. Badany czujnik ze światłowodową siatką Bragga umieszczoną na próbce kształtowej. 1 – wspornik metalowy, 2. spoina klejowa (sikadur-30), 3-początek FBG, 4 – koniec FBG, 5 – światłowód jednomodowy SMF28



Rys. 2.24b. Rozkład odkształcenia wzdłuż osi y i z wyznaczony przy wykorzystaniu MES



Rys. 2.24c. Porównanie wielkości elementu konstrukcyjnego czujnika z wielkością elementów skończonych siatki MES



Rys. 2.24d. Linie stałego odkształcenia (góra) oraz linie określające kierunki wydłużenia głównego w badanym materiale

Jak widać na rysunku 2.24c, rozmiar elementów siatki wykorzystanej w metodzie elementów skończonych był mniejszy od wszystkich rozmiarów charakterystycznych elementu konstrukcyjnego czujnika. Przedstawione na rysunku 2.24d linie stałego odkształcenia są zagęszczone w miejscu przymocowania siatki Bragga.

Poniższa analiza przedstawia zasadność wyboru szerokości widmowej charakterystyki siatki $\Delta\lambda_{chirp}$ jako drugiego parametru (jednoczesnego pomiaru odkształcenia i temperatury). Szerokość pasma rezonansowego zależy od wartości okresu siatki w sposób dający się opisać równaniem:

$$\Delta\lambda_{chirp} = 2n_{eff}(\Lambda^A - \Lambda_{min}^B), \quad (2.61)$$

czyli jest proporcjonalna do zakresu okresu siatki. W równaniu (2.61) Λ^A i Λ_{min}^B są odpowiednio największym (po przyłożeniu siły rozciągającej do układu największy będzie okres części siatki znajdującej się w strefie A próbki) i najmniejszym okresem siatki, która po jej rozciągnięciu dozna chirpu w strefie B. Można w związku z powyższym określić zależność szerokości spektralnej siatki od wymuszenia (przyłożonej siły rozciągającej) powodującego wydłużenie siatki. Pole przekroju poprzecznego rozciąganej próbki można określić jako funkcję pozycji wzdłuż osi z następującym równaniem:

$$A^B(z) = gs^B(z), \quad (2.62)$$

gdzie g jest grubością próbki, $s^B(z)$ jest szerokością w strefie B, zależną od pozycji rozpatrywania próbki wzdłuż osi z .

Szerokość próbki w strefie B to funkcja pozycji wzdłuż osi z zależna od szerokości maksymalnej s_1 (początkowej) próbki. Jako że pole w strefie B ma kształt trapezu, otrzymamy następujący wzór określający wielkość $s^B(z)$:

$$s^B(z) = s_1 \left(1 - \frac{z}{z_0} \right), \quad (2.63)$$

przy czym z_0 jest punktem, w którym szerokość próbki ze strefy B przyjęłaby wartość zero. Punkt ten jest oddalony o odległość $l_2 + l_3$ od nieruchomego końca próbki. Uwzględniając prawo Hooke'a, odkształcenie wzdłuż osi z w sekcji B, spowodowane siłą F jest zatem dane równaniem:

$$\varepsilon^B(z) = \frac{F}{A(z)E} = \frac{F}{E \cdot s_1 \left(1 - \frac{z}{z_0} \right)}, \quad (2.64)$$

gdzie E jest modułem Younga.

Należy zwrócić uwagę, że nierównomierne odkształcanie próbki powoduje w strefie B powstanie chirpu w siatce. Okresy siatki będą zatem funkcją pozycji z . Zależność okresu siatki od pozycji wzdłuż osi z można w strefie B wyrazić następująco:

$$\Lambda^B(z) = \Lambda_0 (1 + \varepsilon^B(z)), \quad (2.65)$$

gdzie Λ_0 jest okresem siatki nieodkształconej, $\varepsilon^B(z)$ jest odkształceniem siatki dla danego punktu wzdłuż osi z w strefie B. Powstały chirp okresu siatki zostanie wyrażony w funkcji maksymalnego $\varepsilon_{\max}$ i minimalnego $\varepsilon_{\min}$ odkształcenia siatki jako:

$$\Delta\Lambda_{\text{chirp}} = \Lambda_0(\varepsilon_{\max} - \varepsilon_{\min}). \quad (2.66)$$

Podstawiając równanie (2.66) do równania (2.61) otrzymuje się zależność, która określa szerokość widmową związaną z okresem siatki rozciągniętej.

$$\Delta\lambda_{\text{chirp}} = 2n_{\text{eff}} \Delta\Lambda_{\text{chirp}}. \quad (2.67)$$

Zatem szerokość widmowa siatki zmienia się liniowo wraz z przyłożoną siłą zgodnie z poniższym wyrażeniem:

$$\Delta\lambda_{\text{chirp}} = 2n_{\text{eff}} \Lambda_0 \frac{F\left(\frac{1}{\left(1 - \frac{z}{z_0}\right)} - 1\right)}{E \cdot s_1}. \quad (2.68)$$

W zależności od przyłożonej siły powodującej odkształcenie siatki, zgodnie z (2.68), zależność $\Delta\lambda_{\text{chirp}}$ od temperatury nie występuje. Uwzględniając fakt, że czułość temperaturowa wielkości $\Delta\lambda_{\text{chirp}}$ jest równa zero oraz zapisując jej zależność od odkształcenia jako:

$$\Delta\lambda_{\text{chirp}} = K_{\varepsilon\lambda\text{chirp}} \Delta\varepsilon, \quad (2.69)$$

oraz dodając równanie (2.60), otrzymano zredukowane równanie macierzowe czujnika w postaci:

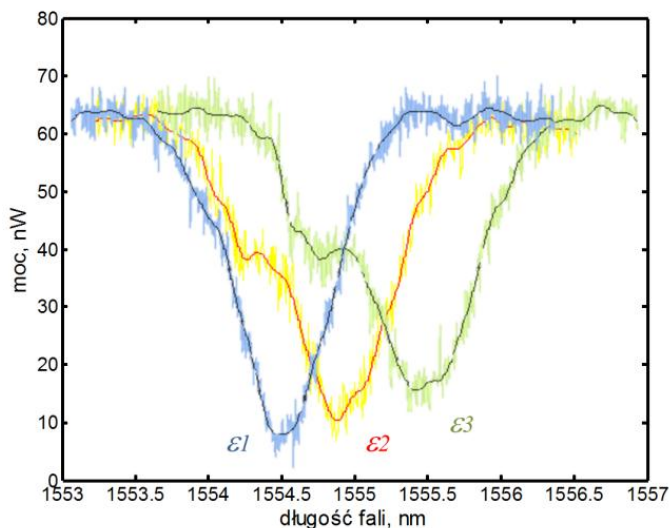
$$\begin{bmatrix} \Delta T \\ \Delta\varepsilon \end{bmatrix} = \frac{1}{K_{T\lambda A} K_{\varepsilon\lambda\text{chirp}}} \begin{bmatrix} K_{\varepsilon\lambda\text{chirp}} & -K_{\varepsilon\lambda A} \\ 0 & K_{T\lambda A} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta\lambda_B^A \\ \Delta\lambda_{\text{chirp}} \end{bmatrix}. \quad (2.70)$$

W celu eksperymentalnego potwierdzenie powyższych rozważań przygotowany został układ pomiarowy ze standardową (zamiast stożkowej) światłowodową siatką Bragga. W układzie tym uzyskano niejednorodne odkształcenie pozwalające na uzyskanie informacji o wielkościach odzwierciedlonych nie tylko w długości fali Bragga, ale także w szerokości widma odbiciowego siatki.

Analizując równanie (2.70) widać, że zmianę odkształcenia i temperatury można określić na podstawie przesunięcia długości fali Bragga i szerokości

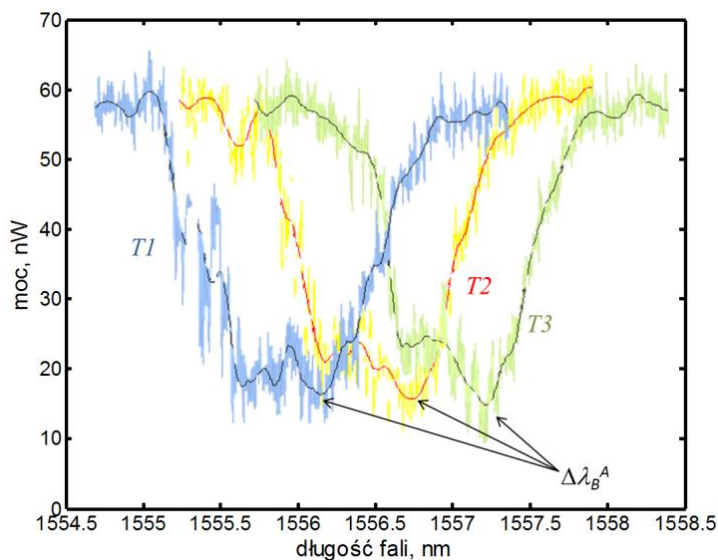
widma pojedynczej siatki jednorodnej. Potwierdza to możliwość równoczesnego pomiaru odkształcenia i temperatury przy wykorzystaniu pojedynczej FBG.

Siatka Bragga użyta w eksperymencie posiadała długość 10 mm. Wytworzono ją z użyciem maski fazowej oraz wiązki lasera UV o długości fali 244 nm. Światłowód był wcześniej pompowany wodorem. Centralna długość fali oraz współczynnik odbicia wynosiły odpowiednio 1554,5 nm oraz 90%. Rysunek 2.25 przedstawia wyniki pomiarów widm odbiciowych siatki dla różnych wartości odkształcenia. Na uwagę zasługuje zmiana szerokości charakterystyki widmowej siatki, w miarę wzrostu wartości odkształcenia. Szerokość widma przy braku oddziaływań wynosi 0,9 nm.



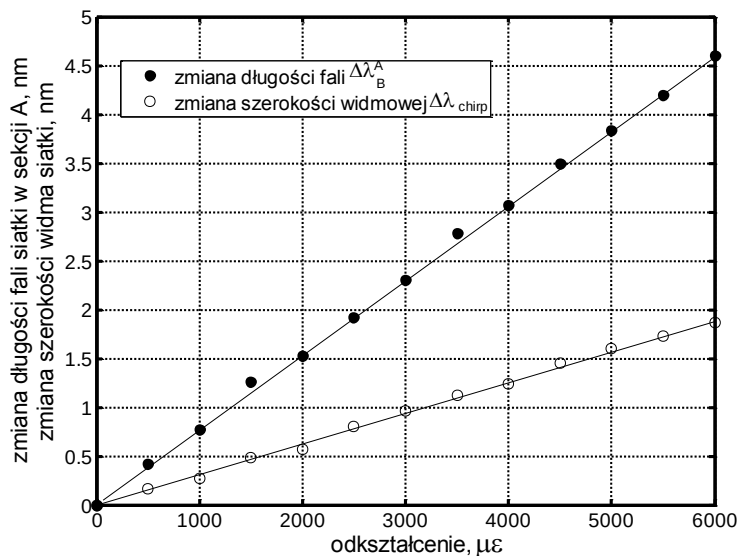
Rys. 2.25. Charakterystyki transmisyjne zaproponowanego czujnika przy różnych wartościach odkształcenia i stałej temperaturze, $\varepsilon_1 < \varepsilon_2 < \varepsilon_3$

Rysunek 2.26 prezentuje zmierzone widma FBG w warunkach początkowych ($\Delta T = 0$) oraz przy zmienianej wartości temperatury, ale przy stałym odkształceniu. Zmiana temperatury powoduje przesunięcie całej charakterystyki widmowej, szerokość widma pozostaje niezmienna, przesuwają się jedynie pasmo zaporowe siatki.



Rys. 2.26. Charakterystyki widmowe transmisyjne zaproponowanego czujnika dla stałego odkształcenia i różnych wartości temperatury, $T1 < T2 < T3$

Odpowiedź czujnika na odkształcenie przy stałej temperaturze przedstawia rysunek 2.27.



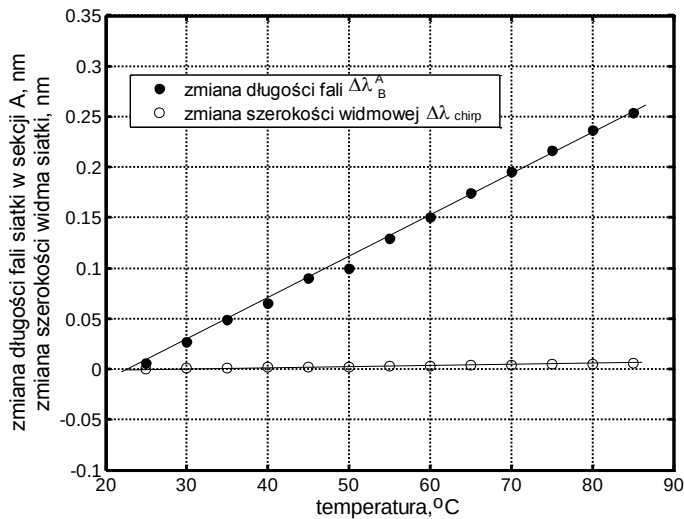
Rys. 2.27. Wyniki pomiarów odpowiedzi czujnika na odkształcenie uzyskane przy stałej temperaturze o wartości 25°C

Zgodnie z analizą teoretyczną, w szczególności z zależnością (2.68), zbudowany czujnik wykazuje liniową zależność szerokości pasma $\Delta\lambda_{chirp}$ od wywołanego odkształcenia. Przesunięcie długości fali Bragga części siatki w strefie $\Delta\lambda_B^A$ jest również liniowo zależne od odkształcenia. Wykreślone (na podstawie danych uzyskanych w wyniku pomiarów laboratoryjnych) proste regresji, pozwoliły określić liniowość uzyskanych charakterystyk. Proste regresji przedstawione zostały na rysunku 2.27 linią ciągłą, zaś nieliniowość charakterystyki szerokości pasma określona została na podstawie wielkości błędu nieliniowości, który został obliczony zgodnie z zależnością:

$$\delta_{nl\lambda chirp} = \frac{\Delta(\Delta\lambda_{chirp})_{MAX}}{(\Delta\lambda_{chirp})_{MAX} - (\Delta\lambda_{chirp})_{MIN}} \cdot 100\%, \quad (2.71)$$

gdzie $\Delta(\Delta\lambda_{chirp})_{MAX}$ jest wartością maksymalną bezwzględnych różnic pomiędzy wyznaczoną na podstawie równania prostej regresji i wyników pomiarów szerokości widma. $(\Delta\lambda_{chirp})_{MAX}$ i $(\Delta\lambda_{chirp})_{MIN}$ są odpowiednio wartością maksymalną i minimalną różnicy pomiędzy szerokością pasma odbiciowego czujnika – uzyskanej z pomiaru, a szerokością pasma odbiciowego uzyskaną na podstawie regresji liniowej. Wyznaczone w ten sposób wartości błędów nieliniowości wyniosły $\delta_{nl\lambda chirp} = 2,70\%$ oraz $\delta_{nl\lambda A} = 2,38\%$ odpowiednio dla szerokości widmowej $\Delta\lambda_{chirp}$ oraz przesunięcia długości fali $\Delta\lambda_B^A$. Na podstawie kąta nachylenia prostych regresji wyznaczone czułości na odkształcenie FBG użytej do badań wyniosły $K_{\varepsilon\lambda A} = 0,767 \cdot 10^{-6} \text{ m}/\varepsilon$ oraz $K_{\varepsilon\lambda chirp} = 0,311 \cdot 10^{-6} \text{ m}/\varepsilon$.

Rysunek 2.28 przedstawia odpowiedź temperaturową zbudowanego układu czujnika. Można zauważyć, że wraz ze wzrostem temperatury, długość fali rezonansu na charakterystyce odbiciowej wzrasta również liniowo, podczas gdy szerokość połówkowa widma odbiciowego nieznacznie zmienia się o $\sim 0,1 \text{ pm}$ wraz ze wzrostem temperatury o 1°C . Zgodnie z analizą matematyczną, szerokość widmowa charakterystyki czujnika powinna być nieczuła na zmiany temperatury. Pojawienie się niewielkiej wrażliwości szerokości widma na temperaturę może świadczyć o niedoskonałości klejenia siatki do próbki, w wyniku której następuje różnica pomiędzy odkształceniem części siatki naklejonej w strefie A i strefie B próbki. Może to skutkować poszerzeniem odbiciowej charakterystyki widmowej.



Rys. 2.28. Wyniki pomiarów odpowiedzi czujnika na temperaturę uzyskane przy stałym odkształceniu równym 1000 $\mu\epsilon$

Podczas pomiarów temperaturowych błędy nieliniowości wyniosły 1,50% oraz 0,01%, natomiast czułości temperaturowe $K_{T\lambda A} = 4,129 \cdot 10^{-12}$ m/K oraz $K_{T\lambda chirp} = 0,097 \cdot 10^{-12}$ m/K, odpowiednio dla przesunięcia długości fali oraz poszerzenia widma odbiciowego. Uwzględniając wartości czułości wyznaczone na podstawie pomiarów eksperymentalnych, stało się możliwe zapisanie nowego równania macierzowego (2.59) zawierającego aktualne wartości wyznaczonych parametrów, które teraz przyjmie następującą postać:

$$\begin{bmatrix} \Delta\lambda_B^A \\ \Delta\lambda_{chirp} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{T\lambda A} = 4,129 \times 10^{-12} \text{ m/K} & K_{\epsilon\lambda A} = 0,767 \times 10^{-6} \text{ m}/\epsilon \\ K_{T\lambda chirp} = 0,097 \times 10^{-12} \text{ m/K} & K_{\epsilon\lambda chirp} = 0,311 \times 10^{-6} \text{ m}/\epsilon \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta\epsilon \\ \Delta T \end{bmatrix}. \quad (2.72)$$

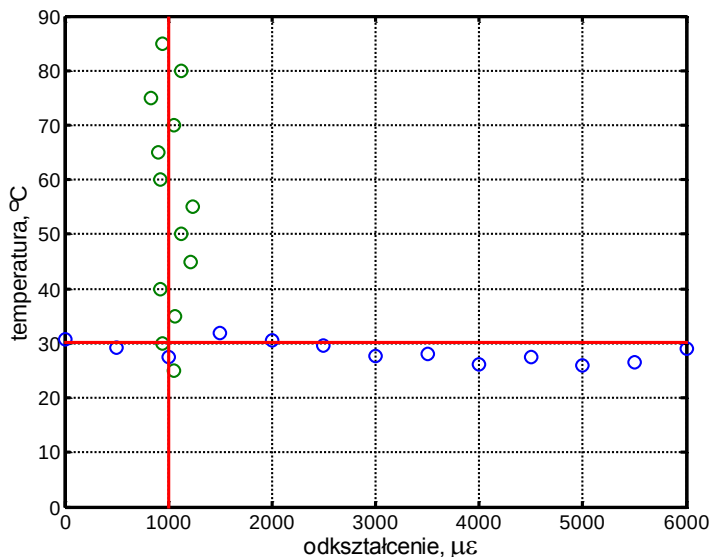
Poprzez odwrócenie macierzy, możliwe jest wyznaczenie odkształcenia i temperatury przy już znanych wartościach: przesunięcia długości fali Bragga siatki w strefie A oraz szerokości widmowej całej siatki. Wyznacznik macierzy z równania (2.72) można zdefiniować za pomocą poniższego równania:

$$D = K_{T\lambda A} K_{\epsilon\lambda chirp} - K_{\epsilon\lambda A} K_{T\lambda chirp}. \quad (2.73)$$

Wyznacznik ten nie przyjmuje wartości zerowej. Oznacza to dobre uwarunkowanie macierzy z równania (2.72) i pozwala na aktualizację równania przetwarzania (2.70) do postaci:

$$\begin{bmatrix} \Delta T \\ \Delta\epsilon \end{bmatrix} = \frac{1}{1,21} \begin{bmatrix} 0,311 \times 10^6 \text{ m}/\epsilon & -0,767 \times 10^{-6} \text{ m}/\epsilon \\ -0,097 \times 10^{-12} \text{ m/K} & 4,129 \times 10^{-12} \text{ m/K} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta\lambda_B^A \\ \Delta\lambda_{chirp} \end{bmatrix}. \quad (2.74)$$

Pomiary przesunięcia długości fali oraz szerokości spektralnej pozwoliły na dokonanie oceny właściwości czujnika, który został poddany wymuszeniom o wartościach z zakresu 0 $\mu\epsilon$ do 6000 $\mu\epsilon$ przy stałej temperaturze równej 30 °C. Następnie układ umieszczony był w komorze termicznej, w zakresie temperatur 23,5 °C – 85 °C i przy stałym, niewielkim odkształceniu o wartości 1000 $\mu\epsilon$. Do wyznaczenia wartości zmian odkształcenia oraz temperatury wykorzystano równanie (2.74), a wyniki tych pomiarów i obliczeń zestawione zostały na rysunku 2.29.

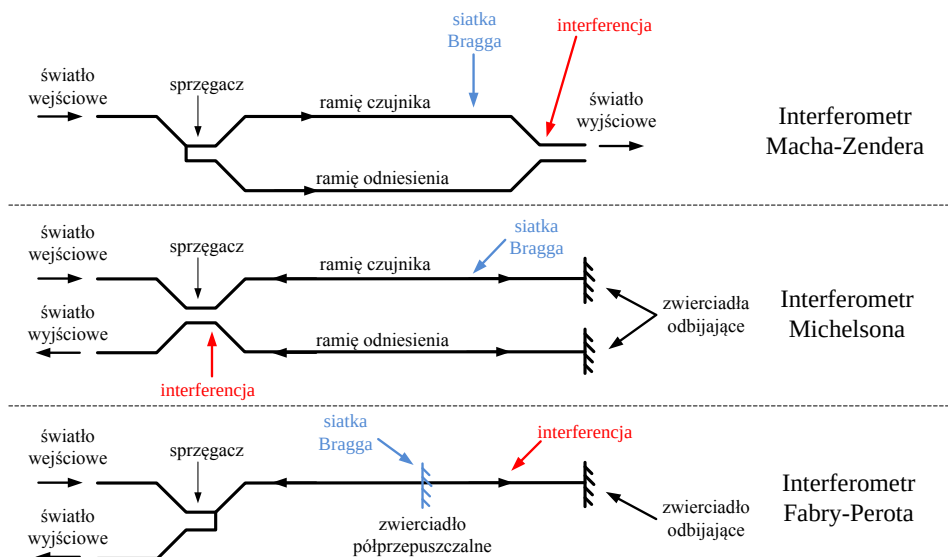


Rys. 2.29. Porównanie wyników równoczesnych pomiarów odkształcenia i temperatury z wartościami zadanyymi

Podsumowując możemy stwierdzić, że możliwy jest jednoczesny pomiar odkształcenia i temperatury czujnikiem z pojedynczą i jednorodną siatką Bragga. Wadą sprawdzanej laboratoryjnie metody jednoczesnego pomiaru dwóch wielkości (odkształcenia i temperatury), okazuje się potrzeba pomiaru szerokości widma, co wymaga skomplikowanych układów przesłuchujących siatkę. Możliwość równoczesnego pomiaru odkształcenia i temperatury przy wykorzystaniu pojedynczej FBG, daje perspektywę zwielokrotnienia tego typu czujnika w stosunku do czujników opartych na kilku siatkach lub elementach optoelektronicznych modulujących widmo wraz ze zmianą wielkości mierzonej. To z kolei pozwala na zwiększenie ilości czujników we włóknie. Poprawę uwarunkowania macierzy, a tym samym dokładności pomiaru, można uzyskać stosując kleje o większym współczynniku Younga (np. Sikadur-30 o module Younga $E \approx 13$ GPa). W badaniach zastosowano klej epoksydowy o współczynniku Younga $E \approx 2,5$ GPa.

2.7. Układy interferometru światłowodowego wykorzystujące światłowodowe siatki Bragga

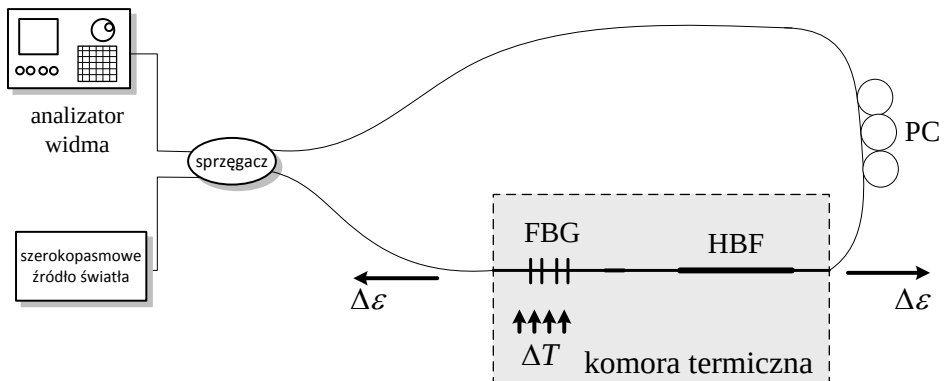
Osobną grupę czujników do równoczesnego pomiaru odkształcenia i temperatury stanowią układy wykorzystujące światłowodowe siatki Bragga pracujące w pętli interferometru Sagnaca [103, 218, 262], Macha-Zendera [5, 120, 284], Fabry-Perota [30, 101, 129, 236] oraz Michelsona [79, 109, 249, 251]. Wykorzystują one zalety interferometrów światłowodowych, polegające głównie na dużej czułości oraz w pełni światłowodowej budowie. Pozwala to na prowadzenie sygnału świetlnego modulowanego wielkością mierzoną w zamkniętym ośrodku. Rozwój i badania nad możliwością wykorzystania interferometrów w charakterze czujników są ograniczone ze względu na silną zależność ich parametrów od temperatury oraz ich nieliniową charakterystykę przetwarzania. Wady te można jednak wyeliminować poprzez łączenie interferometrów światłowodowych z siatkami Bragga. Na rysunku 2.30 przedstawione zostały podstawowe układy interferometrów z zaznaczeniem miejsc, w których montowane są siatki oraz obszarów, w których następuje interferencja fal.



Rys. 2.30. Układy wybranych interferometrów światłowodowych z siatkami Bragga

Klasyczny interferometr światłowodowy Macha-Zendera, zgodnie z rysunkiem 2.30, opiera się na interferencji światła uzyskiwanego z jednomodowego źródła światła. Po jego rozdzieleniu na sprzęgaczu powstają dwie wiązki propagujące w interferometrze. Ramiona takiego interferometru (zarówno pomiarowe jak i odniesienia) są utworzone przez włókna optyczne

jednomodowe. Sumowanie oraz interferencja wiązek, po ich przejściu przez dwa ramiona, następuje w drugim sprzęgaczu optycznym. Wielkość mierzona wpływa na ramię pomiarowe interferometru, zmieniając obraz interferencyjny, który z kolei niesie informację o wartości tej wielkości. Rozwijane nowe układy interferometrów Macha-Zendera, umożliwiają oprócz pomiaru danej wielkości fizycznej, wyznaczenie również temperatury, w której pomiar był dokonany (temperatura jest w takiej sytuacji drugą wielkością mierzoną). Omówiony układ interferometru Macha-Zendera wykorzystany został do pomiaru odkształcenia i temperatury. W przypadku układów, w których siatki Bragga pracują w ramieniu interferometru Macha-Zendera w celu wywołania interferencji wielu wiązek optycznych w pętli światłowodowej, można wykorzystać włókna o dużej dwójłomności. Na rysunku 2.31 przedstawiono układ wykorzystywany do jednoczesnego pomiaru odkształcenia i temperatury oparty na pętli Sagnaca oraz FBG i działający na zasadzie interferometru Macha-Zendera. Pętla interferometru utworzona jest ze sprzęgacza optycznego 3-dB, siatki Bragga (FBG), włókna dwójłomnego (HBF – ang.: *High-Birefringence Fiber*) oraz kontrolera polaryzacji (PC – ang.: *Polarization Controller*). Sprzęgacz optyczny rozdziela światło z szerokopasmowego źródła światła na dwie wiązki optyczne propagujące zgodnie i przeciwnie do ruchu wskazówek zegara. Każda z tych wiązek jest dodatkowo, po przejściu przez HBF, dzielona na dwie wiązki.

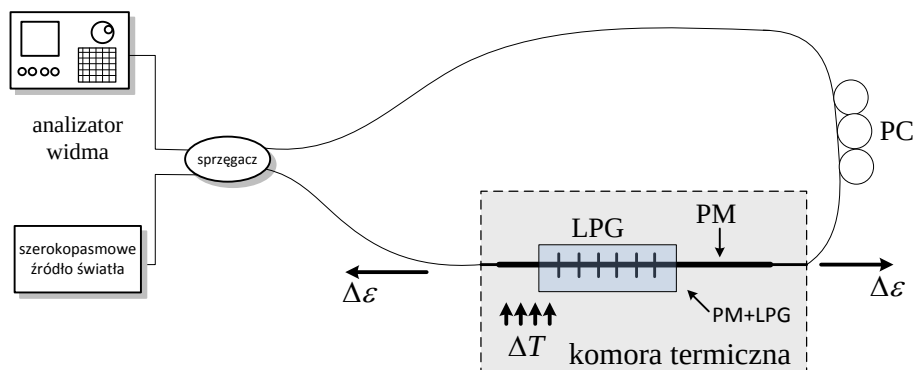


Rys. 2.31. Układ czujnika do równoczesnego pomiaru odkształcenia i temperatury opartego na siatce Bragga umieszczonej w pętli interferometru Sagnaca, rozpatrywanego jak układ interferometru Macha-Zendera

Stany polaryzacji obydwu wiązek poruszających się w przeciwnych kierunkach są kontrolowane i modyfikowane przez kontroler polaryzacji (PC). Pętla interferometru posiada inną od FBG czułość na odkształcenie i temperaturę. Wiązki, które propagują w przeciwnych kierunkach, wskutek przesunięcia fazowego pomiędzy nimi, interferują po dotarciu do sprzęgacza optycznego. W celu wykonania równoczesnego pomiaru odkształcenia i temperatury, widmo odbiciowe siatki Bragga musi pokrywać się z częścią

charakterystyki widmowej całej pętli światłowodowej, co można osiągnąć np. poprzez odpowiedni dobór wartości dwójłomności HBF lub jego długości.

W układach czujników światłowodowych stosowane są również interferometry Sagnaca. W klasycznym interferometrze Sagnaca wiązka światła jest rozdzielana na dwie równe wiązki przy wykorzystaniu sprzęgacza optycznego, które są kierowane do pętli światłowodowej. Kierunek propagacji obydwu wiązek światła w pętli jest przeciwny. W pętli światłowodowej dochodzi do interferencji wiązek, zależnej od wielkości mierzonej oddziałującej na tą pętlę. Obserwacja obrazu interferencyjnego lub pomiar sygnału po interferencji np. przy wykorzystaniu fotodetektora, pozwala na wyznaczenie wielkości fizycznej, która wpłynęła na pętlę, a tym samym na wynik interferencji. Obecnie konstrukcja czujników optoelektronicznych do równoczesnego pomiaru odkształcenia i temperatury opiera się również na wykorzystaniu interferometru Sagnaca z siatką długookresową, zapisaną na światłowodzie zachowującym polaryzację. W niniejszym układzie wykorzystuje się zjawisko zmian natężenia światła spowodowane wywołanym odkształceniem czujnika oraz przesunięcie długości fal rezonansowych wraz ze zmianą temperatury. Schemat układu czujnika z interferometrem Sagnaca oraz długookresową siatką Bragga przedstawia rysunek 2.32.

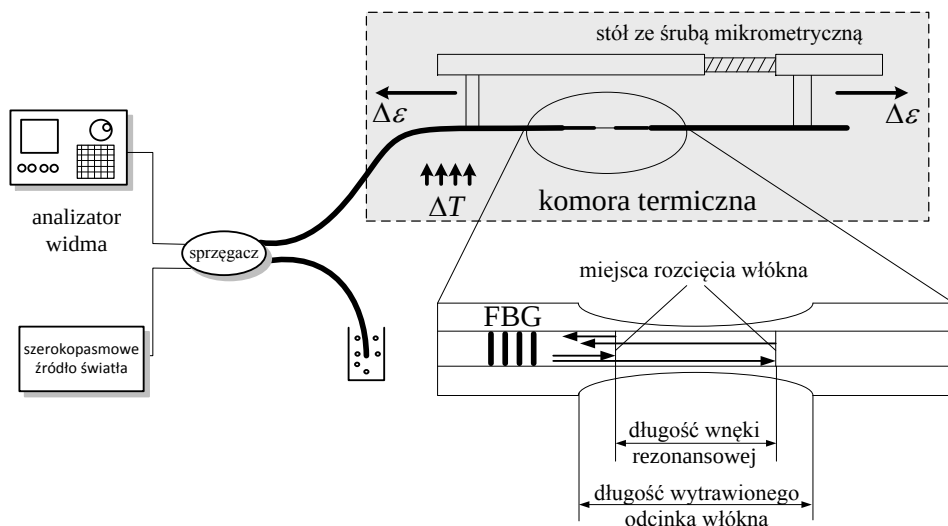


Rys. 2.32. Schemat pomiarowy czujnika do pomiaru odkształcenia i temperatury, na którym zaznaczono PM – światłowód utrzymujący polaryzację. Interferometr Sagnaca tworzą: LPG, PM, PC oraz sprzęgacz optyczny

Układ pomiarowy składa się z szerokopasmowego źródła światła, sprzęgacza 3-dB, oraz odcinka włókna PMF, na którym przy wykorzystaniu lasera CO₂ zapisana jest długookresowa siatka Bragga – LPG. Sprzęgacz 3-dB rozdziela sygnał wejściowy z szerokopasmowego źródła światła na dwie wiązki propagujące w przeciwnych kierunkach. Do regulacji stanu polaryzacji dwóch wiązek wykorzystywany jest kontroler polaryzacji (PC). Dwie propagujące w przeciwnych kierunkach fale są następnie ponownie łączone w sprzęgacz

3dB, gdzie następuje ich interferencja. Widmo wyjściowe jest rejestrowane przez OSA.

Kolejnym interferometrem wykorzystywanym jako czujnik wielkości fizycznych jest światłowodowy interferometr Fabry-Perota. W ujęciu klasycznym światłowodowego interferometru Fabry-Perota mamy do czynienia z układem źródła światła, sprzęgacza światłowodowego, włókna jednomodowego z naniesionymi zwierciadłami częściowo przezroczystymi oraz fotodetektora. Wnękę interferometru stanowią wspomniane zwierciadła. Fale pochodzące ze źródła światła odbijają się wielokrotnie od luster, a po opuszczeniu wnętrza rezonatora ich superpozycja stanowi falę wyjściową. Prążki interferencyjne obserwowane w widmie interferometru ulegają zmianie w zależności od wartości wielkości mierzonej działającej na interferometr. Opracowywane nowe układy czujników z interferometrem Fabry-Perota do pomiaru odkształcenia i temperatury są nieczułe na zmiany temperatury lub wręcz umożliwiają jej pomiar. Przykładem takiego czujnika jest interferometr Fabry-Perota z siatką Bragga. Schemat omawianego układu przedstawiony jest na rysunku 2.33.

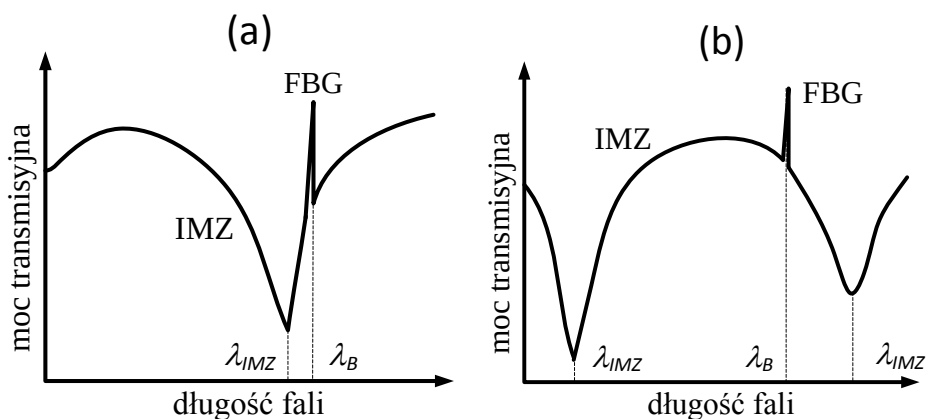


Rys. 2.33. Schemat układu pomiarowego czujnika z interferometrem Fabry-Perota oraz światłowodową siatką Bragga do pomiaru odkształcenia i temperatury

Interferometr jest wytworzony ze światłowodu jednomodowego, wytrawionego w kwasie fluorowodorowym oraz drugiego światłowodu, który rozcina się w celu utworzenia wnęki Fabry-Perota. Światło z szerokopasmowej diody LED jest wprowadzane poprzez sprzęgacz do pętli interferometru. Widmo odbiciowe siatki Bragga oraz interferometru jest rejestrowane w analizatorze widma. Wolny koniec sprzęgacza umieszcza się dodatkowo w płynie

immersyjnym, celem wyeliminowania niepotrzebnych odbić światła od końca włókna, które mogłyby mieć wpływ na wynik pomiaru. Różna czułość parametrów widma FBG i interferometru na wielkości mierzone umożliwia ich jednoczesny pomiar.

Poniżej przedstawiono charakterystyki widmowe wybranych układów interferometrów światłowodowych oraz macierze przetwarzania wraz ze wskazaniem wielkości charakterystycznych, przy wykorzystaniu których wyznaczane są odkształcenie i temperatura. Charakterystyka widmowa układu interferometru Macha-Zendera z FBG umieszczona została na rysunku 2.34.



Rys. 2.34. Widma transmisyjne interferometru Macha-Zendera ze światłowodową siatką Bragga w przypadku braku odkształcenia, (a) pomiar w temperaturze równej T_1 , (b) pomiar w temperaturze równej T_2 , przy czym $T_1 < T_2$

Należy zwrócić uwagę, że widmo FBG jest nałożone na widmo interferometru. Temperaturę otoczenia i wywołane odkształcenie można określić na podstawie pomiaru przesunięcia rezonansowej długości fali FBG i widma interferometru. Wywołane odkształcenie czujnika (rys. 2.34) lub zmiana temperatury otoczenia, dwójłomność, długość światłowodu oraz okres siatki, spowodują przesunięcie rezonansowej długości fali zarówno samej siatki Bragga jak i widma interferometru. Przesunięcie długości fali dla FBG i interferometru można opisać równaniem:

$$\begin{bmatrix} \Delta\lambda_B \\ \Delta\lambda_{IMZ} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{TB} & K_{\epsilon B} \\ K_{TIMZ} & K_{\epsilon IMZ} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta T \\ \epsilon \end{bmatrix}, \quad (2.75)$$

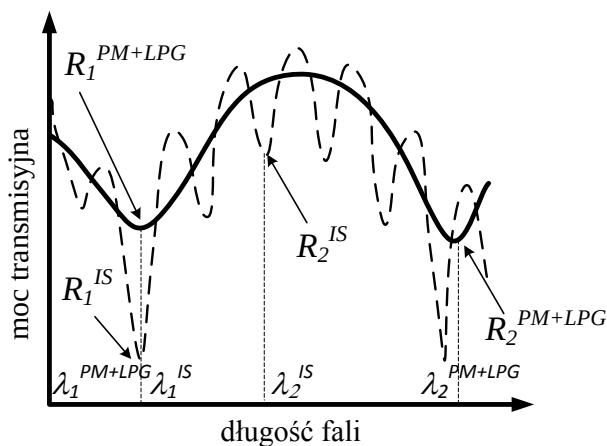
gdzie $\Delta\lambda_B$ jest przesunięciem długości fali FBG, $\Delta\lambda_{IMZ}$ oznacza przesunięcie długości fali interferometru, K_{TB} i $K_{\epsilon B}$ są czułościami długości fali Bragga na temperaturę i odkształcenie, natomiast K_{TIMZ} oraz $K_{\epsilon IMZ}$ oznaczają czułości długości fali charakterystycznej interferometru na temperaturę i odkształcenie. ΔT i ϵ są odpowiednio zmianą temperatury oraz odkształceniem czujnika.

Czułości na temperaturę i odkształcenie określa się w ramach badań eksperymentalnych. Następnie po odwróceniu macierzy zmianę temperatury i odkształcenie wyznaczyć można na podstawie zależności macierzowej:

$$\begin{bmatrix} \Delta T \\ \varepsilon \end{bmatrix} = \frac{1}{K_{TB}K_{\varepsilon IMZ} - K_{TIMZ}K_{\varepsilon B}} \begin{bmatrix} K_{\varepsilon IMZ} & -K_{\varepsilon B} \\ -K_{TIMZ} & K_{TB} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta \lambda_B \\ \Delta \lambda_{IMZ} \end{bmatrix}. \quad (2.76)$$

Analizując równanie (2.76) zauważyć można, że aby otrzymać dużą czułość pomiarową, dwa składniki w równaniu: $K_{TB}K_{\varepsilon IMZ}$ oraz $K_{TIMZ}K_{\varepsilon B}$ powinny mieć przeciwne znaki. W sytuacji, gdy jako czujnik wykorzystana jest układ złożony z dwóch elementów optoelektronicznych do pomiaru odkształcenia i temperatury, pożądany jest wybór dwóch elementów o przeciwnych kierunkach odpowiedzi na jedną wielkość mierzoną (np. odkształcenie) i takich samych kierunkach, ale różnych wartościach odpowiedzi na drugą wielkość (np. temperaturę).

Okresowe widmo transmisyjne interferometru Sagnaca modulowane przez widmo transmisyjne LPG zostało przedstawione na rys. 2.35.



Rys. 2.35. Charakterystyka widmowa interferometru Sagnaca (linia przerywana) oraz układu PM + LPG (linia ciągła)

Linia przerywana na rysunku 2.35 przedstawia widmo transmisyjne interferometru Sagnaca, modulowane przez widmo transmisyjne układu PM+LPG reprezentowane na rysunku linią ciągłą. Interferometr Sagnaca działa jak filtr pasmowo-przepustowy o wielu centrach. Należy zwrócić uwagę na to, że w widmie całego układu PM + LPG pojawiają się dwa rezonansy, związane ze stanami polaryzacji światłowodu PM, które na rysunku oznaczone zostały jako R_1^{PM+LPG} oraz R_2^{PM+LPG} . Centralne długości fali rezonansów są najczęściej

oddalone od siebie o 30 nm. W charakterystyce widmowej interferometru Sagnaca obserwujemy szereg prążków interferencyjnych, spośród których do pomiaru odkształcenia i temperatury, zgodnie z rysunkiem 2.35, wybrane zostały rezonansy oznaczone jako R_1^{IS} oraz R_2^{IS} . Centralne długości fal tych rezonansów oddalone są od siebie typowo o 12 nm. W zaprezentowanym układzie czujnika temperatury i odkształcenia wykorzystywana jest informacja dotycząca nie tylko przesunięcia rezonansów R_1^{IS} i R_2^{IS} , ale również poziomu mocy transmisyjnej w miejscach tych rezonansów. Powyższy układ ma tę zaletę, że stwarza możliwość, aby jeden ze współczynników czułości równania przetwarzania przyjął wartość zerową, co z kolei wpływa na dobre uwarunkowanie macierzy przetwarzania. Istnieje możliwość analizy uwarunkowania macierzowego niniejszego czujnika z interferometrem Sagnaca, która pozwoli na określenie warunków, w których wartość jednej z czterech czułości macierzy przetwarzania będzie równa zero. Analizę rozpocząć należy od zapisania równania macierzowego dla tak uwarunkowanego pomiaru odkształcenia i temperatury z wykorzystaniem układu interferometru Sagnaca z siatką długoookresową. Uwzględniając oznaczenia z rysunku 2.35, macierzowe równanie przetwarzania wyglądać będzie następująco:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_1^{IS} \\ \Delta \lambda_2^{IS} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{\varepsilon 1}^{IS} & K_{T1}^{IS} \\ K_{\varepsilon 2}^{IS} & K_{T2}^{IS} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta \varepsilon \\ \Delta T \end{bmatrix}, \quad (2.77)$$

gdzie $K_{\varepsilon 1}^{IS}$ i K_{T1}^{IS} reprezentują czułości zmiany mocy ΔP_1^{IS} przypadającej dla długości fali λ_1^{IS} rezonansu R_1^{IS} odpowiednio na odkształcenie i temperaturę. Współczynniki $K_{\varepsilon 2}^{IS}$ oraz K_{T2}^{IS} reprezentują z kolei czułości przesunięcia długości fali $\Delta \lambda_2^{IS}$ odpowiadające rezonansowi R_2^{IS} odpowiednio na odkształcenie i temperaturę.

Można udowodnić, że składnik macierzy (2.77) oznaczający czułość przesunięcia długości fali interferometru Sagnaca na odkształcenie (oznaczony jako $K_{\varepsilon 2}^{IS}$) przyjmie wartość zbliżoną do zera. Parametrami, którymi można wpływać na wartości współczynników czułości są m.in. dwójłomność światłowodu PM, oraz jego długość. Założono, że dwójłomność światłowodu PM wynosi $5 \cdot 10^{-4}$ dla długości fali 1550 nm, a jego długość wynosi $L_{PM} = 1,4$ m. Zależność określająca odległość pomiędzy dwoma sąsiednimi minimami (lub maksimumami) widma transmisyjnego interferometru Sagnaca określa równanie:

$$\Delta \lambda = \frac{\lambda^2}{BL_{PM}}, \quad (2.78)$$

gdzie B jest dwójłomnością światłowodu PM, natomiast λ oznacza długość fali.

W sytuacji, gdy pojawi się odkształcenie układu PM+LPG w zadanej temperaturze, widmo transmisyjne układu przesunie się, co skutkować będzie zmianą mocy rezonansu R_1^{IS} na charakterystyce widmowej interferometru

Sagnaca. Należy zwrócić uwagę, że zmiana mocy dla R_1^{IS} nastąpi wraz ze zmianą wywołanego odkształcenia czujnika $\Delta\varepsilon$ oraz temperatury ΔT , co można wyrazić zgodnie z równaniem macierzowym (2.77) następującą zależnością:

$$\Delta P = K_{\varepsilon 1}^{IS} \Delta\varepsilon + K_{T1}^{IS} \Delta T. \quad (2.79)$$

Współczynnik czułości mocy na odkształcenie $K_{\varepsilon 1}^{IS}$ posiada w tym przypadku jednostkę [dB/ $\mu\varepsilon$], natomiast współczynnik czułości mocy na temperaturę K_{T1}^{IS} wyrażony będzie w [dB/°C]. Zmiana temperatury spowoduje przesunięcie zarówno widma interferometru Sagnaca, jak również widma całego układu PM+LPG. Czułość interferometru Sagnaca jest większa od czułości odpowiadającej czujnikom opartym na siatkach Bragga [196, 207]. Ta właściwość jest wykorzystywana przy wyborze długości fali $\Delta\lambda_2^{IS}$ odpowiadającej rezonansowi R_2^{IS} do pomiaru temperatury. Równanie przedstawiające zależność przesunięcia długości fali, odpowiadające temu rezonansowi w zależności od zmian temperatury, można zapisać zgodnie z macierzą (2.77) w następującej postaci:

$$\Delta\lambda = K_{\varepsilon 2}^{IS} \Delta\varepsilon + K_{T2}^{IS} \Delta T, \quad (2.80)$$

gdzie $K_{\varepsilon 2}^{IS}$ w tym przypadku wyrażone jest w [nm/ $\mu\varepsilon$], natomiast współczynnik czułości temperaturowej K_{T2}^{IS} wyrazić należy w [nm/°C].

Odległość minimów widma transmisyjnego interferometru Sagnaca jest modulowana przez układ PM+LPG. Długość światłowodu utrzymującego polaryzację jest dużo większa od długości PM+LPG, (siatka długookresowa posiadała długość $L_{LPG} = 24$ mm) oraz uwzględniając że odkształcenie jest równe:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_{PMF} + L_{LPG}}, \quad (2.81)$$

otrzymuje się, że $\varepsilon \approx 0$. To z kolei oznacza, że wywołane odkształcenie nie ma wpływu na przesunięcie długości fali rezonansu R_2^{IS} , co oznacza że $K_{\varepsilon 2}^{IS} \approx 0$. Odwrócone równanie macierzowe na podstawie przeprowadzonej analizy (2.77) możemy zapisać w następującej postaci:

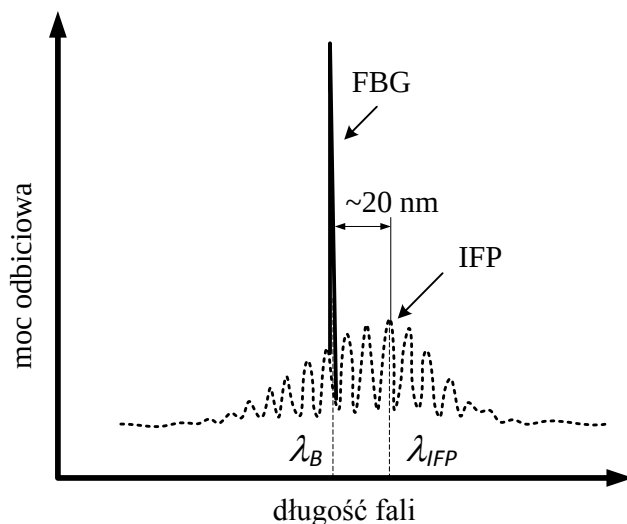
$$\begin{bmatrix} \Delta\varepsilon \\ \Delta T \end{bmatrix} = \frac{1}{D} \begin{bmatrix} K_{T2}^{IS} & -K_{T1}^{IS} \\ 0 & K_{\varepsilon 1}^{IS} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta P_1^{IS} \\ \Delta\lambda_2^{IS} \end{bmatrix}, \quad (2.82)$$

gdzie wyznacznik D będzie określony jako:

$$D = K_{\varepsilon 1}^{IS} K_{T2}^{IS}. \quad (2.83)$$

Zgodnie z równaniem (2.82) odkształcenie i temperatura może być wyznaczana przy wykorzystaniu opisanego czujnika poprzez pomiar zmian mocy ΔP_1^{IS} odpowiadającej rezonansowi R_1^{IS} oraz przesunięcia długości fali $\Delta \lambda_2^{IS}$ odpowiadającej rezonansowi R_2^{IS} .

Widma odbiciowe zarówno zintegrowanego czujnika opartego na interferometrze Fabry-Perota jak i FBG przedstawione zostały razem na rysunku 2.36. Silny wąskopasmowy pik reprezentuje sygnał z FBG, natomiast grzebieniasta, szerokopasmowa charakterystyka jest sygnałem z FPI (ang.: *Fabry-Perot Interferometer*).



Rys. 2.36. Charakterystyka widmowa interferometru Fabry-Perota oraz FBG

Podobnie jak w przypadku opisanego wcześniej interferometru Sagnaca z siatką LPG, również dla układu interferometru Fabry-Perota z siatką Bragga jeden ze współczynników czułości w macierzy przetwarzania jest równy zero. Decyduje to o dobrym uwarunkowaniu macierzy i możliwości równoczesnego pomiaru odkształcenia i temperatury. W czujniku z interferometrem Fabry-Perota i FBG zerowy współczynnik czułości dotyczy samego interferometru, podobnie jak w przypadku opisanego wcześniej układu z interferometrem Sagnaca. Różnica polega jedynie na rodzaju wielkości pomiarowej, na którą czułość jednego z parametrów interferometru Fabry-Perota jest zerowa. W przeciwieństwie do czujnika z interferometrem Sagnaca, w omawianym układzie Fabry-Perota zerowa czułość występuje w przypadku temperatury. W celu zapisania równania macierzowego analizowanego czujnika założono, że przesunięcia długości fali FBG od temperatury i naprężenia są liniowe, co zapisano w postaci:

$$\Delta \lambda_B = K_{\varepsilon 1} \Delta \varepsilon + K_{T1} \Delta T, \quad (2.84)$$

gdzie $K_{\varepsilon 1}$ i K_{T1} są czułościami długości fali Bragga siatki odpowiednio na odkształcenie i temperaturę. W przypadku interferometru Fabry-Perota przesunięcie długości fali rezonansowej $\Delta\lambda_{IFP}$ w zależności od odkształcenia $\Delta\varepsilon$ dane jest zależnością:

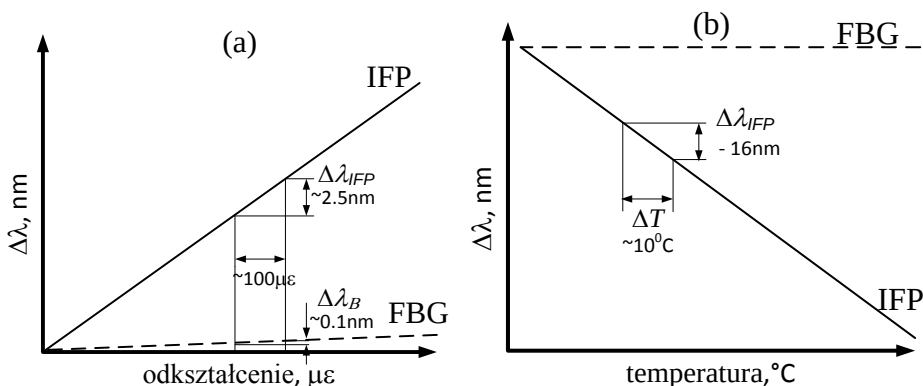
$$\Delta\lambda_{IFP} = K_{\varepsilon 2} \Delta\varepsilon, \quad (2.85)$$

gdzie $K_{\varepsilon 2}$ jest czułością na odkształcenie przesunięcia prążków interferometru Fabry-Perota. Przesunięcie długości fali spowodowane zmianą temperatury jest pomijalne. W analizowanym układzie zmianę odkształcenia i temperatury można określić wykorzystując równanie:

$$\begin{bmatrix} \Delta\varepsilon \\ \Delta T \end{bmatrix} = \frac{1}{-K_{T1}K_{\varepsilon 2}} \begin{bmatrix} 0 & -K_{T1} \\ -K_{\varepsilon 2} & K_{\varepsilon 1} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta\lambda_B \\ \Delta\lambda_{IFP} \end{bmatrix}. \quad (2.86)$$

Zatem pomiar przesunięcia długości fali Bragga oraz prążków interferencyjnych umożliwia jednocześnie wyznaczenie zmian temperatury i odkształcenia.

Zmiany parametrów charakterystycznych układów przedstawionych powyżej interferometrów Macha-Zendera, Sagnaca i Fabry-Perota, połączonych z siatkami Bragga w zależności od odkształcenia i temperatury, przedstawiają rysunki odpowiednio 2.37, 2.38 oraz 2.39.



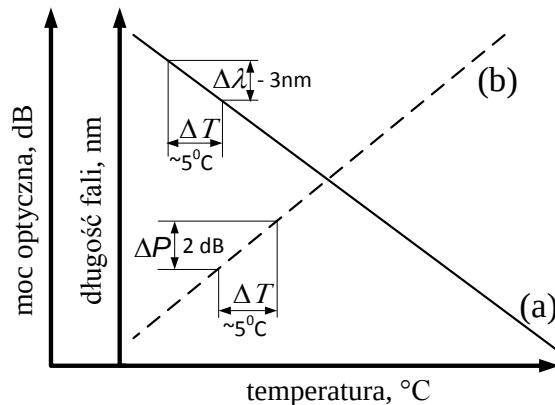
Rys. 2.37. Różnice w charakterystykach przesunięcia długości fali czujnika z interferometrem Macha-Zendera oraz siatki Bragga w funkcji: (a) odkształcenia, (b) temperatury

Na rysunku 2.37 przedstawiono typowe wartości przesunięcia długości fali czujnika z interferometrem Macha-Zendera, wyznaczone dla siatki Bragga o centralnej długości fali równej 1560 nm i współczynniku odbicia równym 85% oraz szerokości pasma równej 0,2 nm. Wartości zaznaczone na rysunku 2.37 dotyczą układu ze światłowodem jednomodowym utrzymującym polaryzację (typu Bow-Tie) zaprojektowanym na długość fali 1550 nm, o długości drogi zduńnienia równej 2,0 mm dla 633 nm oraz tłumienności równej 2 dB/km.

Analizując rysunek 2.27 widać, że czułość układu IFP na zmiany odkształcenia jest w porównaniu z siatką Bragga ponad dwudziestokrotnie większa. Czułość IFP na temperaturę jest natomiast kilka rzędów wielkości większa w zestawieniu z pojedynczą FBG. Znane są prace, w których wykazano, że czułości IFP na odkształcenie i temperaturę wynoszą odpowiednio $0,0253 \text{ nm}/\mu\epsilon$ i $-1,6025 \text{ nm}/^\circ\text{C}$. W przypadku FBG wartości czułości wynoszą odpowiednio $0,0011 \text{ nm}/\mu\epsilon$ oraz $0,0112 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ [284].

Zmierzone przesunięcia długości fali zmieniają się liniowo wraz ze zmianą odkształcenia i temperatury. Ujemna odpowiedź temperaturowa jest spowodowana silnym efektem pochodzącym od zmiany dwójłomności, która zmniejsza się wraz ze wzrostem temperatury.

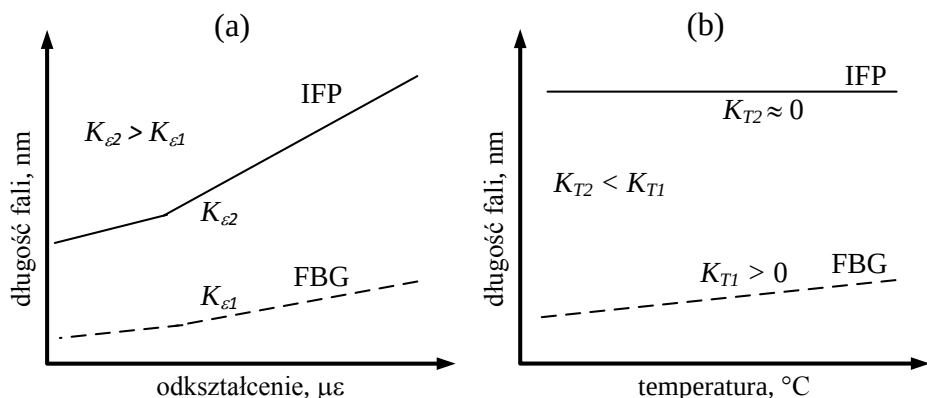
Na rysunku 2.38 zestawiono charakterystykę przedstawiającą przesunięcie długości fali oraz wykres zmian mocy optycznej prążków interferometru Sagnaca z siatką LPG w zależności od temperatury.



Rys. 2.38. Zmiany parametrów charakterystycznych układu interferometru Sagnaca z siatką LPG w zależności od odkształcenia i temperatury: (a) zmiana długości fali czujnika z interferometrem Sagnaca dla różnych wartości temperatury, (b) zmiana mocy prążka interferencyjnego interferometru w warunkach zmiennej temperatury

Wartości czułości wyznacza się podczas pomiarów temperaturowych przeprowadzanych w komorze o kontrolowanej temperaturze. Znane są prace, w których minimum transmisyjne jednego z prążków interferometru doznaje przesunięcia w kierunku mniejszych długości fal o $24,3 \text{ nm}$ dla temperatury w zakresie od 33°C do 70°C . Czułość przesunięcia długości fali na temperaturę czujnika z interferometrem Sagnaca wynosi wtedy $K_{T_2}^{IS} = -0,65 \text{ nm}/^\circ\text{C}$, co jest wartością ponad dziesięciokrotnie większą od czułości uzyskiwanej dla czujników temperatury opartych o siatki LPG na światłowodach jednomodowych [103], równej $0,058 \text{ nm}/^\circ\text{C}$.

Rysunek 2.39 przedstawia właściwości czujnika z interferometrem Fabry-Perota w warunkach zmieniającego się odkształcenia i temperatury.

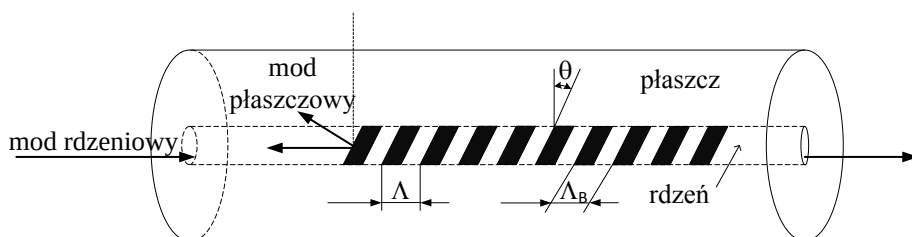


Rys. 2.39. Przesunięcia długości fali siatki Bragga i prążków interferometru Fabry-Perota w funkcji (a) odkształcenia, (b) temperatury. Oznaczenia czułości K na rysunku są zgodne z równaniem (2.86)

W pomiarach laboratoryjnych uzyskuje się wartości czułości temperaturowej rzędu $0,5 \text{ pm}/^{\circ}\text{C}$ oraz $9,3 \text{ pm}/^{\circ}\text{C}$ odpowiednio dla prążków interferometru oraz FBG [135]. Powyższe wartości wskazują, że przesunięcie prążków interferometru jest niezależne od temperatury. Zakres zmian przesunięcia prążków w stosunku do przesunięcia długości fali rezonansowej siatki Bragga jest dużo mniejszy i zmiany te mogą być pominięte. Przesunięcie prążków interferometru Fabry-Perota jest natomiast zależne od odkształcenia. Liniowość zmian przesunięcia prążków interferometru wraz ze zmianą odkształcenia jest stosunkowo wysoka. Istnieje zatem możliwość użycia informacji o odkształceniu, otrzymanej z przesunięcia prążków interferometru, do korekcji błędu odkształcenia spowodowanego zmianą temperatury. Należy zwrócić uwagę, że głównymi przyczynami błędów są – pomimo stałej długości wnętrza rezonansowej – brak stałości temperatury w komorze temperaturowej oraz skończona rozdzielczość OSA.

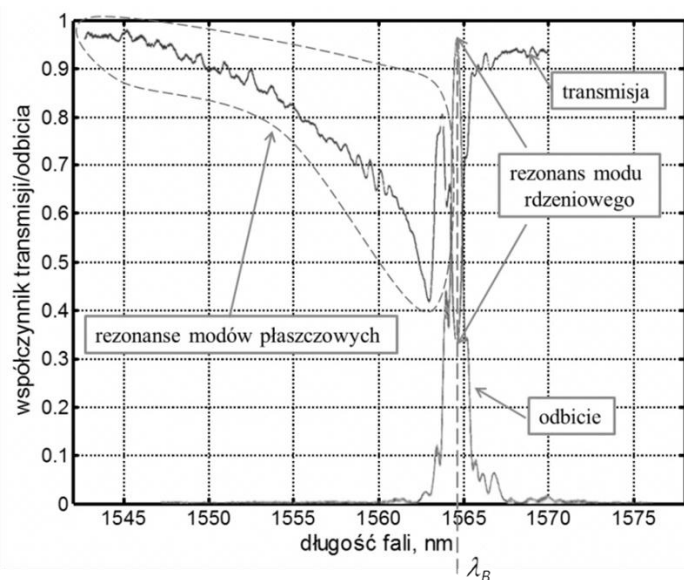
2.8. Wykorzystanie właściwości propagacyjnych modu rdzeniowego i modów płaszczowych

Kolejną grupą czujników optoelektronicznych opartych na światłowodowych siatkach Bragga, wykorzystywanych do pomiarów odkształcenia i temperatury, są układy zawierające tzw. skośne siatki Bragga [58]. Ten rodzaj siatek jest wykorzystywany do pomiarów wielu wielkości fizycznych, takich jak: współczynnika załamania [24, 157], ugięcia [98], siły [198], zgięć [199], temperatury [156] czy poziomu cieczy [97, 170]. Siatkę Bragga można potraktować jako modulację współczynnika załamania w rdzeniu światłowodu. Zasada działania takiej siatki polega na sprzęganiu podstawowego modu propagującego w kierunku dodatnim (od wejścia do wyjścia) do modu propagującego w kierunku przeciwnym (od wyjścia do wejścia siatki). Powyższe sprzężenie ma miejsce dla długości fali, która spełnia warunek dopasowania fazowego, nazywany warunkiem Bragga. Ukośna siatka Bragga (TFBG) jest również modulacją współczynnika załamania światła, w której płaszczyna prążków siatki jest dodatkowo skręcona w stosunku do osi światłowodu w celu wzmocnienia sprzężenia pomiędzy modelem propagującym w kierunku dodatnim w rdzeniu, a propagującymi w przeciwnym kierunku modami płaszczowymi. Schemat i zasadę działania ukośnej siatki Bragga przedstawia rysunek 2.40.



Rys. 2.40. Schemat TFBG. Λ_B okres siatki, Λ okres siatki wzdłuż osi włókna, θ kąt pochylenia siatki. Przerywane strzałki reprezentują mod rdzeniowy propagujący zgodnie ze zwrotem światła wprowadzanego do światłowodu. Linia ciągła reprezentuje sprzężenie do modu płaszczowego

Mody płaszczowe propagujące w przeciwnym kierunku są mocno tłumione, dlatego nie są obserwowalne w widmie odbiciowym siatki. Widać je jednak jako wielokrotne rezonanse w widmie transmisyjnym TFBG, co przedstawione zostało na rysunku 2.41.



Rys. 2.41. Widmo transmisyjne i odbiciowe ukośnej siatki Bragga z zaznaczoną długością fali Bragga oraz rezonansami modów płaszczowych

W przypadku, gdy siatka ukośna pracuje w charakterze czujnika, wykorzystuje się zmianę właściwości (najczęściej pozycji lub szerokości) zarówno rezonansu modu rdzeniowego jak i rezonansów modów płaszczowych. W TFBG istnieją dwa rodzaje sprzężenia modowego. Pierwszy odpowiada standardowemu (tak jak w przypadku jednorodnej siatki Bragga) sprzężeniu modu rdzeniowego propagującego w kierunku dodatnim (od źródła światła do drugiego końca włókna) do modu rdzeniowego propagującego w kierunku przeciwnym. Drugi typ rezonansu odpowiada sprzężaniu modu rdzeniowego, propagującego w kierunku dodatnim do modów płaszczowych, propagujących w kierunku ujemnym.

Długość fali Bragga sprzężania pierwszego rodzaju (rdzeń-rdzeń) opisana jest równaniem [127]:

$$\lambda_B = 2n_{eff}^r \frac{\Lambda_B}{\cos\theta}, \quad (2.87)$$

gdzie n_{eff}^r jest efektywnym współczynnikiem załamania rdzenia, Λ_B jest rzeczywistym okresem siatki, θ jest kątem nachylenia płaszczyzny okresu (rys. 2.40).

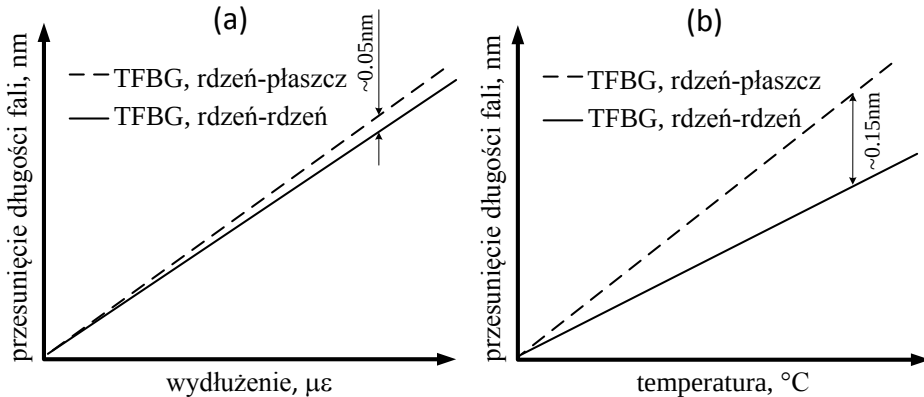
W przypadku sprzężania drugiego rodzaju (rdzeń-płaszcz), rezonansowe długości fali modów płaszczowych, odpowiadające propagującym w przeciwną stronę sprzężeniom pomiędzy modem rdzenia i modami płaszczowymi opisywane są równaniem:

$$\lambda_p^i = (n_{eff}^{p,i} + n_{eff}^r) \frac{\Lambda_B}{\cos \theta}, \quad (2.88)$$

gdzie $n_{eff}^{p,i}$ jest efektywnym współczynnikiem załamania światła i -tego modu płaszczowego, przy czym $i=1, \dots, n$ gdzie n jest całkowitą liczbą modów płaszczowych.

Ze względu na zróżnicowane zmiany obydwu rezonansów na wielkości mierzone, ukośne siatki Bragga są wykorzystywane do jednoczesnego pomiaru dwóch wielkości fizycznych. Opracowywane są metody pomiaru odkształcenia i temperatury przy wykorzystaniu pojedynczej ukośnej siatki Bragga, pracującej jako demodulator siatki Bragga zwykłej – jednorodnej [104, 105, 155], również w połączeniu z filtrami optycznymi, np. Fabry-Perota [190].

Na rysunku 2.42 przedstawione są charakterystyki przetwarzania siatki czujnika opartego na TFBG, wykorzystywanego do równoczesnego pomiaru odkształcenia i temperatury. Charakterystyki wyznacza się w układzie, gdzie jeden koniec TFBG jest unieruchomiony, podczas gdy drugi zamocowany jest do stołu generującego znane odkształcenia przy zadanej temperaturze. Wdkształcenie i temperatura powodują przesunięcie długości fali Bragga dla sprzęgania typu rdzeń-rdzeń oraz rdzeń-płaszcz. Kształt i położenie charakterystyk przetwarzania czujnika przedstawia rysunek 2.42.



Rys. 2.42. Charakterystyki przetwarzania TFBG, wykorzystanej do pomiaru (a) odkształcenia oraz (b) temperatury. Linia ciągłą zaznaczono przesunięcie długości fali dla rezonansu typu rdzeń-rdzeń, linia przerywana oznacza przesunięcie długości fali dla rezonansu rdzeń-płaszcz

Obecnie ukośne siatki Bragga posiadają długości 5-10 mm, kąt pochylenia $1,5^\circ$ i są wytwarzane przy wykorzystaniu ukośnej maski fazowej, na światłowodzie domieszkowanym borem i germanem o długości fal odcięcia 1213 nm. Fotoczułość włókna, na którym zapisywana jest siatka może zostać zwiększona poprzez jego pompowanie wodorem (np. przez 1-2 tygodnie pod ciśnieniem ponad 100 barów w temperaturze pokojowej). Maski fazowej

oświetlona jest wiązką UV o długości fali 244 nm o średniej mocy 40 mW. W przypadku przedstawionego układu równanie macierzowe przetwarzania (2.4) dla czujnika z TFBG można zapisać w postaci:

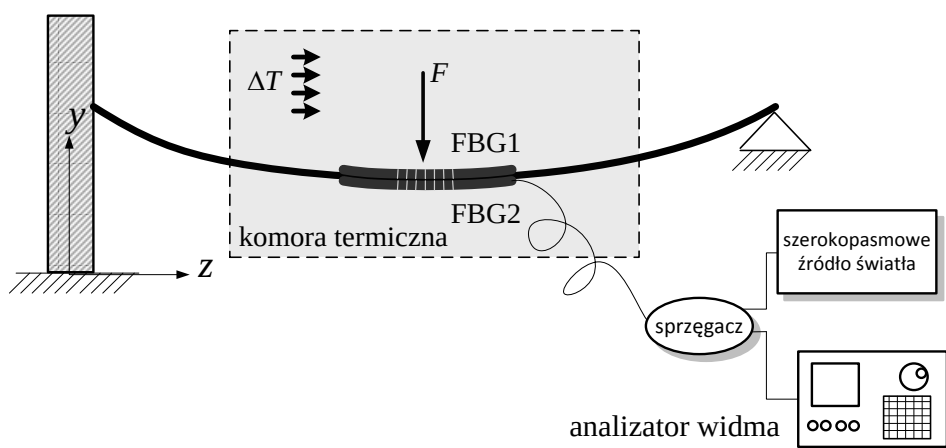
$$\begin{bmatrix} \Delta\lambda_B \\ \Delta\lambda_p^i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_\varepsilon^r & K_T^r \\ K_\varepsilon^{p,i} & K_T^{p,i} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \varepsilon \\ T \end{bmatrix}, \quad (2.89)$$

gdzie $\Delta\lambda_B$ oraz $\Delta\lambda_p^i$ są przesunięciami długości fali, odpowiednio: sprzężenia typu rdzeń-rdzeń oraz sprzężenia modowego typu rdzeń-płaszcz. K_ε^r i K_T^r są współczynnikami czułości przesunięcia długości fali Bragga (odpowiadającego rezonansowi modów rdzeniowych) na odkształcenie i temperaturę, natomiast $K_\varepsilon^{p,i}$ oraz $K_T^{p,i}$ oznaczają odpowiednio czułości na odkształcenie i temperaturę długości fali rezonansu rdzeń-płaszcz i-tego modu. Spotykane w literaturze wartości współczynników czułości wynoszą odpowiednio: $K_\varepsilon^r = 0,82 \text{ pm}/\mu\epsilon$, $K_T^r = 4,22 \text{ pm}/^\circ\text{C}$, $K_\varepsilon^{p,i} = 0,83 \text{ pm}/\mu\epsilon$, oraz $K_T^{p,i} = 6,02 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ [29].

Użycie małych kątów pochylenia TFBG, ułatwiających skuteczniejsze sprzężanie jest korzystne, ponieważ widmo zajmuje znacznie węższy zakres niż w przypadku kątów większych. Umożliwia to zwielokrotnienie czujnika w układach pomiarowych. Główne ograniczenie opisanego podejścia do równoczesnego pomiaru odkształcenia i temperatury polega na tym, że układ musi pracować w trybie transmisji, co eliminuje jedną z głównych zalet czujników FBG – tzw. pracę jednokońcową [87, 150].

3. Równoczesny pomiar siły i temperatury przy pomocy czujników optoelektronicznych

Optoelektroniczne czujniki ze światłowodowymi siatkami Bragga wykorzystywane są również w czujnikach do pomiaru siły. Obecnie rozwijane są metody wykorzystujące siatki Bragga umożliwiające wykrywanie i pomiar sił rozciągających [148], ściskających [85], poprzecznych [139], ścinających [219], zarówno statycznych [220], jak i dynamicznych [71, 159]. Układy wykorzystujące FBG, oprócz możliwości pomiaru siły, wykazują również czułość od zmian temperatury [106], co w obliczu możliwości jej zmian wymaga zastosowania dodatkowego elementu służącego jej kontroli. Przykładem jest układ różnicowy, wykorzystujący dwie siatki Bragga zamontowane w ten sposób, że jedna z nich jest ściskana a druga rozciągana. Odpowiedni sposób zamontowania siatki pozwala na budowę układu służącego do pomiaru zarówno siły jak i odkształcenia. Schemat układu pomiarowego i sposób montowania siatek czujnika przedstawiono na rysunku 3.1.



Rys. 3.1. Schemat układu pomiarowego wykorzystywanego do równoczesnych pomiarów siły poprzecznej i temperatury

Na rysunku 3.1 siatka umieszczona jest poziomo, natomiast w rzeczywistych układach do monitoringu stanu konstrukcji próbka, na której umieszczane są siatki, montowana jest również w innej pozycji niż pozioma, przy czym obydwa jej końce są klejone do badanej struktury [194, 274]. W przypadku, gdy na środkową część wspornika działać będzie siła F w sposób zaznaczony na rysunku 3.1, nastąpi jego ugięcie. Spowoduje to powstanie naprężeń mechanicznych, prowadzących do zmian długości warstw materiału, na który działa siła F . Na górnej stronie wspornika, na której przymocowana jest FBG1, powstają naprężenia ściskające, na dolnej zaś – rozciągające. Powoduje to zmniejszenie długości FBG1 przy jednoczesnym odkształceniu FBG2, co z kolei

wpływa na zmianę długości fali Bragga obydwu siatek. Na zmianę długości fali Bragga wpływa również temperatura. Wpływ odkształcenia i temperatury na przesunięcie długości fali Bragga odpowiednio FBG1 i FBG2 można zapisać przy wykorzystaniu następujących zależności:

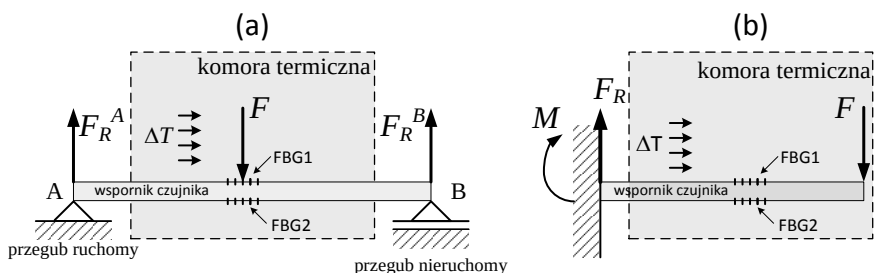
$$\Delta\lambda_{B1} = \lambda_{B1}[(\alpha_\Lambda + \alpha_n)\Delta T - (1 - p_e)\varepsilon_z], \quad (3.1)$$

$$\Delta\lambda_{B2} = \lambda_{B2}[(\alpha_\Lambda + \alpha_n)\Delta T + (1 - p_e)\varepsilon_z], \quad (3.2)$$

gdzie ε_z jest odkształceniem wzdłuż osi z (oś wzdłuż której zapisana jest siatka Bragga), zgodnie z rysunkiem 3.1. Zależności przedstawione w postaci równań (3.1) i (3.2) zostały wykorzystane przy opracowaniu metod pomiaru siły w warunkach zmieniającej się temperatury. Sposoby konstruowania układu czujnika do równoczesnego pomiaru siły i temperatury przedstawiono w kolejnym rozdziale.

3.1. Analiza uwarunkowań mechanicznych dla równoczesnych pomiarów siły i temperatury

W przypadku czujników do jednoczesnego pomiaru siły i temperatury siatki Bragga montuje się najczęściej na wspornikach o przekroju prostokątnym. Przykładowy sposób podparcia wspornika przedstawiono na rysunku 3.2.



Rys. 3.2. Sposoby podparcia wsporników, na których montowane są siatki czujników FBG służące do pomiaru siły i temperatury

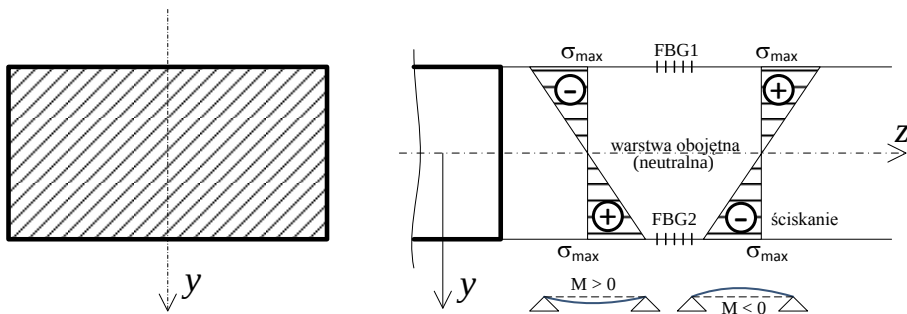
W przypadku czujników FBG do jednoczesnego pomiaru temperatury i siły, siatki Bragga mocuje się najczęściej na wsporniki, w których występuje zgodnie z rysunkiem 3.2 (a) płaski układ sił równoległych (dwa równania statyki) oraz (b) płaski układ sił dowolnych (dwa równania statyki). W celu wyznaczenia odkształcenia ε_z z równań (3.1) i (3.2) najprościej jest zapisać dwa układy równań równowagi. Pierwszy układ równań określa, że suma sił F_i^y działających na układ oraz momentów w dowolnym punkcie M_i jest równa zero:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n F_i^y = 0 \\ \sum_{i=1}^n M_i = 0 \end{cases} \quad (3.3)$$

Drugi zaś układ równań dotyczy momentów w punktach A i B (rys. 3.2), których sumy wartości w stanie równowagi również są równe zero, co możemy zapisać w sposób następujący:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n M_i^A = 0 \\ \sum_{i=1}^n M_i^B = 0 \end{cases} \quad (3.4)$$

W sytuacji, gdy siła powodująca zgięcie wspornika, na którym naklejona jest siatka Bragga, przyłożona jest w dowolnym punkcie wzdłuż osi y , możliwe jest określenie wartości naprężeń normalnych w warstwie, która jest odległa o y od warstwy obojętnej – zgodnie z rysunkiem 3.3. W zginanym układzie istnieje tzw. warstwa obojętna, wykorzystywana w wielu układach czujników obciążenia mechanicznego z siatkami Bragga [144, 276]. Znajomość odległości pomiędzy miejscem zamocowania siatki Bragga a warstwą obojętną, pozwala bowiem na wyznaczenie odkształcenia i naprężenia siatki [33]. Umożliwia to także (np. przy wykorzystaniu metody elementów skończonych) przeprowadzenie analizy wytrzymałości światłowodu z siatką Bragga umieszczonego w materiale kompozytowym poza warstwą obojętną [173].



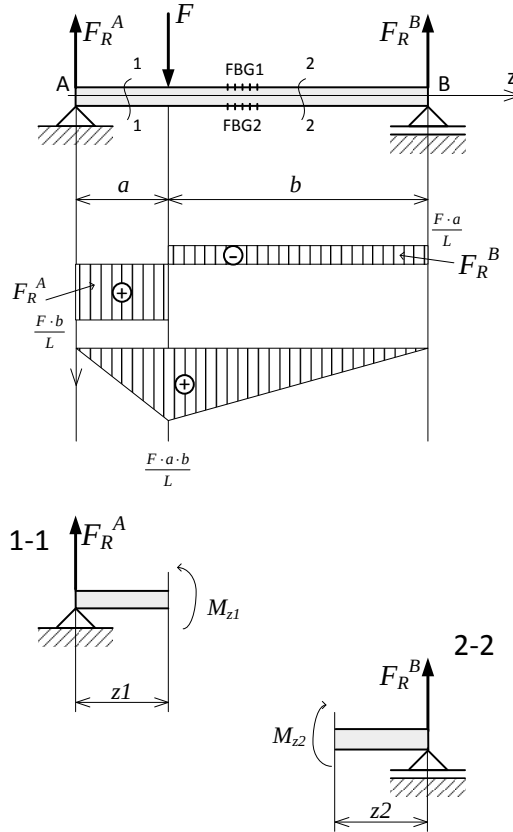
Rys. 3.3. Naprężenia normalne w elemencie czujnika złożonym z dwóch siatek Bragga przymocowanych do wspornika o przekroju prostokątnym

W warstwie obojętnej włókna nie ulegają odkształceniu a naprężenia są równe zero. Naprężenie normalne w warstwach, które oddalone są o odległość

y od warstwy neutralnej wspornika z rysunku 2.3 można opisać następującym równaniem:

$$\sigma_z = \frac{12M}{sg^3} y, \quad (3.5)$$

gdzie s i g są odpowiednio szerokością i grubością wspornika, na którym przymocowana jest siatka (oznaczenia zgodnie z rys. 3.3), M jest momentem zginającym. Wartość momentu zginającego zależy od siły F , wywołującej ugięcie wspornika z FBG. Układ siatki i wspornika stanowią jednocześnie czujnik tej siły. W przypadku, gdy siła F jest przyłożona w dowolnym punkcie prostopadle do osi, wzdłuż której zapisana jest siatka, zgodnie z rysunkiem 3.4, moment zginający jest zależny od miejsca przyłożenia tej siły.



Rys. 3.4. Czujnik FBG do pomiaru siły przyłożonej w dowolnym punkcie wzdłuż osi siatki

Zgodnie z równaniem (3.4) suma momentów w punkcie A jest równa zero, prawdziwe jest zatem następujące równanie:

$$F_R^B \cdot L - F \cdot a = 0 \rightarrow F_R^B = (F \cdot a) / L, \quad (3.6)$$

gdzie zgodnie z rysunkiem 3.4 F jest przyłożoną, mierzoną siłą zewnętrzną, F_R^B jest siłą reakcji w punkcie B, L jest długością wspornika, natomiast a jest odległością mierzoną od miejsca zamocowania wspornika A do miejsca przyłożenia siły F . Równanie (3.4) pozwala również na określenie siły reakcji F_R^A w punkcie B:

$$F_R^A \cdot L - F \cdot b = 0 \rightarrow F_R^A = (F \cdot b) / L, \quad (3.7)$$

gdzie b jest odległością pomiędzy miejscem przyłożenia siły zewnętrznej F , a punktem A podporu wspornika. Moment zginający M_{z1} w dowolnym punkcie $z1$, znajdującym się na odcinku pomiędzy punktem A oraz punktem przyłożenia siły F jest zatem równy iloczynowi siły reakcji w punkcie A oraz odległości punktu $z1$ od punktu podporu A. Uwzględniając powyższe otrzymujemy:

$$M_{z1} = \frac{F \cdot b}{L} \cdot z1. \quad (3.8)$$

Na podstawie równania (3.8), podstawionego do równania (3.5), można określić naprężenie w dowolnej części ($z1$) wzdłuż osi siatki Bragga, umieszczonej w dowolnej warstwie wspornika (wzdłuż osi y), wywołane dowolną siłą zewnętrzną F , umieszczoną w dowolnym miejscu w odległości b od drugiego końca wspornika. Zgodnie z zależnością (3.8) moment zginający w punkcie A ($z1 = 0$) wyniesie $M_{z1=0} = 0$, natomiast w odległości a ($z1 = a$), $M_{z1=a} = (F \cdot a \cdot b) / L$.

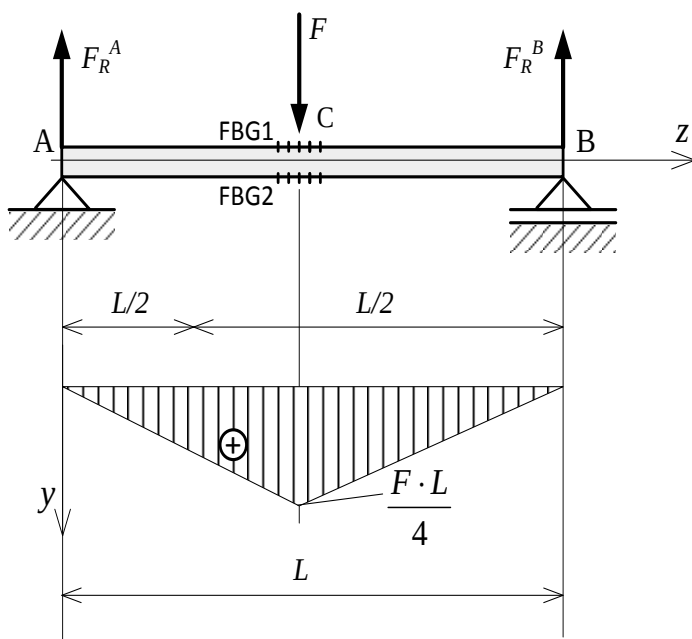
Zgodnie z prawem Hooke'a, odkształcenie względne jest wprost proporcjonalne do wyznaczonego naprężenia:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E}. \quad (3.9)$$

Analogicznie, moment zginający M_{z2} w dowolnym punkcie $z2$, znajdującym się na odcinku pomiędzy punktem B oraz punktem przyłożenia siły F , jest równy iloczynowi siły reakcji w punkcie B oraz odległości punktu $z2$ od punktu podporu B. Moment zginający M_{z2} można więc zapisać następująco:

$$M_{z2} = \frac{F \cdot a}{L} \cdot z2. \quad (3.10)$$

W wielu metodach wykorzystujących siatki Bragga do równoczesnego pomiaru obciążenia mechanicznego i temperatury, siła przykładana jest dokładnie w środku wspornika (punkt C zgodnie z rysunkiem 3.5).

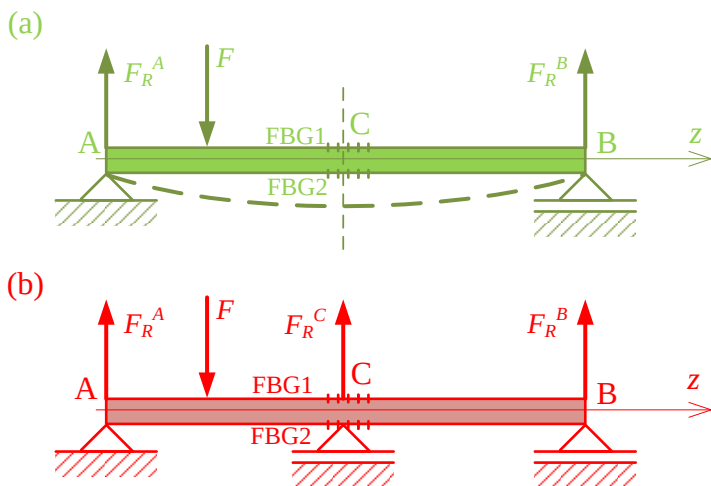


Rys. 3.5. Czujnik wykorzystujący dwie FBG do pomiaru siły przyłożonej w środku wspornika z siatkami zamontowanymi w środkowej części wspornika

Przyłożenie siły zewnętrznej F oraz siatek Bragga w sposób przedstawiony na rysunku 3.5 upraszcza obliczenia, gdyż w tym przypadku moment zginający M_C ma wartość maksymalną w miejscu zamontowania FBG i jest równy:

$$M_C = \frac{F \cdot L}{4}. \quad (3.11)$$

Spośród wielu rozwijanych obecnie układów czujników FBG do pomiaru siły i temperatury wszystkie charakteryzują się tym, że układ mechaniczny transferujący siłę na odkształcenie siatki, którym jest najczęściej wspornik z zamocowaną siatką Bragga, jest statycznie wyznaczalny. Różnicę pomiędzy układem wyznaczalnym i niewyznaczalnym statycznie przedstawia rysunek 3.6.

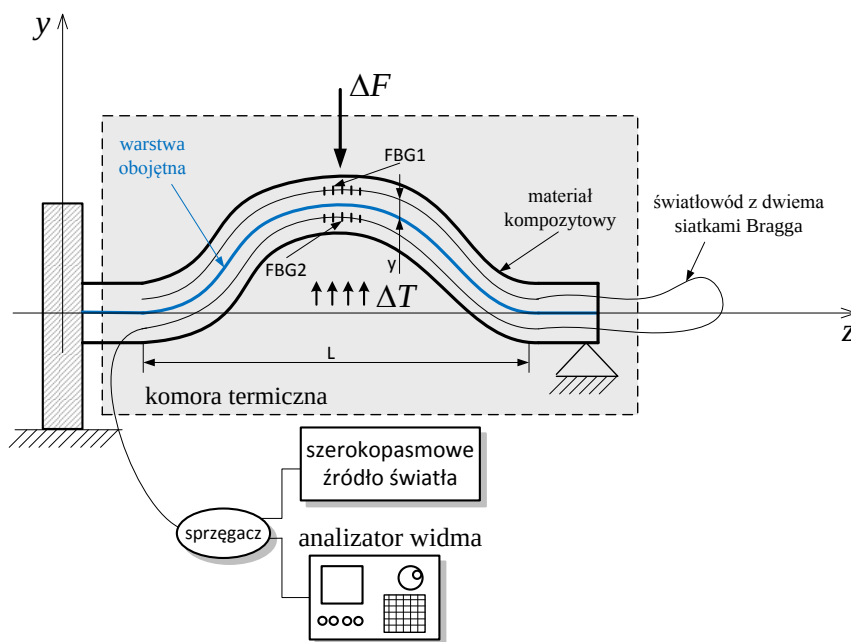


Rys. 3.6. Czujnik FBG do pomiaru siły przyłożonej w dowolnym punkcie wzdłuż osi siatki w układzie (a) statycznie wyznaczalnym, stosowanym w praktyce, (b) statycznie niewyznaczalnym, niestosowanym w praktyce

W przypadku przedstawionego powyżej układu istnieje możliwość teoretycznego wyznaczenia przesunięcia długości fali Bragga siatek. Przy czym jest to możliwe dla dowolnego umieszczenia siatki w osi z i y oraz dowolnego miejsca przyłożenia siły zewnętrznej prostopadłej do osi siatki. Należy w tym celu podstawić równania (3.8) lub (3.10) lub (3.11) do (3.5) oraz uwzględniając (3.9), równanie (3.5) podstawić do (3.1) lub (3.2).

3.2. Układy czujników siły i temperatury ze światłowodowymi siatkami Bragga

W praktycznych rozwiązaniach głowic pomiarowych do pomiaru sił stosuje się siatki Bragga wbudowane w materiały kompozytowe. Kompozyt stanowi w takich przypadkach przetwornik siły i temperatury [39]. Układy takie znajdują zastosowanie w wykonywanych testach stopnia zużycia materiału [153, 229], pomiarach stopnia zniszczenia struktur [223, 263], pomiarach pęknięć poprzecznych materiałów [264], pomiarach wibracji [187] oraz w przypadku pomiarów dynamicznych (w których mierzona siła zmienia się w czasie pomiaru) [70]. Ważnym elementem, mającym wpływ na parametry czujnika jest wówczas czas utwardzania materiału kompozytowego wraz z siatkami [130]. W przypadku montowania siatek Bragga w materiałach kompozytowych, zazwyczaj jedna z siatek ułożona jest powyżej, a druga poniżej warstwy neutralnej [86]. Schemat układu, w którym siatki Bragga są zamocowane w materiale kompozytowym w kształcie łuku przedstawia rysunek 3.7.



Rys. 3.7. Schemat czujnika do jednoczesnego pomiaru siły i temperatury z zaznaczonym miejscem zamocowania FBG

Czujnik składa się z dwóch siatek Bragga wbudowanych w materiał kompozytowy przyjmujący kształt łuku. W wyniku przyłożenia siły bocznej F do czujnika jego ugięcie spowoduje odkształcenie siatki znajdującej się poniżej warstwy neutralnej oraz skrócenie siatki znajdującej się powyżej tej

warstwy. W przypadku rozwiązania przedstawionego na rysunku 3.7 wykorzystuje się fakt, że dwie rezonansowe długości fali siatek przesuwają się niezależnie wraz ze zmianą siły bocznej i jednocześnie ulegają przesunięciu wraz ze zmianą temperatury otoczenia [85]. Wskazane zależności są liniowe.

Montując siatki Bragga w materiałach kompozytowych zakłada się, że rozmiary światłowodu są dużo mniejsze w porównaniu z modułem czujnika, w związku z tym jego wpływ na odkształcenia czujnika jest pomijalny. Zmiana siły bocznej F i związana z nią zmiana odkształcenia $\Delta\varepsilon$ spowoduje zmiany długości fali Bragga, które oznaczono jako $\Delta\lambda_B^\varepsilon$. Jednocześnie zmiana temperatury ΔT otoczenia również przyczyni się do zmiany długości fali Bragga każdej z siatek, co z kolei oznaczono jako $\Delta\lambda_B^T$. Wspomniane zmiany pozostają przy tym w relacji:

$$\Delta\lambda_B^\varepsilon = K_\varepsilon \Delta\varepsilon, \quad (3.12)$$

gdzie K_ε jest czułością przesunięcia długości fali Bragga na odkształcenie, przy czym spełniona jest następująca równość:

$$\Delta\lambda_B^T = K_T \Delta T, \quad (3.13)$$

gdzie K_T jest czułością przesunięcia długości fali Bragga na temperaturę. Całkowita zmiana długości fali Bragga każdej siatki może być zatem wyrażona w postaci:

$$\Delta\lambda_B = K_\varepsilon \Delta\varepsilon + K_T \Delta T. \quad (3.14)$$

W związku z tym, że opisywany układ jest wykorzystywany do równoczesnego pomiaru siły i temperatury, określono zależność długości fali obydwu siatek od przyłożonej siły bocznej. Zgodnie z prawem Hooke'a odkształcenie ε_z wzdłuż osi z zaznaczonej na rysunku 3.7 można opisać zależnością:

$$\varepsilon_z = \frac{\sigma_z}{E}, \quad (3.15)$$

gdzie E jest modułem Younga materiału, z którego wykonany jest kompozyt. Natomiast naprężenia σ_z wzdłuż osi z są zależne od powstałego w wyniku przyłożenia siły F momentu gnącego M , odległości y siatki Bragga od warstwy neutralnej oraz momentu bezwładności I , według następującej zależności:

$$\sigma_z = \frac{M \cdot y}{I}, \quad (3.16)$$

przy czym:

$$I = \frac{sg^3}{12} , \quad (3.17)$$

gdzie s jest szerokością kompozytu, g jest jego grubością, natomiast moment gnący jest równy:

$$M = \frac{F \cdot z}{2} . \quad (3.18)$$

W celu uproszczenia obliczeń oraz z powodu symetrii układu, rozważyć możemy tylko lewą połowę czujnika, stąd z można ograniczyć do zakresu $0 \leq z \leq L/2$. Wobec powyższego czujnik doznaje maksymalnego odkształcenia wzdłuż osi z w środkowej części, gdzie $z = L/2$, które uwzględniając zależności (3.16), (3.17) oraz (3.18) można opisać następującym równaniem:

$$\varepsilon_z = \frac{y \cdot z}{2 \cdot I \cdot E} \cdot F \left(0 \leq z \leq \frac{L}{2} \right). \quad (3.19)$$

Odształcenie w centralnej części czujnika, w miejscu przymocowania siatki Bragga wyrazić można następującą zależnością:

$$\varepsilon_z \left(z = \frac{L}{2} \right) = \frac{L \cdot y}{4 \cdot I \cdot E} \cdot F , \quad (3.20)$$

która po uwzględnieniu równania (3.17) przyjmie postać:

$$\varepsilon_z \left(z = \frac{L}{2} \right) = \frac{3L \cdot y}{s \cdot g^3 \cdot E} \cdot F . \quad (3.21)$$

Iloczyn $K_\varepsilon \Delta \varepsilon$ z równania (3.14) przedstawić można jako:

$$K_\varepsilon \Delta \varepsilon = \frac{3L \cdot y}{s \cdot g^3 \cdot E} \cdot \Delta F , \quad (3.22)$$

gdzie czułość siatki na zmianę siły opisać można następującym równaniem:

$$K_F = \frac{3L \cdot y}{s \cdot g^3 \cdot E} . \quad (3.23)$$

Równanie macierzowe (2.4) czujnika do równoczesnego pomiaru siły i temperatury, w układzie przedstawionym na rysunku 3.7, można wyrazić poniższą zależnością:

$$\begin{bmatrix} \Delta \lambda_{B1} \\ \Delta \lambda_{B2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{T1} & K_{F1} \\ K_{T2} & K_{F2} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta T \\ \Delta F \end{bmatrix} , \quad (3.24)$$

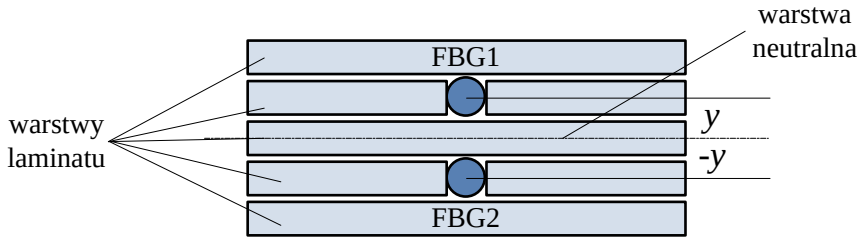
gdzie K_{T1} i K_{F1} są czułościami przesunięcia długości fali Bragga $\Delta\lambda_{B1}$ siatki Bragga oznaczonej jako FBG1 odpowiednio na zmianę temperatury ΔT i siły ΔF , natomiast K_{T2} i K_{F2} są czułościami przesunięcia długości fali Bragga $\Delta\lambda_{B2}$ siatki Bragga oznaczonej jako FBG2 również na zmianę odpowiednio temperatury ΔT i siły ΔF . Współczynnik czułości siatek na przyłożoną siłę, zgodnie z równaniem (3.23), można w prosty sposób kontrolować poprzez zmianę szerokości i grubości kompozytu, w którym montowana jest siatka. Równanie (3.24) pozwala zapisać zmiany długości fali FBG1 i FBG2 w następującej postaci:

$$\Delta\lambda_{B1} = K_{T1}\Delta T + K_{F1}\Delta F, \quad (3.25)$$

oraz

$$\Delta\lambda_{B2} = K_{T2}\Delta T + K_{F2}\Delta F. \quad (3.26)$$

Na rysunku 3.8. przedstawiono sposób umieszczenia dwóch FBG w laminacie.



Rys. 3.8. Widok przekroju laminatu z rysunku 3.8 z zaznaczonymi siatkami Bragga oraz warstwą neutralną

Na podstawie dotychczasowych analiz można wywnioskować, że współczynniki czułości na przyłożoną siłę obydwu siatek w układzie przedstawionym na rysunku 3.8 spełniają równość:

$$K_{F1} = -K_{F2}. \quad (3.27)$$

Współczynniki czułości na temperaturę FBG1 i FBG2 pozostaną w następującej relacji:

$$K_{T1} = K_{T2}, \quad (3.28)$$

w sytuacji, gdy siatki posiadać będą zbliżone wartości długości fali Bragga oraz wykonane będą na tym samym włóknie przy wykorzystaniu tej samej maski fazowej.

Równoczesnego pomiaru zmian temperatury ΔT oraz siły ΔF można w przedstawionym układzie dokonać przy uwzględnieniu równań (3.27) oraz (3.28), poprzez wykonanie operacji dodawania lub odejmowania długości fali Bragga obydwu siatek, zgodnie z zależnościami:

$$\Delta\lambda_{B1} + \Delta\lambda_{B1} = 2K_{T1}\Delta T, \quad (3.29)$$

oraz

$$\Delta\lambda_{B1} - \Delta\lambda_{B1} = 2K_{F1}\Delta F. \quad (3.30)$$

Pozwala to na jednoczesny pomiar temperatury i siły poprzez detekcję długości fali FBG1 i FBG2, zachodzi bowiem równość:

$$\Delta F = \frac{\Delta\lambda_{B1} - \Delta\lambda_{B1}}{2K_{F1}}, \quad (3.31)$$

i jednocześnie spełnione jest równanie:

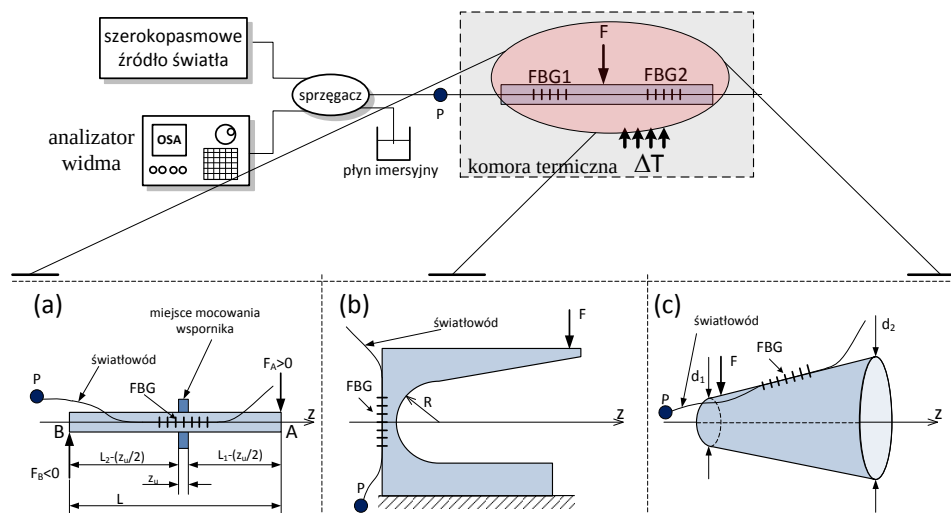
$$\Delta T = \frac{\Delta\lambda_{B1} + \Delta\lambda_{B1}}{2K_{T1}}. \quad (3.32)$$

W przypadku gdy siatki Bragga stanowiące elementy czujnika siły i temperatury umieszczane są w materiałach kompozytowych, bardzo ważny jest proces wygrzewania całej głowicy czujnika zawierającej kompozyt wraz z siatkami. Istotną rolę w poprawieniu czułości na siłę boczną odgrywa rodzaj materiału kompozytowego, a także jego struktura oraz kształt.

Po wykonaniu procesu wygrzewania następuje opakowanie całej struktury w celu utworzenia modułu czujnika. W wyniku badania siły bocznej uwzględnia się zarówno właściwości materiału kompozytowego jak i wprowadzanego do niego światłowodu z siatkami Bragga. Najczęściej wykorzystywanym kompozytem w tego typu czujnikach są odpowiednio wzmocnione materiały plastyczne [9, 74], a w szczególności materiał plastyczny wzmocniony włóknami węglowymi [221] (CFRP – ang.: *Carbon Fiber Reinforced Plastic*). CFRP stosowany jest z powodu jego dużego współczynnika wytrzymałość-waga, odporności na korozję, elastyczności, niskiej podatności na interferencje elektromagnetyczne i łatwości formowania skomplikowanych kształtów. Charakteryzuje się on dobrymi właściwościami mechanicznymi. Jego współczynnik wytrzymałości jest w przybliżeniu osiem razy większy od współczynnika odpowiadającego stali, natomiast współczynnik elastyczności jest 3,6 razy większy od analogicznego współczynnika w przypadku stali [222]. Częstotliwość wibracji własnych jest z kolei w porównaniu ze stałą w przybliżeniu 2 razy większa. Poza tym, materiał ten jest łatwy w kształtowaniu i profilowaniu. Materiały te nazywane są również prepregami [126] ze względu na to, że produkowane są metodą pre-preg, polegającą na wykonywaniu kilku warstw nasączanych żywicami, impregnowanych włókien węglowych i epoksydowych [146]. Stosunek włókien i warstw jest ściśle określony, tak aby otrzymać produkt w postaci kompozytu o określonych właściwościach mechanicznych. Następnie kompozyty poddaje się procesowi

termo-utwardzania, w którym następuje zespolenie włókien oraz z wnętrza struktur wyparte zostaje powietrze.

W czujnikach do pomiaru siły i temperatury siatkę Bragga (lub kilka siatek, np. dwie umieszczone w różnych miejscach [172]) montuje się również na specjalnych wspornikach. Ich kształt i konstrukcja powoduje transfer siły bocznej przyłożonej do wspornika na odkształcenie przymocowanej na nim siatki [50, 211], również w warunkach obciążenia dynamicznego [37]. Ponadto rozwijane są układy, w których do pomiaru siły wykorzystuje się siatki Bragga z chirpem wywołanym celowo podczas pomiaru, poprzez ich niejednorodne odkształcenie [49, 200, 273, 280, 281]. W celu wywołania niejednorodnego odkształcenia siatki Bragga są montowane na specjalnych wspornikach, które umożliwiają transfer przyłożonej siły na odkształcenie zmienne liniowo wzdłuż osi siatki. Obecnie rozwijane są badania dotyczące czujników siły i temperatury oparte na FBG, w których siatki montowane są w taki sposób, aby zapewnić ich niejednorodne odkształcenie wskutek pojawienia się siły poprzecznej [49]. Chirp wywołany transferem mierzonej siły na odkształcenie siatki może być w takim przypadku opisany odpowiednio dobraną funkcją matematyczną. Rysunek 3.9 przedstawia schemat układu do pomiaru siły i temperatury przy wykorzystaniu siatki Bragga, zamocowanej na specjalnym wsporniku umożliwiającym transfer przyłożonej siły na chirp liniowy, kwadratowy oraz opisany specjalnie zaprojektowaną funkcją.

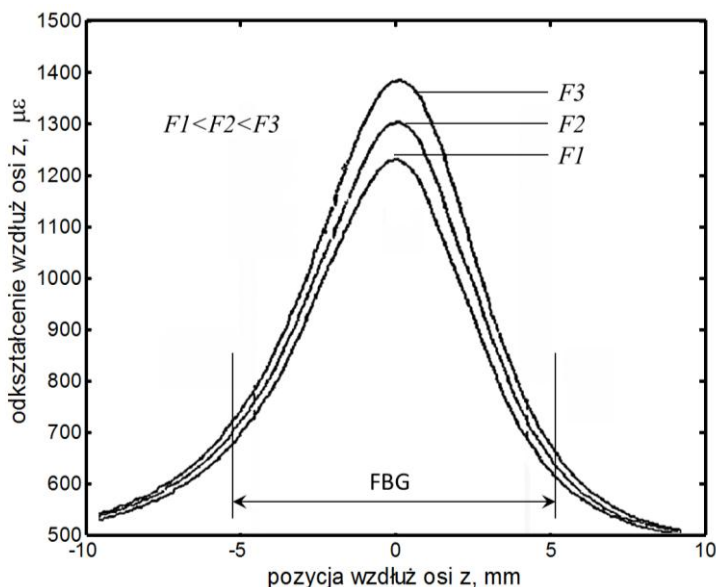


Rys. 3.9. Schemat układu czujnika do jednoczesnego pomiaru odkształcenia i temperatury opartego na pojedynczej FBG przymocowanej do specjalnie zaprojektowanego wspornika, umożliwiającego transfer siły poprzecznej na chirp siatki (a) liniowy, (b) kwadratowy oraz (c) opisany specjalną funkcją

Układ pomiarowy przedstawiony na rysunku 3.9 (a) wykorzystuje odpowiednio zaprojektowany wspornik, na którym zamontowana została FBG.

Prostokątny w tym przypadku wspornik posiada długość L , grubość g oraz szerokość s . Dwa końce A i B są wolne, natomiast środkowa część wspornika jest unieruchomiona. Na powierzchni środkowej części wspornika zamontowana jest siatka Bragga o długości l oraz długości fali Bragga λ_B . Siatkę montuje się w taki sposób, aby długości unieruchomionych części siatki i wspornika były takie same. W tym przypadku zostały one oznaczone jako z_u . W ten sposób wspornik jest dzielony na dwie części, których długości wynoszą odpowiednio $L_1 = z_u / 2$ oraz $L_2 = z_u / 2$. Części celowo oznaczone są różnymi indeksami, ponieważ $L_1 \neq L_2$. Z analizy rysunku 3.9 (a) wynika również, że $L = L_1 + L_2$. W tego typu czujnikach dwie części wiązki poddane są przeciwnym siłom F_A oraz F_B . Taki sposób konstrukcji głowicy czujnika prowadzi do przesunięcia widma w stronę fal dłuższych tej części siatki, która jest rozciągana – prawa strona wspornika według rysunku 3.9 (a). Jednocześnie dochodzi do przesunięcia widma w stronę fal krótszych tej części FBG, która ulega ścisnaniu – znajdującej się na lewej stronie wspornika. Na odcinku, na którym wspornik i siatka są unieruchomione, tzn. $-z_u / 2 < z < z_u / 2$, wartość odkształcenia jest teoretycznie równa zero. Zakładając jednak, że wspornik jest elastyczny oraz, że odcinek z_u jest bardzo mały, rozkład odkształcenia FBG w zakresie z_u nie zmienia się skokowo. Zakładamy zatem, że jest on quasi-jednorodną zmianą gradientu od wartości minimalnej ($-z_u / 2 < z < z_u / 2$) do maksymalnej ($|z| = z_u / 2$). Jednorodna siatka Bragga doznaje zatem chirpu wywołanego odkształceniem wspornika. Im bliżej części nieruchomej, tym większa jest wartość odkształcenia FBG. Wspornik, na którym przymocowana została siatka jest symetryczny, zatem FBG posiada określoną szerokość pasma. Widmo siatki nie składa się jednak z pojedynczego rezonansu Bragga, ale z wielu pików rezonansowych.

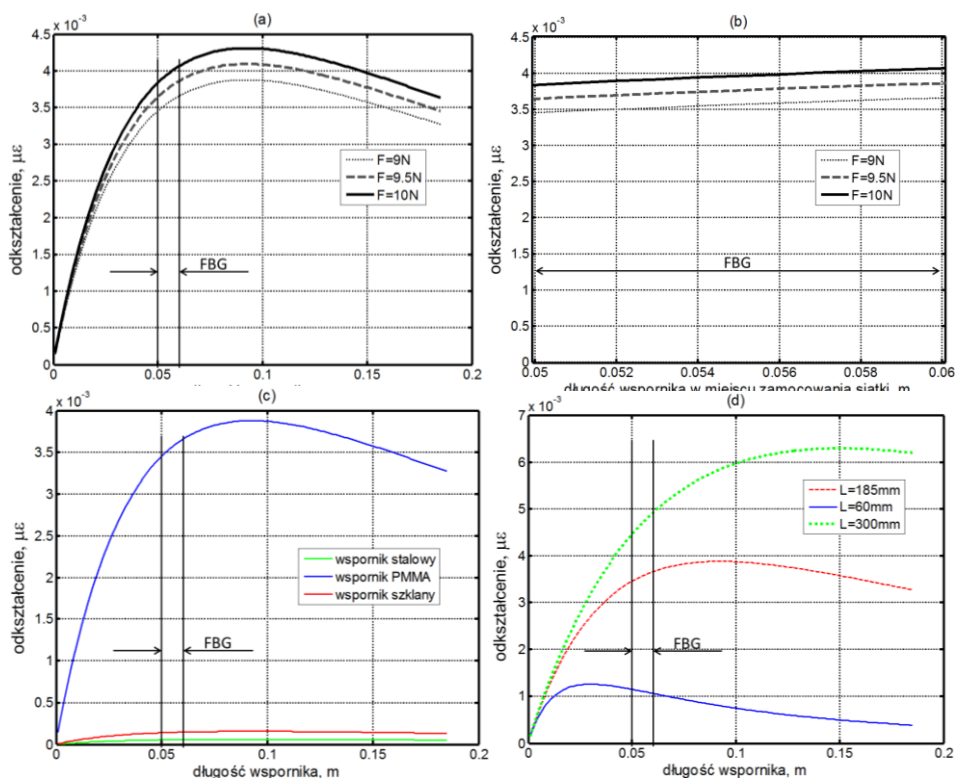
Na rysunku 3.9 (b) przedstawiono konstrukcję wspornika umożliwiającego wywoływanie kwadratowego chirpu [80] w FBG. W tym przypadku wyróżnić możemy trzy części: pomiarową (góra wspornika), profilową o kształcie łuku (lewa strona wspornika) oraz podstawę (dół wspornika). Siła jest przykładana pionowo na końcu części pomiarowej. Podstawa jest unieruchomiona. Na części kształtowej zamontowana jest osiowo siatka Bragga, przy czym centralna część siatki pokrywa się z centralną częścią otworu stanowiącego łuk - rys. 3.9 (b). W wyniku przyłożenia do części pomiarowej pionowej siły siatka dozna niejednorodnego odkształcenia, co spowoduje jej niejednorodne naprężenie. Na rysunku 3.10 przedstawiono kształt odkształcenia osiowego siatki odpowiadający różnym wartościom przyłożonej siły.



Rys. 3.10. Wykres osiowego odkształcenia wzdłuż ramienia pomiarowego czujnika z rys. 3.9 (a) dla różnych wartości przyłożonej siły. Na rysunku zaznaczono miejsce zamontowania siatki Bragga

W miejscu gdzie znajduje się siatka, kształt rozkładu gradientu odkształcenia jest kwadratowy, z wartością maksymalną w środku siatki i symetrycznie zmniejszającą się wartością odkształcenia w miarę oddalania się od centralnej części FBG.

Z kolei na rysunku 3.9 (c) przedstawiono układ do jednoczesnego pomiaru odkształcenia temperatury i siły. Zastosowano w nim wspornik kształtowy, oparty na specjalnie zaprojektowanym stożkowym cylindrze. Rozwiązanie takie wywołuje chirp o kształcie zgodnym z określoną funkcją matematyczną. Jeden z końców jest unieruchomiony, drugi natomiast poddawany jest działaniu mierzonej siły. Średnica zamocowanego końca jest dwukrotnie większa od końca wolnego. Średnice wspornika na dwóch końcach wynoszą d_1 i d_2 , przy czym ($d_2 = 2d_1$). Wspornik posiada długość całkowitą równą L , a jednorodna siatka Bragga zamontowana jest osiowo na górnej powierzchni wspornika – zgodnie z rysunkiem. Do wolnego końca wspornika przykładana jest pionowo siła F . W wyniku przyłożenia siły w sposób przedstawiony na rysunku 3.9 (c), widmo odbiciowe FBG ulega poszerzeniu. Zmiany temperatury powodują przesunięcie długości fali Bragga siatki i nie wpływają na szerokość widma. Na rysunku 3.11 przedstawiono wykres osiowego odkształcenia wzdłuż wspornika z rysunku 3.9 (c).



Rys. 3.11. Wykres osiowego odkształcenia wzdłuż wspornika w kształcie ściętego stożka, na którym zaznaczono miejsce zamontowania siatki Bragga. (a), (b) wykresy wykonane dla różnych wartości przyłożonych sił, (c) wykresy dla różnych materiałów, z których wykonany jest wspornik, (d) wykresy przy zmiennej długości wspornika

Rysunek 3.11 (a) przedstawia wykres odkształcenia osiowego dla różnych wartości przyłożonych sił. Rysunek 3.11 (b) przedstawia wykresy odkształcenia osiowego w miejscu zamontowania siatki Bragga. Zgodnie z nimi przyjąć możemy, że dla podanych wartości sił (9-10 N) zmiana odkształcenia jest liniowa. Z punktu widzenia wartości odkształcenia ważny jest również materiał zastosowany do budowy wspornika z rysunku 3.9 (c). Przedstawione tutaj charakterystyki zostały wykonane dla trzech różnych materiałów, posiadających różne wartości modułu Younga. Rozpatrywane materiały to stal (moduł Younga o wartości ok. 200 GPa – linia zielona na rys. 3.11 (c)), szkło (moduł Younga o wartości ok. 73,5 GPa – linia czerwona na rys. 3.11 (c)) oraz PMMA – polimetakrylan metylu (moduł Younga o wartości ok. 3 GPa – linia niebieska na rys. 3.11 (c)). Charakterystykę odkształcenia siatki można również modulować stosując różne wartości długości wspornika stożkowego o kształcie zgodnym z rysunkiem 3.9 (c). Na rysunku 3.11 (d) przedstawione zostały charakterystyki odkształcenia dla różnych wartości długości wspornika. Należy zwrócić uwagę

na możliwość doboru takiej długości, która spowoduje, że kierunek zmian odkształcenia może być różny. W ten sposób można wywołać wzrastające lub malejące wartości odkształcenia wzdłuż osi z.

Poniżej zaprezentowano sposób wyznaczenia równań macierzowych czujników siły pracujących w układzie przedstawionym na rysunku 3.9. Założono, że dla układu z liniowo wywoływany chirpem siatki jednorodnej przyłożone siły na wolnych końcach są równe co do wartości:

$$F_1 = -F_2 = F. \quad (3.33)$$

Informacja dotycząca zmian temperatury i siły zawarta jest w sumie i różnicy długości fal pomiędzy dwoma częściami siatki: rozciąganą – zaznaczoną po prawej stronie na rys. 3.9 a i ściskaną – zaznaczoną po lewej stronie na rys. 3.9 (a). Oznaczając sumę zmian długości fali Bragga obydwu części siatek jako:

$$\Delta\lambda_{1+2} = \Delta\lambda_1 + \Delta\lambda_2, \quad (3.34)$$

oraz ich różnicę odpowiednio jako:

$$\Delta\lambda_{1-2} = \Delta\lambda_1 - \Delta\lambda_2, \quad (3.35)$$

równanie macierzowe tak skonstruowanego czujnika do jednoczesnego pomiaru temperatury i siły przyjmie następującą postać:

$$\begin{bmatrix} |\Delta\lambda_{1-2}| \\ \Delta\lambda_{1+2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{F1} & K_{T1} \\ K_{F2} & K_{T2} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} F \\ \Delta T \end{bmatrix}, \quad (3.36)$$

gdzie K_{F1} i K_{T1} są współczynnikami czułości bezwzględnej różnicy długości fali $\Delta\lambda_{1-2}$ odpowiednio na siłę i zmianę temperatury, natomiast K_{F2} oraz K_{T2} oznaczają czułość sumy długości fali obydwu części siatki $\Delta\lambda_{1+2}$ odpowiednio na siłę i zmianę temperatury.

Równanie (3.36) opisuje zależność zmiany długości fali od rozważanych wielkości (siły i temperatury). Prawidłowość ta, po uwzględnieniu zasad mechaniki, może być udowodniona zależnościami analitycznymi. Równanie opisujące zależność zmiany długości fali Bragga pierwszej części siatki od przyłożonej siły $\Delta\lambda_1 = f(F_1)$ przyjmie postać:

$$\Delta\lambda_1(F) = \frac{6(1-p_e) \left(L_1 - \frac{z_u}{2} \right)}{E \cdot s \cdot g^2} \cdot F_1 \cdot \lambda_B, \quad (3.37)$$

gdzie p_e jest stałą fotoelastyczną, λ_B jest długością fali użytej siatki Bragga (nominalną, na którą siatka została zaprojektowana i zapisana). Analogiczne równanie $\Delta\lambda_2 = f(F_2)$ można zapisać dla drugiej części siatki w postaci:

$$\Delta\lambda_2(F) = \frac{6(1-p_e)\left(L_2 - \frac{z_u}{2}\right)}{E \cdot s \cdot g^2} \cdot F_2 \cdot \lambda_B. \quad (3.38)$$

Zmiana długości fali obydwu części siatki następuje również wskutek zmian temperatury, co uwzględniając rozszerzalność temperaturową wspornika można wyrazić następującym równaniem:

$$\Delta\lambda_1(\Delta T) = \Delta\lambda_2(\Delta T) = [\alpha_\Lambda + \alpha_n + (1-p_e)(\alpha_w)] \cdot \Delta T \cdot \lambda_B, \quad (3.38a)$$

gdzie α_w jest współczynnikiem rozszerzalności temperaturowej wspornika, na którym montowana jest siatka Bragga, zależnym od materiału, z którego wykonany jest wspornik. Analizując równanie (3.38a) można zauważyć, że różnica zmian długości fal obydwu części siatek będzie zerowa, co przyczynia się do lepszego uwarunkowania macierzy, ze względu na wyzerowanie jednego ze współczynników czułości w macierzy przetwarzania czujnika. W celu udowodnienia powyższego stwierdzenia zapisano równania opisujące zależność przesunięć długości fali od wielkości mierzonych w następującej postaci.

$$\Delta\lambda_1(F, \Delta T) = \left\{ \frac{6(1-p_e)\left(L_1 - \frac{z_u}{2}\right)}{E \cdot s \cdot g^2} \cdot F_1 + [\alpha_\Lambda + \alpha_n + (1-p_e)(\alpha_w - \alpha_\Lambda)] \cdot \Delta T \right\} \cdot \lambda_B, \quad (3.39)$$

$$\Delta\lambda_2(F, \Delta T) = \left\{ \frac{6(1-p_e)\left(L_2 - \frac{z_u}{2}\right)}{E \cdot s \cdot g^2} \cdot F_2 + [\alpha_\Lambda + \alpha_n + (1-p_e)(\alpha_w - \alpha_\Lambda)] \cdot \Delta T \right\} \cdot \lambda_B. \quad (3.40)$$

Zatem równania przetwarzania przyjmą postać:

$$\Delta\lambda_{1+2}(F, \Delta T) = (6(1-p_e)(L_1 + L_2 - z_u)\lambda_B) / Es g^2 \cdot F + 2\lambda_B(\alpha_\Lambda + \alpha_n + (1-p_e)(\alpha_w - \alpha_\Lambda)) \cdot \Delta T, \quad (3.41)$$

$$\Delta\lambda_{1-2}(F, \Delta T) = (6(1-p_e)(|L_1 - L_2| - z_u)\lambda_B) / Es g^2 \cdot F. \quad (3.42)$$

Na podstawie równania (3.36) wyznaczyć można wartości poszczególnych współczynników czułości ponieważ zachodzą następujące równości:

$$\Delta\lambda_{1-2}(F, \Delta T) = K_{F1} \cdot F + K_{T1} \cdot \Delta T, \quad (3.43)$$

oraz

$$\Delta\lambda_{1+2}(F, \Delta T) = K_{F2} \cdot F + K_{T2} \cdot \Delta T. \quad (3.44)$$

Analizując równania (3.43) i (3.44) oraz wyprowadzone równania przetwarzania (3.41) i (3.42) można zauważyć, że jeden ze współczynników czułości (K_{T1}) przyjmuje wartość zero. Równanie macierzowe (3.36) można odwrócić. Zgodnie z równaniem (2.6) i wobec spełnienia równości $K_{T1} = 0$, przyjmie ono postać:

$$\begin{bmatrix} F \\ \Delta T \end{bmatrix} = \frac{1}{D} \begin{bmatrix} K_{T2} & 0 \\ -K_{F2} & K_{F1} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} |\Delta\lambda_{1-2}| \\ \Delta\lambda_{1+2} \end{bmatrix}, \quad (3.45)$$

przy czym w tym przypadku wyznacznik macierzy jest równy:

$$D = K_{F1}K_{T2}, \quad (3.46)$$

oraz zachodzi następująca nierówność:

$$K_{F1} / K_{F2} \neq K_{T1} / K_{T2}. \quad (3.47)$$

Należy zauważyć, że czujnik posiada zdolność do pomiaru przyłożonej siły i jednocześnie zmian temperatury, ponieważ zachodzi nierówność (3.47).

Analogiczna nierówność i dobre uwarunkowanie macierzy przetwarzania są pożądanymi cechami układu czujnika FBG umiejscowionego na wsporniku w kształcie ściętego stożka (rys. 3.9 c). W tym przypadku, aby wykazać analogiczną do (3.47) zależność, zapisano równania mierzonych parametrów siatki, w których zawarta jest informacja o przyłożonej do czujnika sile i temperaturze. W rozważanym przypadku parametrami siatki są długość fali Bragga λ_B oraz szerokość widma odbiciowego siatki, którą zgodnie z notacją z równania (2.46) oznaczono jako $\Delta FWHM$.

Równanie opisujące zależność długości fali Bragga siatki czujnika od przyłożonej siły i zmian temperatury $\lambda_B = f(F, \Delta T)$ przyjmie postać:

$$\lambda_B(F, \Delta T) = \frac{32(1 - p_e) \frac{2n_{eff} \Lambda z}{(1 + z/L)^3}}{E \cdot \pi \cdot d^3} \cdot F + [\alpha_\Lambda + \alpha_n + (1 - p_e)(\alpha_w - \alpha_\Lambda)] 2n_{eff} \Lambda \cdot \Delta T, \quad (3.48)$$

gdzie n_{eff} jest efektywnym współczynnikiem załamania światła włókna, na którym zapisana jest siatka Bragga, Λ jest jej okresem.

Analogiczne równanie $\Delta FWHM = f(F, \Delta T)$ można zapisać w następujący sposób:

$$\Delta FWHM(F, \Delta T) = \frac{64n_{eff} \Lambda(1-p_e)}{E \cdot \pi \cdot d^3} \cdot \left[\frac{z_2}{(1+z_2/L)^3} - \frac{z_1}{(1+z_1/L)^3} \right] \cdot F. \quad (3.49)$$

W tym przypadku równanie 3.36 przyjmie postać:

$$\begin{bmatrix} \Delta FWHM \\ \lambda_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{F1} & K_{T1} \\ K_{F2} & K_{T2} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} F \\ \Delta T \end{bmatrix}. \quad (3.50)$$

Na podstawie równania (3.50) można wyznaczyć wartości poszczególnych współczynników czułości, ponieważ zachodzą równości:

$$\Delta FWHM(F, \Delta T) = K_{F1} \cdot F + K_{T1} \cdot \Delta T, \quad (3.51)$$

oraz

$$\lambda_B(F, \Delta T) = K_{F2} \cdot F + K_{T2} \cdot \Delta T. \quad (3.52)$$

Ponownie, analizując równania (3.51) i (3.52) oraz równania przetwarzania (3.48) i (3.49) można zauważyć, że jeden ze współczynników czułości (K_{T1}) przyjmuje wartość zerową. Równanie macierzowe (3.50) można odwrócić. W tej sytuacji, zgodnie z równaniem (2.6) i wobec spełnienia równości $K_{T1} = 0$, przyjmie ono postać:

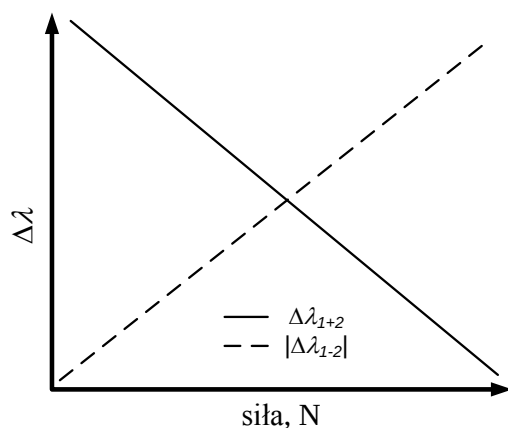
$$\begin{bmatrix} F \\ \Delta T \end{bmatrix} = \frac{1}{D} \begin{bmatrix} K_{T2} & 0 \\ -K_{F2} & K_{F1} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta FWHM \\ \lambda_B \end{bmatrix}, \quad (3.53)$$

gdzie:

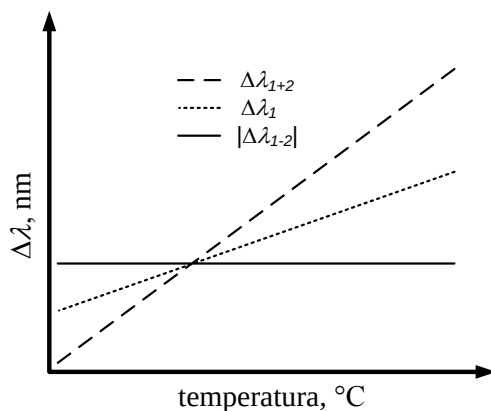
$$D = K_{F1}K_{T2}, \quad (3.54)$$

przy czym spełnione jest również równanie (3.47). Dodatkowo, analizując równanie (3.49) zauważa się, że szerokość charakterystyki widmowej zależy w sposób liniowy od przyłożonej siły i jest jednocześnie niezależna od zmian temperatury.

Przykładowe charakterystyki przetwarzania dla pomiarów siły i temperatury czujnikiem ze światłowodową siatką Bragga, w której liniowy chirp jest wywołany poprzez jej umieszczenie na specjalnym wsporniku, przedstawiono na rysunkach 3.12 i 3.13.

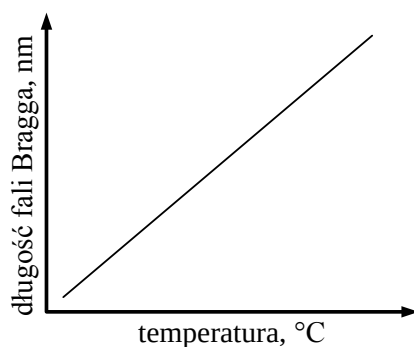


Rys. 3.12. Charakterystyki przetwarzania siły czujnika ze światłowodową siatką Bragga z wywołanym wskutek przyłożonej siły liniowym chirpem, przy zmiennej wartości siły i stałej temperaturze

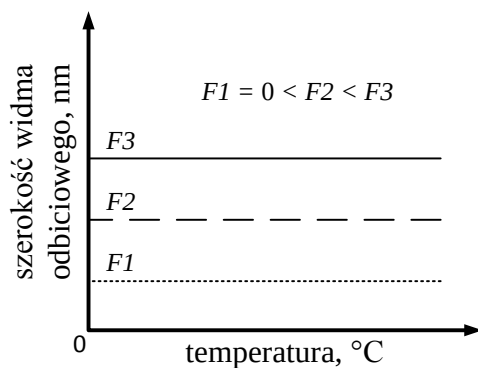


Rys. 3.13. Charakterystyki przetwarzania temperatury czujnika ze światłowodową siatką Bragga z wywołanym wskutek przyłożonej siły liniowym chirpem. Występuje zmiana temperatury oraz zerowa wartość obciążenia (brak przyłożonej siły)

Rysunek 3.12 przedstawia przykładowe charakterystyki różnicy i sumy zmian długości fal Bragga czujnika z liniowym chirpem przy stałej temperaturze w warunkach zmieniającej się siły. Analogiczne wyniki dla pomiarów długości fali i szerokości pasma w funkcji temperatury dla układu wykorzystującego siatkę Bragga z kwadratową funkcją chirpu przedstawiono na rysunkach 3.14 i 3.15.



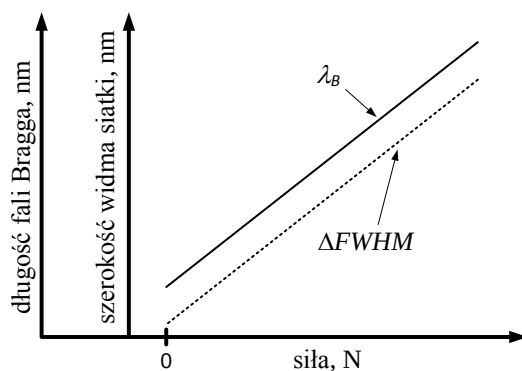
Rys. 3.14. Zależność długości fali Bragga siatki czujnika do pomiaru siły i temperatury wykorzystującego wspornik wywołujący kwadratową funkcję chirpu siatki.



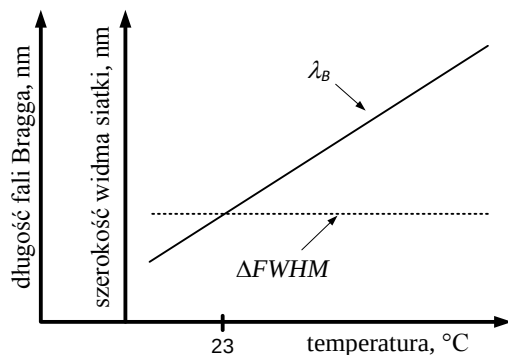
Rys. 3.15. Zależność szerokości charakterystyki widmowej odbiciowej siatki czujnika do pomiaru siły i temperatury wykorzystującego wspornik wywołujący kwadratową funkcję chirpu siatki.

Charakterystyki przetwarzania przedstawione na rysunku 3.15 dotyczą układu przedstawionego na rysunku 3.9 (b). Można zauważyć, że szerokość widma siatki czujnika jest niezależna od temperatury a jej długość fali Bragga zależy od temperatury w sposób liniowy (rys. 3.13).

Analogiczne wyniki pomiaru długości fali Bragga oraz szerokości widma siatki czujnika siły i temperatury, ale z inną niż liniowa i kwadratowa funkcją chirpu siatki, można również znaleźć w innych pracach [50]. Rysunki 3.16 i 3.17 przedstawiają zmiany długości fali Bragga oraz szerokości widma siatki odpowiednio w funkcji przyłożonej siły i temperatury.



Rys. 3.16. Wykresy zmian długości fali Bragga oraz szerokości widma siatki w funkcji przyłożonej siły przy stałej temperaturze dla siatki montowanej na wsporniku, którego kształt przedstawiono na rysunku 3.9 (c)



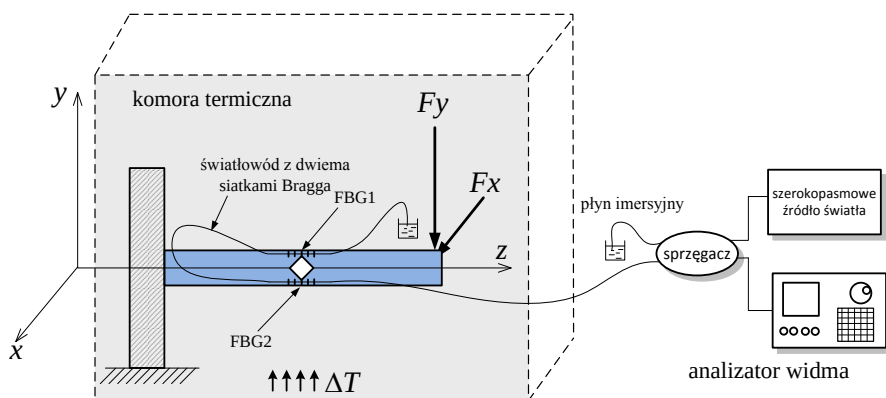
Rys. 3.17. Wykresy zmian długości fali Bragga oraz szerokości widma siatki w funkcji temperatury przy stałej sile dla siatki montowana na wsporniku, którego kształt przedstawiony jest na rysunku 3.9 (c)

Jak wynika z rys. 3.17, zależność szerokości widma siatki od temperatury jest niewielka w porównaniu z różnicą długości fali Bragga spowodowaną zmianami temperatury. Na podstawie nachylenia charakterystyk z rysunków 3.12-3.17 można wyznaczyć wartości wszystkich współczynników czułości parametrów charakterystycznych siatek, (np. długości fali Bragga, szerokości pasma siatki) na siłę i temperaturę. Następnie wykorzystując równanie 2.6 można wyznaczyć omawiane wielkości z pomiaru pośredniego parametrów siatki Bragga.

3.3. Jednoczesny pomiar składowej siły zginającej i temperatury czujnikami z siatkami jednorodnymi

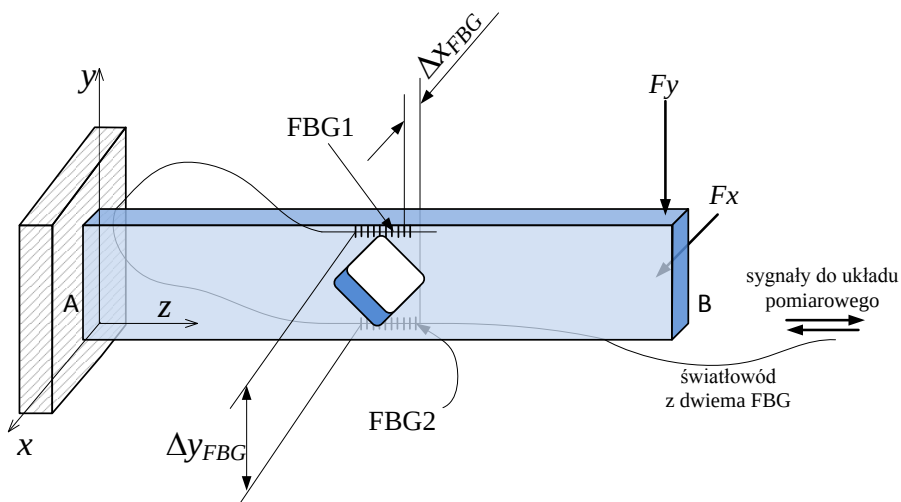
Zbudowanie układu pomiarowego miało na celu pomiar siły i temperatury. W tym celu zaprojektowane zostało stanowisko z komorą termiczną oraz wykorzystywany w dalszych pomiarach wspornik, na którym zamontowano siatkę.

Wykonanie jednoczesnych pomiarów siły oraz temperatury stało się możliwe poprzez użycie układu czujnika. Zastosowana została metoda pomiaru pośredniego, wykorzystującego informacje pochodzące z widma jednorodnej siatki Bragga, umieszczonej na wsporniku. Schemat układu pomiarowego do pomiarów przedmiotowych wielkości mierzonych (składowych siły, działających w dwóch kierunkach, prostopadłych do osi siatki) przedstawiono na rysunku 3.18.



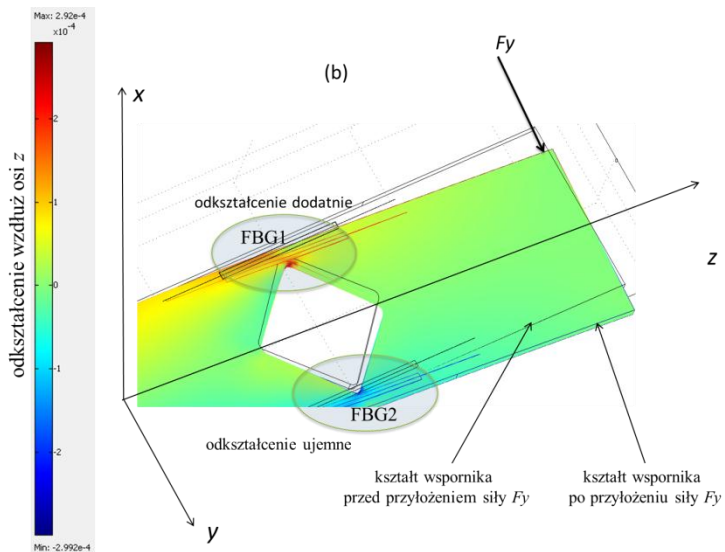
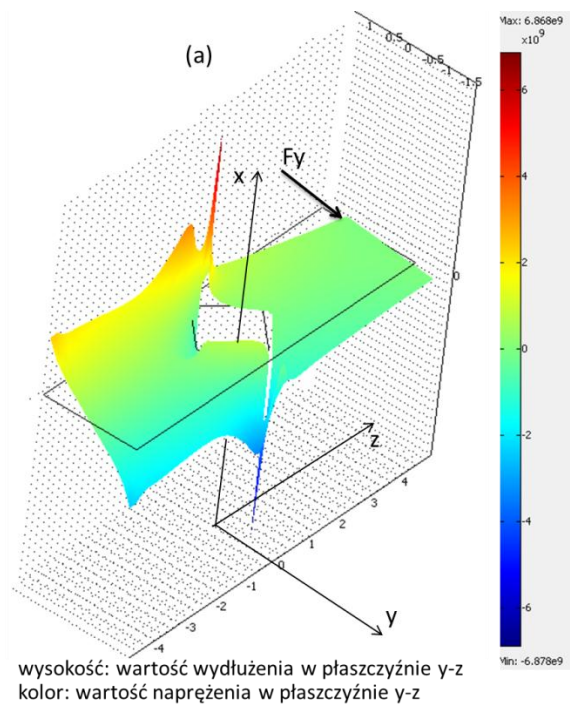
Rys. 3.18. Schemat blokowy układu pomiarowego wykorzystywanego do równoczesnego pomiaru temperatury i siły działającej w dwóch osiach x i y

Światło z szerokopasmowego źródła światła zostało skierowane poprzez sprzęgacz światłowodowy 50:50 do światłowodu jednomodowego z zapisanymi dwiema jednorodnymi siatkami Bragga. Siatki były zapisane przy użyciu tej samej maski fazowej na światłowodzie pompowanym wodorem i umieszczone zostały po dwóch stronach: FBG1 - na górze oraz z przodu wspornika, zaś FBG2 - na dole oraz z tyłu wspornika – zgodnie z rysunkiem 3.19). Elementy FBG przyklejono do metalowego wspornika-próbki, w miejscu wyciętego techniką laserową otworu. Sposób umieszczenia siatek oraz kształt wspornika przedstawiono na rysunku 3.19.

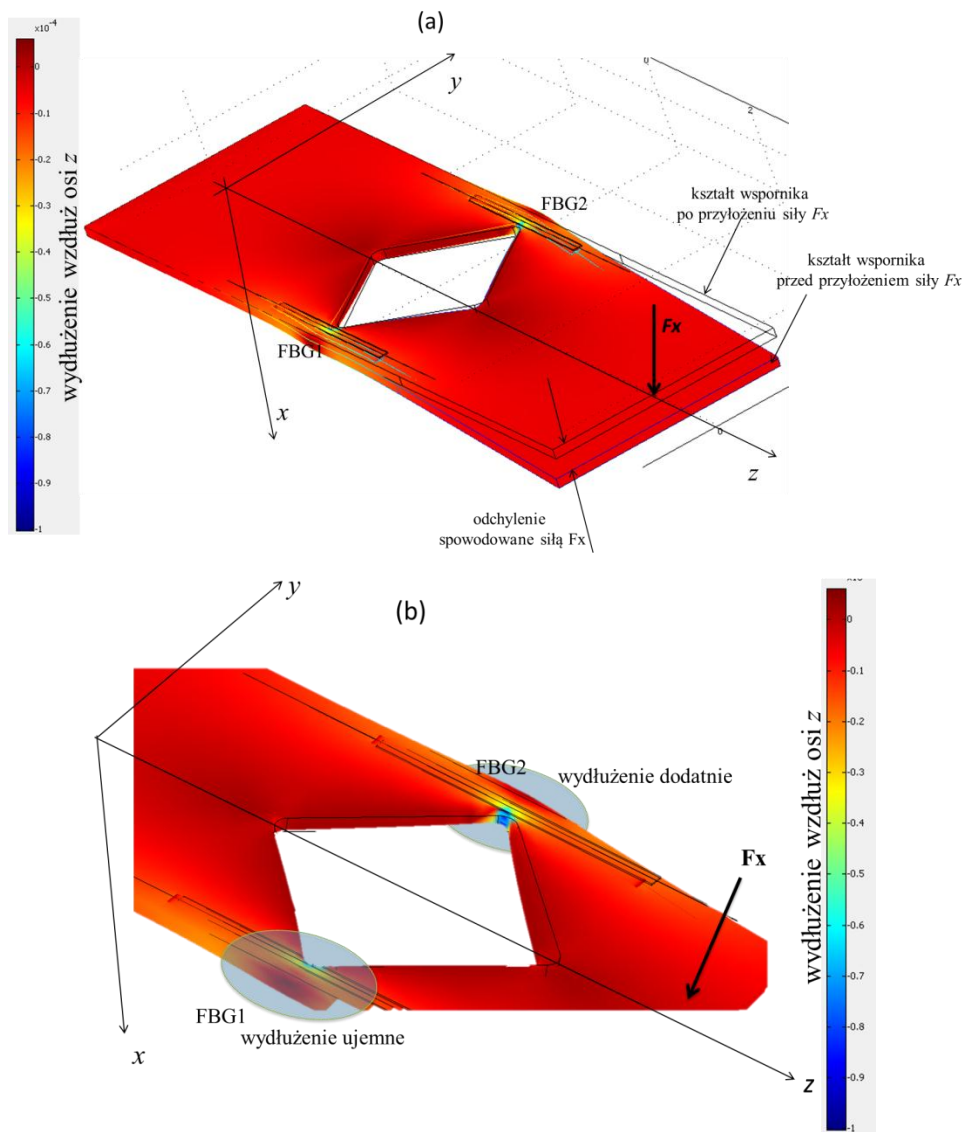


Rys. 3.19. Sposób umieszczenia siatek oraz kształt wspornika czujnika do równoczesnego pomiaru siły i temperatury

Jeden z końców (oznaczony na rysunku powyżej jako A) wspornika był unieruchomiony, drugi zaś (oznaczony jako B) poddawany był siłom, działającym w osi x i y zgodnie z rysunkiem 3.19. Siły przyłożone zostały w taki sposób, aby ramiona, na których działają (odległości mierzone wzdłuż od nieruchomego końca A), były równe. Przyłożenie sił F_y i F_x , działających odpowiednio w osiach y i x , powodowało powstanie odkształcenia FBG1 i FBG2, przy czym znak odkształcenia w badanym układzie był różny dla FBG1 i FBG2. Pojawienie się siły F_y , o kierunku i zwrocie jak na rysunku 3.19, powoduje rozciąganie FBG1 i jednocześnie ściskanie FBG2. Również przyłożenie siły F_x w sposób przedstawiony na rysunku 3.19, powoduje pojawienie się naprężeń ściskających FBG1 i jednocześnie rozciągających FBG2. Rysunki 3.20 i 3.21 przedstawiają wyniki obliczeń wartości odkształcenia przy wykorzystaniu metody elementów skończonych. Na rysunku 3.20 przedstawiono odkształcenie wspornika wskutek przyłożenia siły działającej w osi y . Rysunek 3.21 zawiera wyniki naprężeń wspornika spowodowane siłą działającą w osi x .

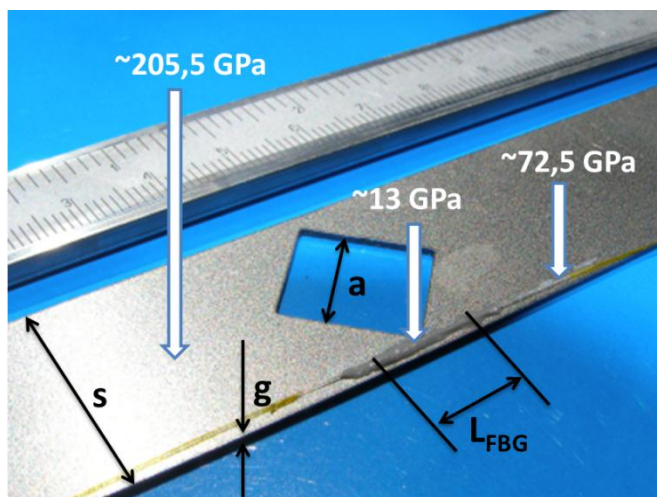


Rys. 3.20. Wyniki obliczeń odkształcenia osiowego wspornika czujnika FBG wywołanego działaniem siły w osi y. (a) odkształcenie i naprężenie w płaszczyźnie x-y, (b) zaznaczone obszary z dodatnim i ujemnym odkształceniem osiowym siatek Bragga



Rys. 3.21. Wyniki obliczeń odkształcenia osiowego wspornika czujnika FBG wywołanego działaniem siły w osi x . (a) zmiana kształtu wspornika, (b) zaznaczone obszary z dodatnim i ujemnym odkształceniem osiowym siatek Bragga

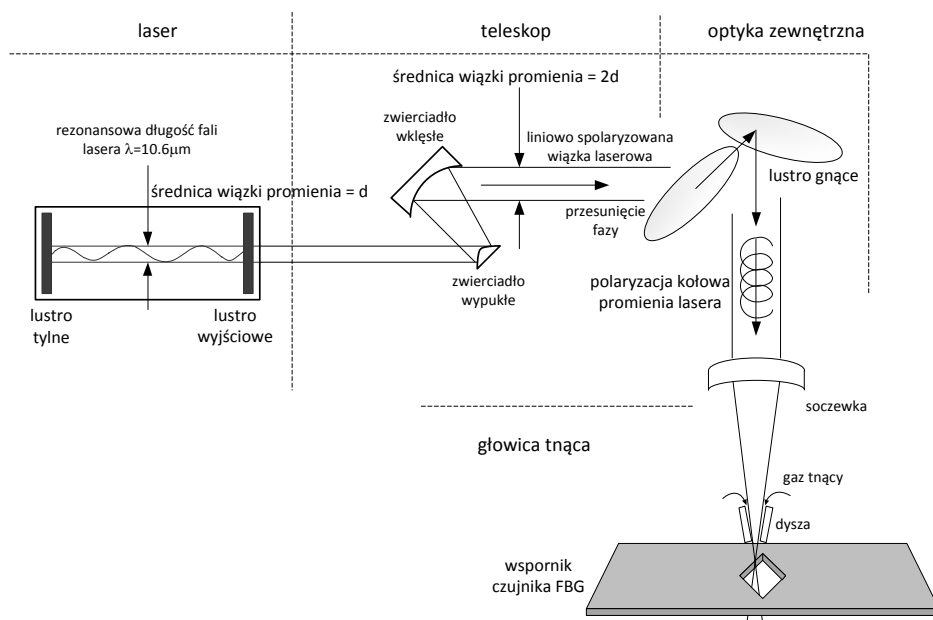
Na rysunku 3.22 przedstawiono zdjęcie czujnika z dwiema siatkami Bragga umieszczonymi na wsporniku z zaznaczeniem wymiarów charakterystycznych.



Rys. 3.22. Zdjęcie czujnika (wspornik z siatką przyklejoną klejem Sikadur-30). Markery czarne – oznaczenia wymiarów charakterystycznych, Markery białe – wartości modułów Younga wspornika metalowego, kleju i światłowodu z FBG.

Wartości wielkości zaznaczonych na rysunku 3.22 były następujące: $s = 25\text{mm}$, $a = 15\text{mm}$, $g = 1\text{mm}$, $L_{\text{FBG}} = 10\text{mm}$. Na rysunku 3.22 zaznaczono również wartości modułów Younga poszczególnych części układu czujnika.

Wymagania względem stalowych wsporników w postaci ich znormalizowanych wymiarów oraz stosunkowo duża dokładność kształtu otworów wycięć i ich położenia wymagały ich wykonania techniką laserową. Do tego celu wykorzystany był laser CO_2 (TRUMPF TC L 4030) klasy 4, zgodny z normą EN 60825-1. Sposób wytworzenia wspornika przedstawiono na schematycznym rysunku 3.23.



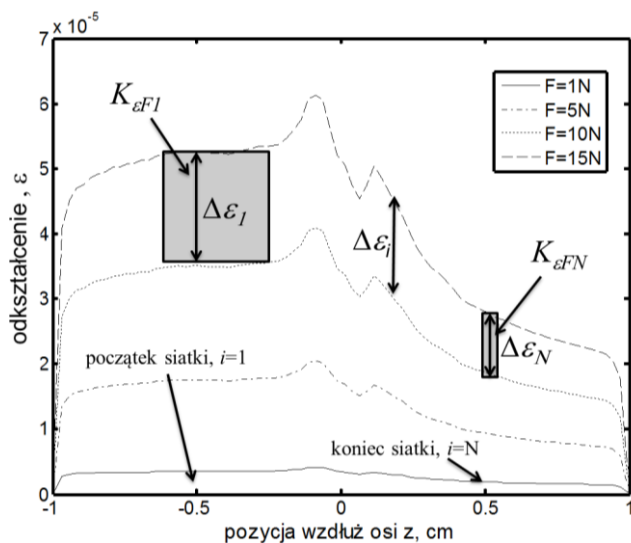
Rys. 3.23. Sposób wykonania wspornika czujnika FBG

Do wytworzenia wspornika zastosowano laser rezonatorowy, który wytwarza promień charakteryzujący się wyjątkowo małym kątem dywergencji. Rozkład energii promienia odpowiada krzywej o kształcie dzwonu. Zastosowano teleskop o kształcie poszerzającym się wraz z odległością promienia od lasera. W momencie opuszczania teleskopu, promień posiada prawie dwukrotnie większą średnicę niż w fazie początkowej. Wykorzystana optyka zewnętrzna składała się z serii przewodnic światła w postaci luster prowadzących promień wytwarzany w rezonatorze do soczewki skupiającej. Gęstość mocy użytego lasera osiągała wartość rzędu 10^7 W/cm^2 w punkcie skupienia. Taka wartość mocy i kształt promienia pozwoliły na wytworzenie wspornika o zadanym kształcie, posiadającego jednocześnie możliwie najmniejsze wartości nierówności – w tym przypadku wynoszące $6 \mu\text{m}$.

W większości zastosowań, w szczególności gdy siatki Bragga montowane są w materiałach kompozytowych wykonanych z tworzyw sztucznych lub umieszczane na elastycznych powierzchniach, wykorzystuje się kleje epoksydowe [42, 134, 138]. Posiadają one moduł Younga rzędu 2-4 GPa i ze względu na swoją elastyczność umożliwiają pracę siatki w szerokim zakresie odkształceń. Takie rozwiązanie jest rozwijane w czujnikach opartych na światłowodowych siatkach Bragga przeznaczonych np. do pomiaru odkształcenia [88, 102, 265], również w warunkach dynamicznych [176]. W takiej sytuacji wymagane jest, aby czujnik nie wpływał w sposób znaczący na wartość odkształcenia (np. ugięcia ramienia wagi), zatem zarówno kleje jak

i materiał, na którym montowane są siatki powinny być podatne na odkształcenia, posiadając możliwie małe wartości modułu Younga.

Zaproponowany układ czujnika służy do pomiaru siły, zatem celowe jest zastosowanie materiałów twardych, posiadających dużą wartość modułu sprężystości tak, aby możliwy był pomiar znacznych obciążeń mechanicznych. Powyższe założenie wymagało użycia wspornika wykonanego ze stali, której moduł Younga wynosił 205 GPa. Użycie w takim układzie kleju o module Younga rzędu 2 GPa spowodowałoby znaczne zmniejszenie współczynnika przeniesienia naprężenia do siatki [133, 228]. Na potrzeby opracowania niniejszej metody pomiarowej dokonano wstępnej oceny wartości współczynnika przeniesienia naprężenia w zależności od modułu Younga kleju. Określono, że klej o współczynniku Younga powyżej 10 GPa pozwala na zachowanie charakteru naprężenia przenoszzonego ze wspornika do siatki Bragga. W celu weryfikacji eksperymentalnej możliwości zastosowania zaproponowanej metody jednoczesnego pomiaru temperatury i siły wykorzystano klej Sikadur-30, posiadający moduł Younga o wartości 13 GPa. Wyznaczenie wartości odkształcenia osiowego w siatkach było możliwe przy wykorzystaniu metody elementów skończonych. Wartość naprężenia w światłowodzie dla różnych sił, działających wzdłuż osi y przedstawiono na rysunku 3.24.



Rys. 3.24. Charakterystyki odkształceń osiowych światłowodu umieszczonego w pozycji FBG1 wyznaczone metodą elementów skończonych z uwzględnieniem modułu Younga wspornika, kleju oraz włókna światłowodowego. Pola szare oznaczają zakresy stałej czułości na początku oraz na końcu siatki

Na podstawie uzyskanych wyników obliczeń, zaprezentowanych na rysunku 3.24 zdefiniowano i wyznaczono współczynnik czułości odkształcenia osiowego

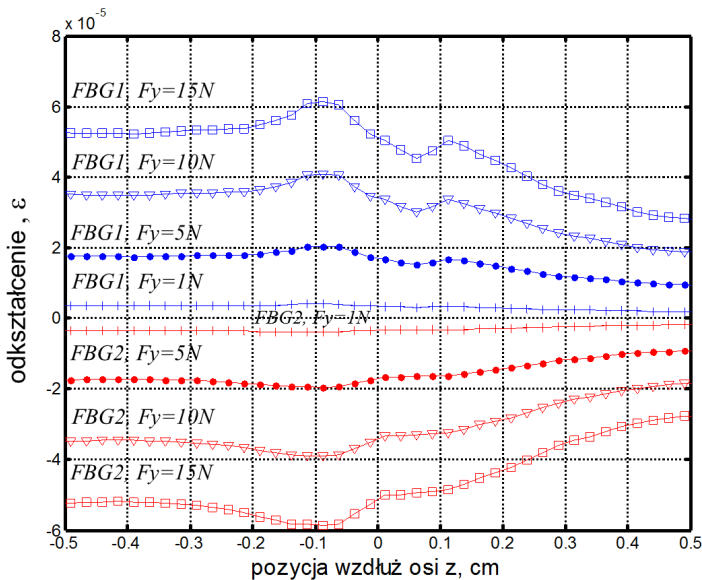
światłowodu $K_{\varepsilon Fi}$ na siłę poprzeczną, działającą w osi 0-y, przyłożoną do wspornika:

$$K_{\varepsilon Fi}(z) = \frac{\Delta\varepsilon_i(z)}{\Delta F}, \quad (3.55)$$

gdzie i jest indeksem oznaczającym pozycję wzdłuż osi światłowodu, przy czym $i = 1, \dots, N$, z kolei 1 oznacza początek siatki natomiast N jej koniec. $\Delta\varepsilon_i(z)$ oznacza zmianę wartości odkształcenia osiowego, spowodowaną zmianą siły ΔF dla danej pozycji wzdłuż długości siatki. Czułość odkształcenia osiowego jest zależna od pozycji wzdłuż osi z (osi światłowodu z siatką Bragga). Wartość czułości zmiany odkształcenia osiowego na siłę poprzeczną, zmieniającą się w osi 0-y w zakresie od 10 N do 15 N, na początku siatki wynosi $K_{\varepsilon F1} = 36 \mu\varepsilon/N$, zaś na jej końcu $K_{\varepsilon FN} = 14 \mu\varepsilon/N$, zatem:

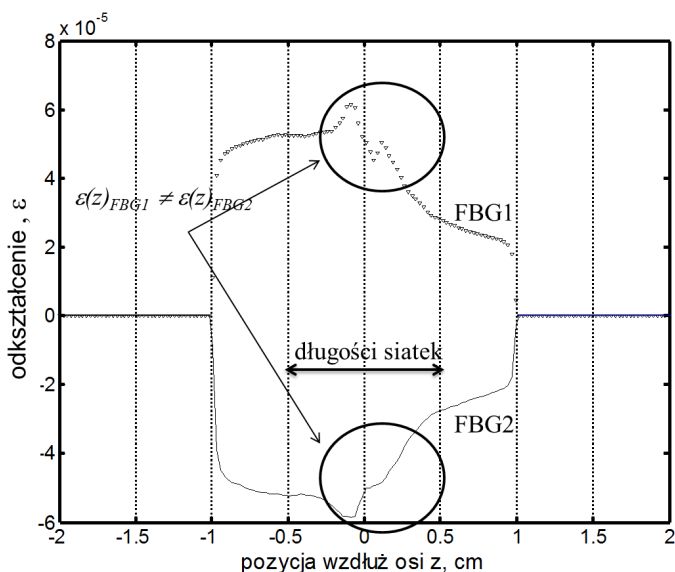
$$K_{\varepsilon F1} \neq K_{\varepsilon FN}, \quad (3.56)$$

co oznacza, że siatka dozna chirpu, wynikającego z nierównomiernego jej odkształcenia, spowodowanego stałą siłą, działającą w osi 0-y. Na rysunku 3.24 zaznaczono również zakresy stałej czułości, na początku i końcu siatki. Na rysunku 3.25 przedstawiono wyznaczony przy użyciu metody elementów skończonych, kształt charakterystyki odkształcenia osiowego światłowodu w miejscach, gdzie umieszczone były siatki.



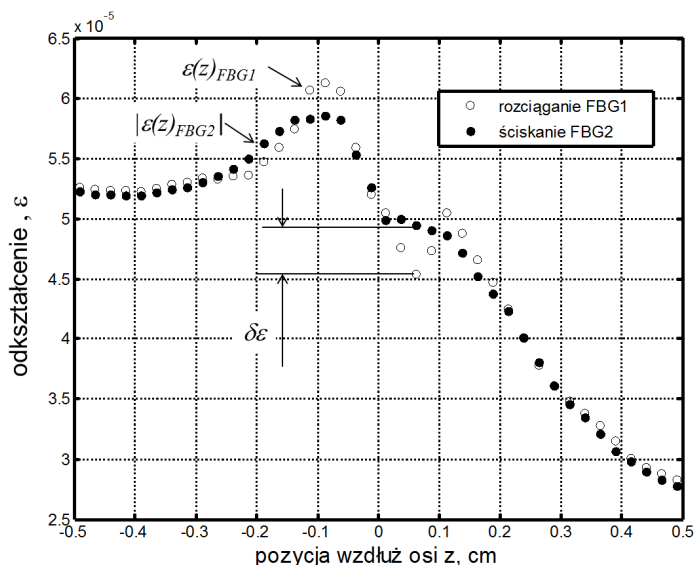
Rys. 3.25. Wartości odkształcenia siatki czujnika FBG1 (charakterystyki wykonane liniami niebieskimi) oraz FBG2 (charakterystyki wykonane liniami czerwonymi) dla różnych wartości siły bocznej, działającej w osi 0-y

Zgodnie z rysunkiem i założeniami stosowanej metody równoczesnego pomiaru siły bocznej i temperatury, jedna z siatek (w tym przypadku FBG1) ulega rozciąganiu - co widać na rysunku 3.25, prezentującym wartości odkształcenia dodatnie. Druga siatka czujnika (FBG2) ulega natomiast ściskaniu, co jest widoczne na rysunku 3.25, na którym odkształcenie FBG2 jest ujemne. Umieszczenie siatek w miejscu przewężeń wspornika i przyłożenie sił, powoduje powstanie chirpu w siatkach wskutek ich nierównomiernego odkształcenia. Powstanie chirpu powoduje poszerzenie charakterystyk transmisyjnych widmowych obydwu siatek. Wartości zmian okresu siatki mają różny znak dla obydwu rozpatrywanych siatek czujnika FBG1 i FBG2 ze względu na fakt, że jedna z nich doznaje nierównomiernego, dodatniego odkształcenia, natomiast druga siatka doznaje niejednorodnego odkształcenia, ale jest to odkształcenie ujemne. Rysunek 3.26 zawiera charakterystyki odkształcenia siatek dla siły w osi 0-y równej 15 N. Maksymalna wartość siły działającej w osi 0-y wynosiła 150 N. Ze względu na podobny kształt gradientu odkształcenia osiowego, charakterystyki nie zostały umieszczone w pracy.



Rys. 3.26. Charakterystyki odkształcenia siatek dla siły działającej w osi 0-y o wartości 15N

Po zaznaczeniu na rysunku 3.26 długości FBG1 i FBG2 widać, że charakter zmian odkształcenia jest podobny dla obydwu siatek. Istnieją natomiast różnice w wartości bezwzględnej odkształcenia siatek – szczególnie w obszarze (zaznaczonym na rysunku powyżej), gdzie rozkład odkształcenia $\varepsilon(z)_{FBG1}$ dla FBG1 nie jest równy rozkładowi odkształcenia $\varepsilon(z)_{FBG2}$ dla FBG2, co dokładniej przedstawiono na rysunku 3.27.

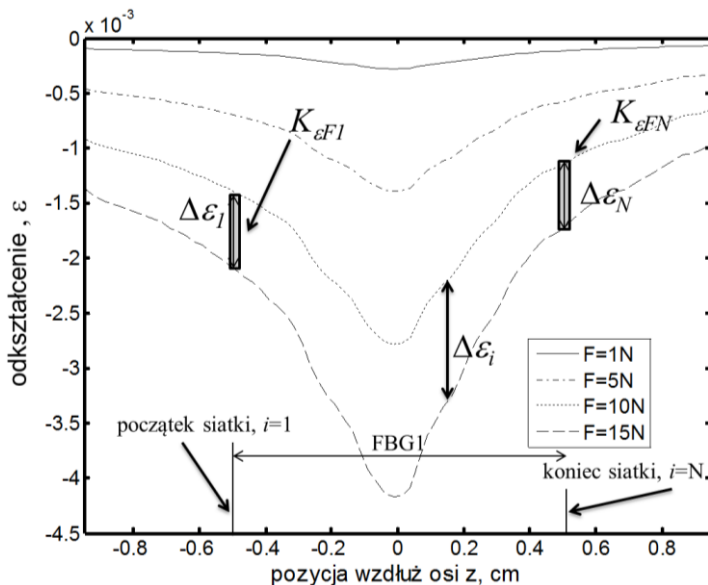


Rys. 3.27. Wartości bezwzględne odkształcenia osiowego siatek Bragga zaproponowanego czujnika wywołane siłą działającą w osi 0-y o wartości 15N

Do wytworzenia wspornika zastosowano technikę cięcia laserowego, charakteryzującą się dużą dokładnością (maksymalne nierówności rzędu $6\ \mu\text{m}$). W celu umieszczenia siatek na wsporniku użyto specjalnie zaprojektowanego przyrządu, zapewniającego powtarzalność mocowania. Mimo zastosowania takich technik dają się zauważyć różnice pomiędzy bezwzględnymi wartościami odkształcenia osiowego dla FBG1 i FBG2, które prezentuje rysunek 3.27. Ponadto widoczne są również różnice pomiędzy wartościami odkształcenia. Analizując obydwa wykresy na rysunku 3.27 uwagę zwraca to, że największa różnica pomiędzy wartościami odkształcenia występuje w części środkowej siatek Bragga, na długości $\sim 0,4\ \text{cm}$ (od $-0,2\ \text{cm}$ do $0,2\ \text{cm}$). Różnica ta nie jest jednak spowodowana nierównościami wspornika czy dokładnością jego wytworzenia, lecz wynika z zastosowanej geometrii obciążanego układu. Gradient odkształcenia osiowego nie jest bowiem zgodny z kierunkiem osi 0-y co widać na rysunku 3.20 (b). Zarówno w miejscu, gdzie przymocowana jest FBG1 jak i FBG2 największa zmiana naprężenia występuje w kierunku odchylonym od osi 0-y w stronę mniejszych wartości na osi 0-z. Dodatkowo ze względu na konstrukcję wspornika i miejsce przyłożenia siły charakter zmian odkształcenia w osi FBG1 jest podobny jak w przypadku FBG2, ale wartości dla poszczególnych pozycji wzdłuż osi 0-z różnią się. Przyczyn można upatrywać w nieznaczących nawet zmianach wymiaru, w tym grubości, strukturze materiału, twardości, sztywności układu obciążającego itp.

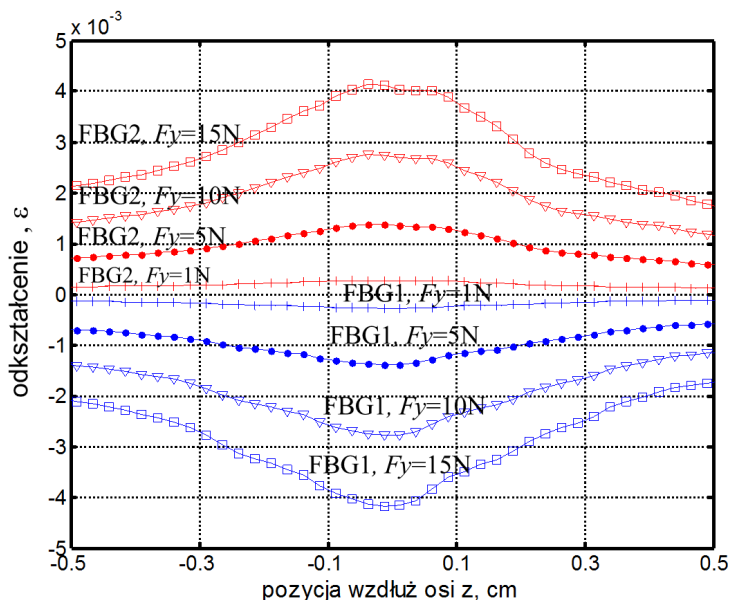
Brak symetrii odkształceń nie stanowi więc błędu, choć różnice odkształcenia osiowego (rys. 3.27) mają wpływ na zmniejszenie symetrii widm elementów

FBG1 i FBG2, co jest widoczne na rysunku 3.37. Nie mają one jednak wpływu na samo zjawisko zmiany szerokości widm wskutek zmiany siły poprzecznej, co z kolei zostało przedstawione na rysunku 3.35 i 3.36.



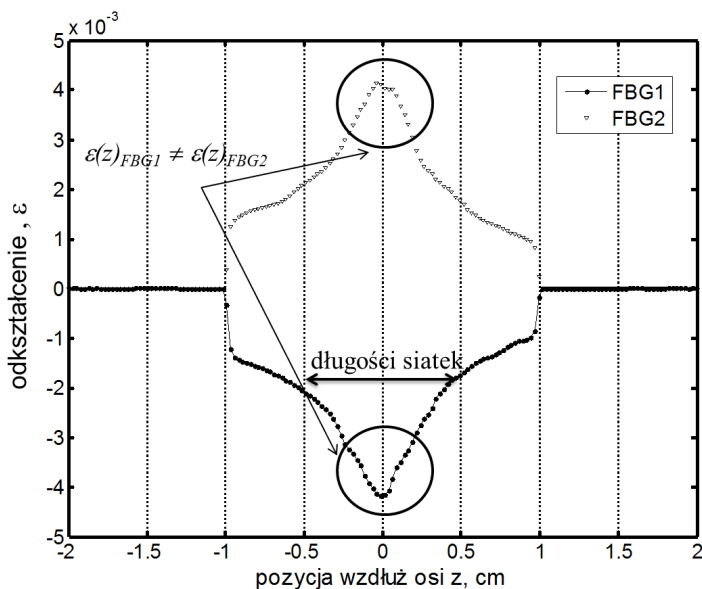
3.28. Charakterystyki odkształcenia osiowych światłowodu umieszczonego w pozycji FBG1 wyznaczone metodą elementów skończonych z uwzględnieniem modułu Younga wspornika, kleju oraz włókna światłowodowego. Pola szare oznaczają zakresy stałej czułości na początku oraz na końcu siatki

Podobnie jak w przypadku siły działającej w osi 0-x, czułość na odkształcenie osiowe jest zależna od pozycji na osi z (osi światłowodu z siatką Bragga). W tym przypadku wartość zmiany odkształcenia osiowego wywołana siłą poprzeczną, zmieniającą się w osi 0-x w zakresie od 10 N do 15 N, na początku FBG1, liczona według zależności (2.55), wynosi $K_{\epsilon F1} \approx 160 \mu\epsilon/N$, zaś na jej końcu $K_{\epsilon FN} \approx 160 \mu\epsilon/N$. Zatem w tym przypadku $K_{\epsilon F1} \approx K_{\epsilon FN}$, co nie oznacza, że siatka nie dozna chirpu wynikającego z nierównomiernego jej odkształcenia, spowodowanego stałą siłą, działającą w osi 0-x, ponieważ równa wartość czułości zdefiniowanej jako (3.55) występuje jedynie na końcach siatki. Analizując rysunek 3.28 widoczne jest, że zmiana odkształcenia osiowego światłowodu w miejscu, gdzie zapisana jest siatka czujnika FBG1, jest funkcją pozycji wzdłuż osi z. Oznacza to, że przyłożenie siły działającej w osi 0-x spowoduje powstanie chirpu siatki. Analogicznie jak w przypadku siły działającej w osi 0-y, również dla przypadku siły zgodnej z kierunkiem 0-x przedstawiono wyznaczony przy użyciu metody elementów skończonych kształt charakterystyki odkształcenia osiowego światłowodu w obszarze, w którym umieszczone były siatki (rysunek 3.29).



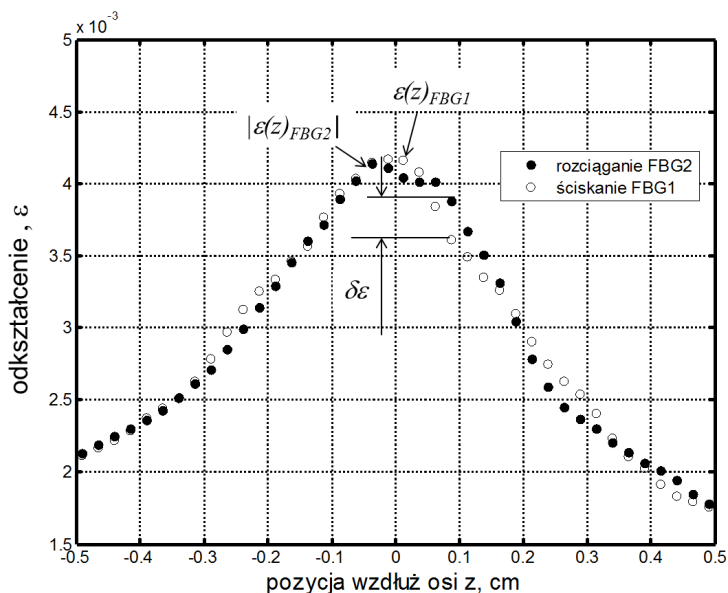
Rys. 3.29. Wartości odkształcenia siatki czujnika FBG1 (charakterystyki wykonane liniami niebieskimi) oraz FBG2 (charakterystyki wykonane liniami czerwonymi) dla różnych wartości siły bocznej, działającej w osi 0-x

Zgodnie z geometrią układu i zwrotem przyłożonej siły F_x , znak odkształcenia dla FBG2 jest tym razem inny niż w przypadku siły działającej w osi 0-y (F_y). Tym razem FBG1 ulega ściskaniu, natomiast rozciągana jest FBG2. Zjawisko zaobserwować można również analizując rysunek 3.21 (b) gdzie FBG2 ulega rozciąganiu, na rysunku 3.29 wartości odkształcenia są dodatnie. Druga siatka czujnika (FBG1) ulega natomiast ściskaniu, co widać na rysunku 3.29, na którym odkształcenie FBG1 jest ujemne. Umieszczenie siatek w miejscu przewężeń wspornika powoduje zatem, również w wyniku przyłożenia siły działającej w osi 0-x, powstanie chirpów w siatkach wskutek ich nierównomiernego odkształcenia. Powstanie chirpu natomiast powoduje poszerzenie transmisyjnych charakterystyk widmowych obydwu siatek.



Rys. 3.30. Charakterystyki odkształcenia siatek dla siły działającej w osi 0-y o wartości 15N

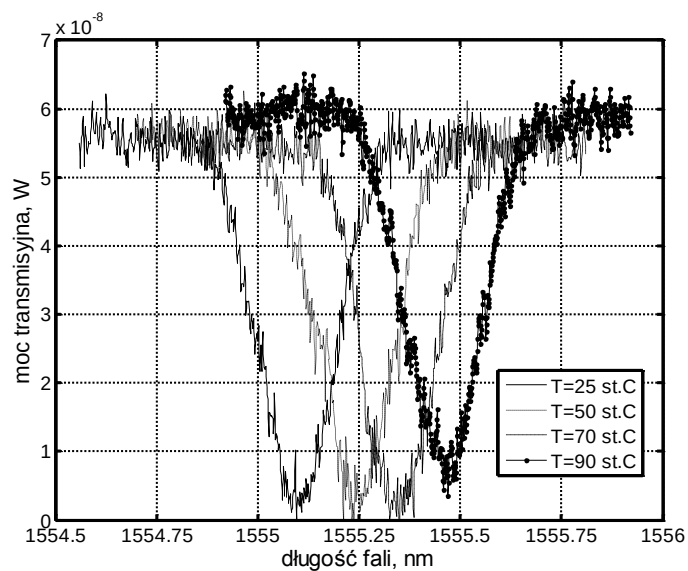
W przypadku pojawienia się siły F_x chirp ma również inny znak dla obydwu rozpatrywanych siatek czujnika. Jedna z siatek doznaje nierównomiernego, dodatniego odkształcenia (tym razem jest to FBG2), natomiast druga siatka doznaje niejednorodnego odkształcenia, ale jest to odkształcenie ujemne (w przypadku FBG1). Na rysunku 3.30 przedstawiono charakterystyki odkształcenia siatek dla siły w osi 0-x równej 15 N. Chociaż zmiany odkształcenia są podobne dla obydwu siatek, istnieją różnice wartości bezwzględnej odkształcenia siatek w obszarze zaznaczonym na rysunku 3.30, gdzie rozkład odkształcenia $\varepsilon(z)_{FBG1}$ dla FBG1 nie jest równy rozkładowi odkształcenia $\varepsilon(z)_{FBG2}$ dla FBG2, co również można zaobserwować na rysunku 3.31.



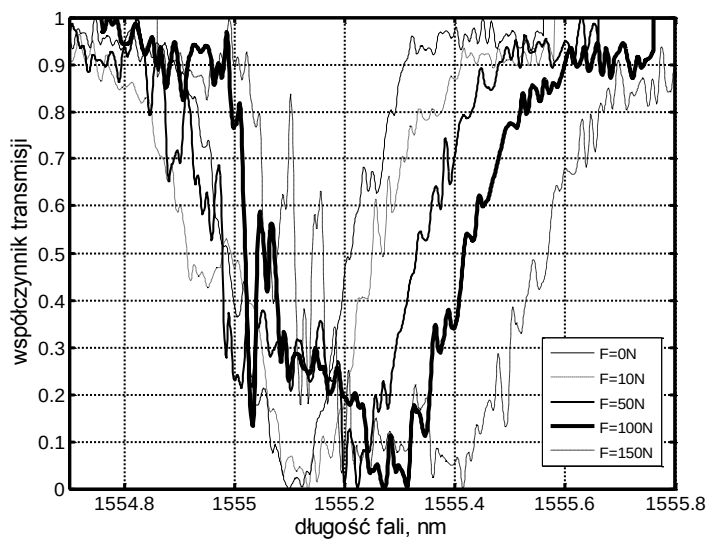
Rys. 3.31. Wartości bezwzględne odkształcenia osiowego siatek Bragga zaproponowanego czujnika wywołane siłą działającą w osi 0-x o wartości 15 N

Rysunek 3.31 przedstawia różnice pomiędzy wartościami bezwzględnymi odkształcenia FBG1 i FBG2, przy czym są one największe w części środkowej siatek Bragga, na długości $\sim 0,3$ cm (od ~ 0 cm do $\sim 0,3$ cm). Gradient odkształcenia osiowego nie jest zgodny z kierunkiem osi 0-x, co widać na rysunku 2.21 (b). W miejscu, gdzie przymocowana jest FBG1 jak i FBG2, największa zmiana naprężenia występuje w kierunku odchylonym od osi 0-x. Ze względu na konstrukcję wspornika i miejsce przyłożenia siły zmiany odkształcenia w osi FBG1 są podobne jak w przypadku FBG2, ale wartości dla poszczególnych pozycji wzdłuż osi 0-z różnią się.

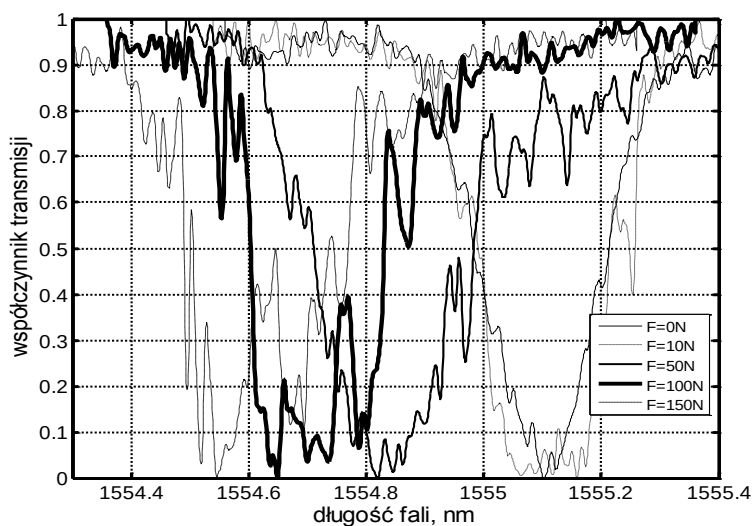
Na rysunku 3.32 przedstawiono charakterystyki transmisyjne czujnika FBG1 zmierzone w warunkach zmieniającej się temperatury. Wraz ze zmianą temperatury zmienia się wartość długości fali Bragga siatki, widmo transmisyjne doznaje przesunięcia w kierunku fal dłuższych wskutek wzrostu temperatury. Na rysunku 3.33 i 3.34 zestawiono wyniki pomiarów charakterystyk transmisyjnych odpowiednio FBG1 i FBG2 dla różnych wartości siły działającej w osi 0-y. Pomiarów dokonano przy zmianie siły w zakresie od 0 N do 150 N dla stałej temperatury, wynoszącej 25°C . Wraz ze wzrostem siły przyłożonej do czujnika, następuje przesunięcie w stronę fal dłuższych widma transmisyjnego FBG1 i jednocześnie zwiększenie szerokości połówkowej widma. Siatka Bragga oznaczona jako FBG2 doznaje również poszerzenia widma transmisyjnego, z tym jednak wyjątkiem, że w przypadku FBG2 widmo ulega przesunięciu w kierunku fal krótszych.



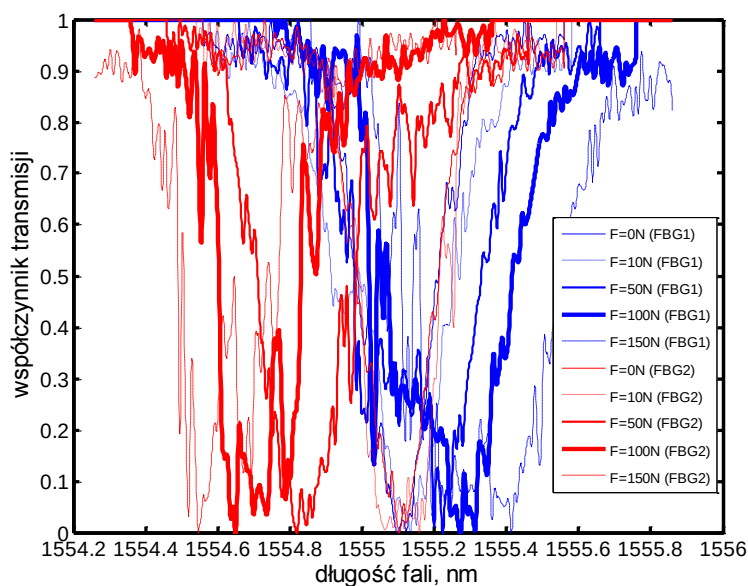
Rys. 3.32. Wyniki pomiarów charakterystyk transmisyjnych FBG1 przy zmiennej temperaturze



Rys. 3.33. Wyniki pomiarów charakterystyk transmisyjnych FBG1 w warunkach zmiennej siły działającej w osi 0-y



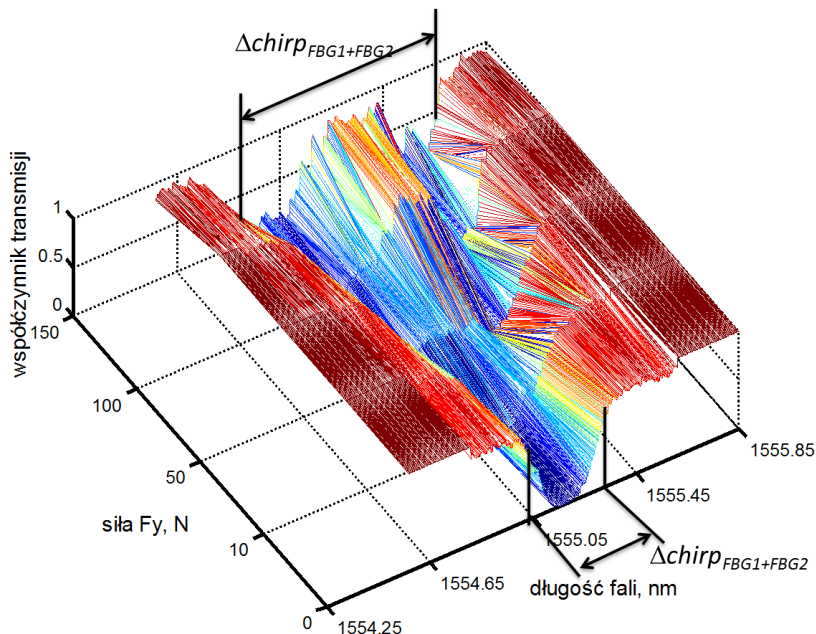
Rys. 3.34. Wyniki pomiarów charakterystyk transmisyjnych FBG2 w warunkach zmiennej siły działającej w osi 0-y



Rys. 3.35. Zebrane na wspólnym rysunku znormalizowane charakterystyki widmowe transmisyjne całego czujnika w warunkach zmiennej siły działającej w osi 0-y

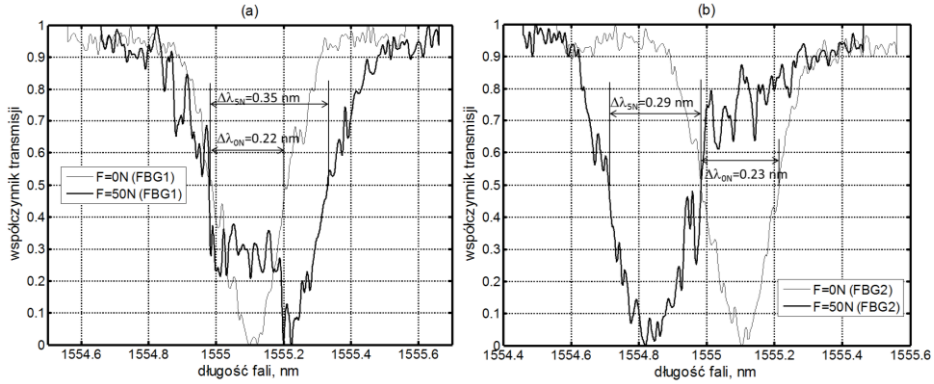
Z analizy charakterystyk widmowych wynika, że wraz ze wzrostem siły działającej w kierunku 0-y następuje poszerzenie i jednocześnie oddalenie od siebie charakterystyk widmowych siatek czujnika (FBG1 i FBG2), podczas gdy

zmiana temperatury powoduje jedynie przesunięcie charakterystyki widmowej siatek. Ta właściwość została wykorzystana do równoczesnego pomiaru temperatury i siły. Na rysunku 3.36 przedstawione są znormalizowane widma czujnika dla siły zmieniającej się wskutek wzrostu siły działającej w osi 0-y od wartości 0 N do 150 N, przy stałej temperaturze, wynoszącej 25°C.

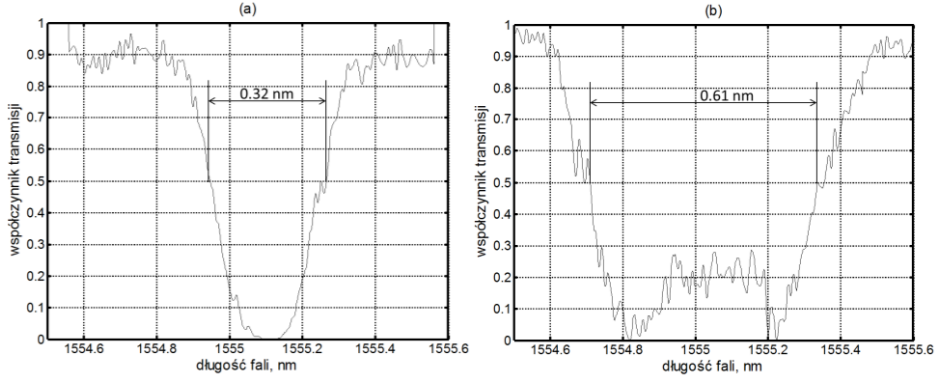


Rys. 3.36. Znormalizowane widmo czujnika dla siły działającej w osi 0-y z zaznaczonymi szerokościami wynikającymi z chirpu w obydwu siatkach oraz przesunięcia charakterystyk w warunkach stałej temperatury

Porównując wykresy umieszczone na rysunkach 3.33 i 3.34 nasuwa się wniosek, że charakterystyki widmowe siatek czujnika (FBG1 i FBG2) nie zachowują pełnej symetrii, co wynika z geometrii wspornika czujnika i związanej z nią różnicy w rozkładzie naprężenia osiowego siatek, widocznego na rysunku 3.27. Wykorzystując informację o zmianie szerokości sumy znormalizowanych widm transmisyjnych do wyznaczenia wartości przyłożonej siły, uzyskuje się bowiem zwiększenie czułości tej zmiany na siłę w stosunku do układu, w którym wykorzystywana byłaby jedynie informacja o szerokości widma jednej z siatek. Przykładowe wyniki pomiarów przedstawione na rysunkach 3.37 oraz 3.38 potwierdzają powyższe wnioski.



Rys. 3.37. Charakterystyki widmowe siatek czujnika: FBG1 (a) oraz FBG2 (b) z zaznaczonymi szerokościami połowkowymi w przypadku braku obciążenia – siła $F_y = 0$ N oraz przy obciążeniu $F_y = 50$ N.



Rys. 3.38. Znormalizowane charakterystyki widmowe całego czujnika (suma widm transmisyjnych FBG1 i FBG2 z zaznaczonymi szerokościami połowkowymi w przypadku braku obciążenia – siła $F_y = 0$ N (a) oraz przy obciążeniu $F_y = 50$ N (b)).

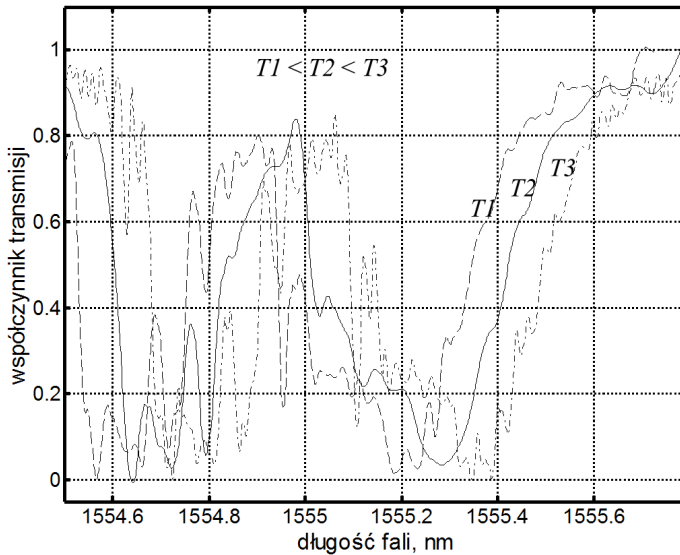
Zmiana wartości szerokości widmowej wraz ze wzrostem siły zginającej od 0 N do 50 N osiąga dla FBG1 wartość rzędu 0,13 nm, zatem wartość współczynnika czułości szerokości widmowej na siłę, zdefiniowana jako:

$$K_F = \frac{\Delta FWHM}{\Delta F}, \quad (3.57)$$

wyniosła zgodnie z rysunkami 3.37 i 3.38 odpowiednio: dla FBG1 $K_F^{FBG1} = 2,6 \cdot 10^{-3}$ nm/N, zaś dla siatki drugiej $K_F^{FBG2} = 1,2 \cdot 10^{-3}$ nm/N. Analogiczna wartość czułości wyznaczona zgodnie z równaniem (3.57) dla całego czujnika wynosi $K_F^{FBG1+FBG2} = 5,8 \cdot 10^{-3}$ nm/N, co jest wartością większą od sumy czułości pojedynczych siatek:

$$K_F^{FBG1+FBG2} > K_F^{FBG1} + K_F^{FBG2}. \quad (3.58)$$

Powyższe zjawisko jest wynikiem przesunięcia całego widma obydwu siatek wskutek zmiany siły, przy czym zgodnie z rys. 3.33 i 3.34 przesunięcia te mają przeciwne znaki. Nierówność (3.58) wskazuje na poprawę czułości czujnika uzyskaną poprzez zastosowanie takiego wspornika czujnika FBG siły, który wywoła w siatkach Bragga jednocześnie chirp i przeciwny znak przesunięcia charakterystyk widmowych. Brak symetrii charakterystyk widmowych obydwu siatek wynika z nieznaczących nawet odchyłeń wymiarowych, w tym grubości, strukturze materiału, twardości, sztywności układu obciążającego itp., na którym umieszczone zostały siatki. W trakcie cięcia wspornika promieniem lasera, materiał z prawej oraz lewej strony szczeliny cięcia zostaje poddany działaniu określonej ilości energii cieplnej. Powoduje to zmiany w strukturze materiału; zakres tych zmian analizowano pod mikroskopem, co pozwoliło na stwierdzenie, że wpływał on również na zmierzone widma transmisyjne siatek Bragga. Wyniki pomiarów widm transmisyjnych czujnika w warunkach zmiennej temperatury dla siły działającej w osi 0-y o wartości 100 N przedstawia rysunek 3.39.



Rys. 3.39. Widma czujnika dla siły F_y równej 100 N dla zmiennej temperatury

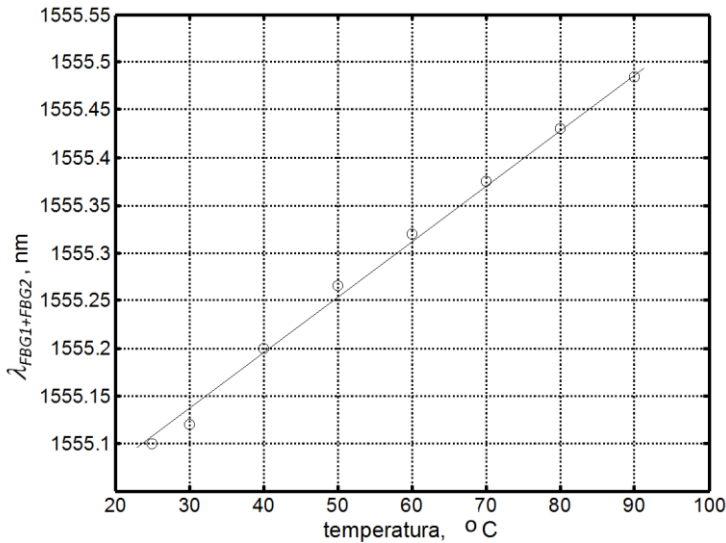
Jak widać wzrost temperatury powoduje przesunięcie czerwone całej charakterystyki widmowej czujnika bez wpływu na jej szerokość. Dla tak zaproponowanego układu zdefiniowano równanie macierzowe (2.4) w postaci:

$$\begin{bmatrix} \Delta \lambda_{FBG1+FBG2}^{F_y} \\ \Delta B_{FBG1+FBG2}^{F_y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{T\lambda} & K_{F_y\lambda} \\ K_{TB} & K_{F_yB} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta T \\ \Delta F_y \end{bmatrix}, \quad (3.59)$$

w którym $\Delta\lambda_{FBG1+FBG2}^{F_y}$ oznacza przesunięcie długości fali znormalizowanego widma sumarycznego całego czujnika złożonego z FBG1 i FBG2. $\Delta B_{FBG1+FBG2}^{F_y}$ wyraża zmianę szerokości widma sumarycznego. Współczynniki $K_{T\lambda}$ i $K_{F_y\lambda}$ oznaczają czułości przesunięcia długości fali widma czujnika odpowiednio na temperaturę i siłę działającą w osi 0-y (F_y), natomiast K_{TB} oraz K_{F_yB} oznaczają współczynniki czułości zmiany szerokości widma czujnika odpowiednio na temperaturę i przyłożoną siłę F_y . Analogiczne do (3.59) równanie w przypadku jednoczesnego pomiaru czujnikiem siły działającej w osi 0-x (F_x) przyjmuje następującą postać:

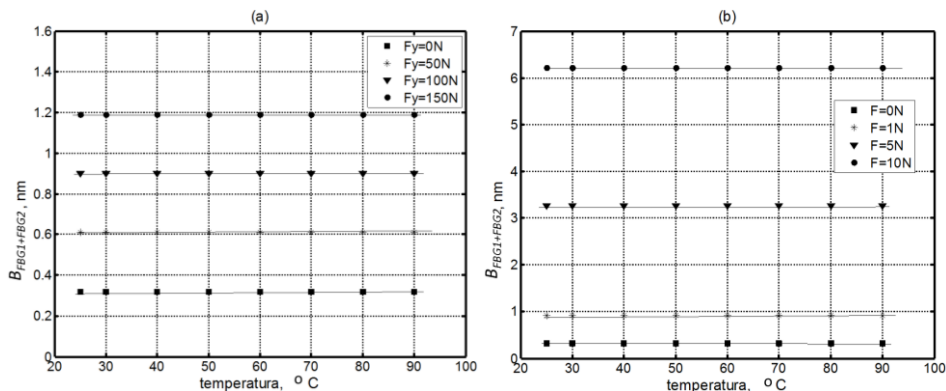
$$\begin{bmatrix} \Delta\lambda_{FBG1+FBG2}^{F_x} \\ \Delta B_{FBG1+FBG2}^{F_x} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{T\lambda} & K_{F_x\lambda} \\ K_{TB} & K_{F_xB} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta T \\ \Delta F_x \end{bmatrix}, \quad (3.60)$$

gdzie $K_{F_x\lambda}$ oraz K_{F_xB} oznaczają współczynniki czułości na siłę F_x odpowiednio przesunięcia długości fali widma czujnika oraz zmiany szerokości pasma transmisji całego układu. Wartości współczynników czułości na siłę F_y oraz F_x zostały wyznaczone eksperymentalnie poprzez pomiar szerokości widma transmisyjnego czujnika oraz jego przesunięcie. Siła oddziaływała w osi 0-y, a następnie 0-x przy stałej temperaturze. Czułości temperaturowe $K_{T\lambda}$ i K_{TB} również wyznaczono eksperymentalnie mierząc szerokości widma transmisyjnego czujnika oraz jego przesunięcie w różnych temperaturach, ale przy stałej wartości sił. Odpowiedź układu na temperaturę przedstawiono na rysunku 3.40.



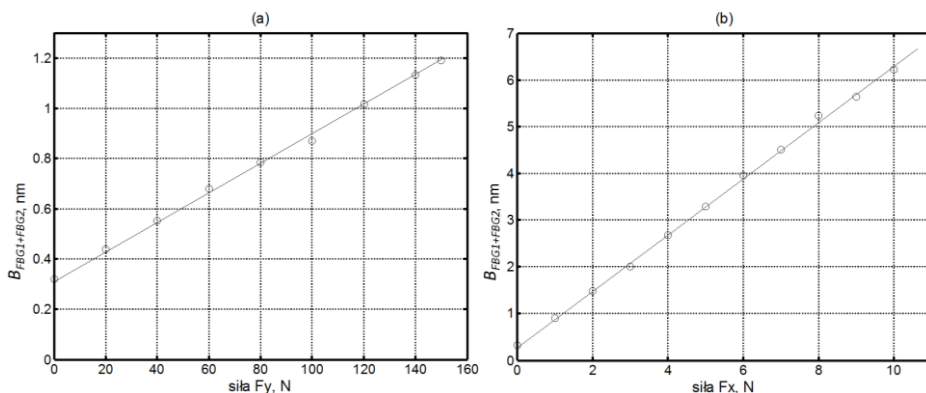
Rys. 3.40. Zmiany przesunięcia widma jako odpowiedź zaproponowanego układu na zmiany temperatury

Jak widać, w wyniku efektu foto-elastycznego oraz termo-optycznego, przesunięcie widma czujnika jest zależne od temperatury, nie jest jednak związane ze zmianą szerokości widma transmisyjnego czujnika. Właściwość tą można zaobserwować na rysunku 3.39, a została ona potwierdzona podczas pomiarów w zakresie temperatur od 25°C do 90°C, co zostało zaprezentowane na rysunku 3.41.



Rys. 3.41. Zmiany szerokości pasma widma transmisyjnego zapropionowanego układu pod wpływem temperatury

Podczas analizy danych pomiarowych, wyznaczone zostały proste regresje liniowej, które również zaznaczono na rysunkach 3.40 i 3.41. Na podstawie wartości kąta nachylenia prostej regresji dla pomiarów w różnych temperaturach wyznaczone zostały czułości badanego układu na temperaturę. Czułości przybrały wartość odpowiednio: $K_{T\lambda} = 5,5$ pm/K oraz $K_{TB} = 0,011$ pm/K. Uzyskane wyniki potwierdziły założenia i obliczenia teoretyczne jak też badania symulacyjne z wykorzystaniem metody elementów skończonych.



Rys. 3.42. Odpowiedź badanego czujnika na siły przyłożone w osi 0-y (a) oraz 0-x (b) przy stałej wartości temperatury, równej 25°C wraz z wyznaczonymi prostymi regresji liniowej

Szerokość widma transmisyjnego czujnika wykazuje małą wartość czułości na temperaturę. Przesunięcie całego widma wraz ze zmianą temperatury jest kilka rzędów wielkości większe od jego poszerzenia. Na podstawie wartości kąta nachylenia prostych regresji liniowej z rysunku 3.42 (a) i (b) wyznaczono czułości badanego układu odpowiednio na siły F_y oraz F_x , które wyniosły odpowiednio dla siły F_y : $K_{Fy\lambda} = 0,002 \text{ pm/N}$ oraz $K_{FyB} = 5,8 \text{ pm/N}$. Natomiast w przypadku, gdy do układu przyłożona została siła działająca w osi 0-x (F_x) współczynniki czułości z równania (3.60) wyniosły odpowiednio: $K_{Fx\lambda} = 0,004 \text{ pm/N}$ oraz $K_{FxB} = 589 \text{ pm/N}$. Różnica w wartościach czułości uzyskanych podczas pomiarów eksperymentalnych umożliwia wykonanie inwersji macierzy z równania (3.59) oraz (3.60) i zapisania odwróconych, równań macierzowych.

W przypadku równoczesnego pomiaru siły działającej w osi 0-y, równanie czujnika wyprowadzone w postaci zależności (2.6) przyjmie teraz postać:

$$\begin{bmatrix} \Delta T \\ \Delta F_y \end{bmatrix} = \frac{1}{31,9} \begin{bmatrix} 5,8 \text{ pm/N} & -0,002 \text{ pm/N} \\ -0,011 \text{ pm/K} & 5,5 \text{ pm/K} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta \lambda_{FBG1+FBG2}^{Fy} \\ \Delta B_{FBG1+FBG2}^{Fy} \end{bmatrix}. \quad (3.61)$$

Natomiast w przypadku równoczesnego i niezależnego pomiaru siły działającej w osi 0-x analogiczne do (3.61) równanie przyjmie postać:

$$\begin{bmatrix} \Delta T \\ \Delta F_x \end{bmatrix} = \frac{1}{3239} \begin{bmatrix} 589 \text{ pm/N} & -0,004 \text{ pm/N} \\ -0,011 \text{ pm/K} & 5,5 \text{ pm/K} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta \lambda_{FBG1+FBG2}^{Fx} \\ \Delta B_{FBG1+FBG2}^{Fx} \end{bmatrix}. \quad (3.62)$$

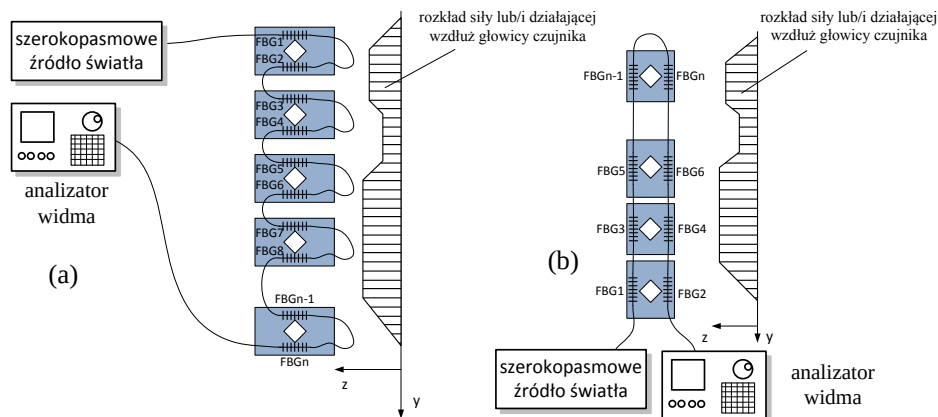
Niezerowe wartości wyznaczników D macierzy z równań (3.59) i (3.60), zawierających współczynniki czułości czujnika na temperaturę i siły świadczą o tym, że są one dobrze uwarunkowane.

Reasumując – na podstawie wyników przeprowadzonych badań eksperymentalnych można wnioskować, że istnieje możliwość jednoczesnego pomiaru temperatury i siły działającej w jednej z dwóch osi, z wykorzystaniem dwóch siatek Bragga.

Błędy pomiaru przesunięcia długości fali są zdeterminowane m.in. rozdzielczością analizatora widma. Znajomość ich wartości pozwala na określenie błędów wyznaczenia współczynników $K_{T\lambda}$, K_{TB} , $K_{Fy\lambda}$, K_{FyB} , $K_{Fx\lambda}$ i K_{FxB} co umożliwia wyznaczenie błędu standardowego wyznacznika macierzy. Mierząc przesunięcie oraz szerokość widma czujnika, można jednocześnie określić wartość temperatury i siły w osi 0-y oraz 0-x, odpowiednio na podstawie równań (3.61) i (3.62).

Czujnik użyty w eksperymencie można potraktować jako moduł do rozbudowy, poprzez jego zwielokrotnienie na jednym włóknie światłowodowym. W ten sposób głowica czujnika osiągnie większe rozmiary fizyczne, umożliwiając w zamian pomiar siły oraz temperatury w n miejscach, a tym samym określenie rozkładu siły i temperatury. Na rysunku 3.43 przedstawiono propozycję układu wielu czujników do równoczesnego pomiaru

rozkładu siły i temperatury. Na rysunku zaznaczono miejsca przymocowania siatek czujnika.



Rys. 3.43. Schemat układu wielopunktowego czujnika siły i temperatury wykorzystujący siatki Bragga zapisane na jednym włóknie światłowodowym w sposób (a) równoległy, (b) szeregowy

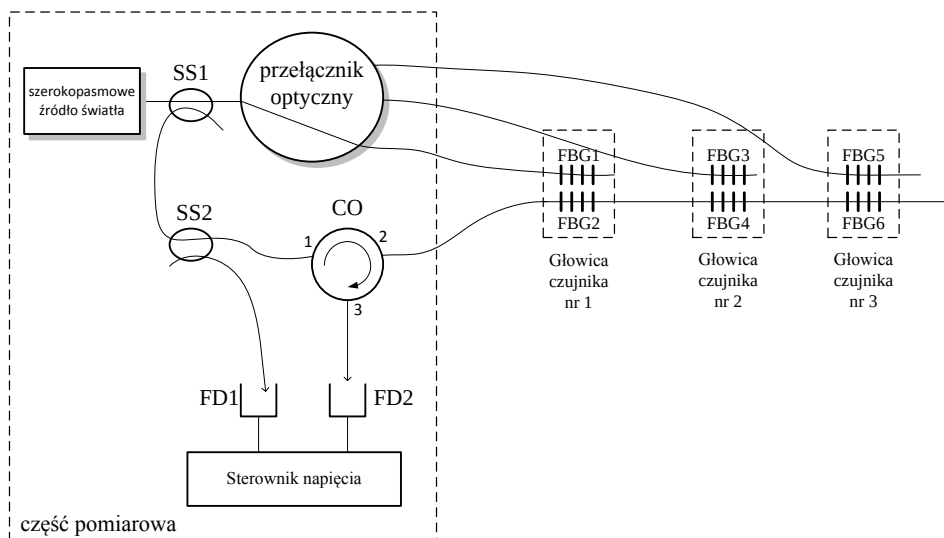
Przy odpowiednim doborze siatek Bragga (takie same długości fali Bragga każdej pary siatek) moduł czujnika siły prezentowany na rysunku 3.42 będzie niezależny od temperatury. Właściwość tą można osiągnąć stosując tą samą maskę fazową dla każdej pary FBG. Siatki poszczególnych modułów czujnika można wytwarzać używając maski fazowej o różnych wartościach okresu. Właściwości tak połączonych układów pomiarowych wymagają szczegółowych badań. Określić należy wzajemne oddziaływania poszczególnych modułów par siatek. Otwartym zagadnieniem jest także łączony pomiar każdego modułu oddzielnie jak też sekwencyjne jeden po drugim.

Osiągnięcie określonych parametrów czujnika z siatkami Bragga wymaga zaprojektowania odpowiedniego wspornika. Jest to możliwe poprzez wykorzystanie metod analizy układu mechanicznego. Za pomocą takiej analizy wyznaczyć można zakresy możliwych wartości wielkości mierzonych oddziaływujących na czujnik. Aby jednak potwierdzić poczynione założenia i umożliwić wyznaczenie rzeczywistych wartości parametrów układu zastosować należy metody indukcyjne. Określenie rzeczywistych wartości czułości poszczególnych parametrów układu czujnika z siatkami Bragga na temperaturę i siłę jest kluczowe dla poznania jego właściwości metrologicznych.

4. Optoelektroniczne czujniki niejednorodnego naprężenia nieczułe na temperaturę

4.1. Wielopunktowy pomiar naprężenia i temperatury

Czujniki optoelektroniczne mogą być wykorzystane do pomiaru wielkości fizycznej, np. naprężenia lub odkształcenia w wielu punktach, rozłożonych na drodze pomiarowej. Czujniki takie wykorzystują najczęściej zjawisko zależnego od temperatury odbicia Fresnela [32] oraz siatki Bragga [19, 96]. Obecnie rozwija się również prace nad układami służącymi do wielopunktowych pomiarów wielkości fizycznych np. ciśnienia [125], przy jednoczesnym pomiarze temperatury [44]. Przykładowy schemat układu pomiarowego wykorzystywanego do równoczesnego pomiaru naprężenia i temperatury przedstawiono na rysunku 4.1.



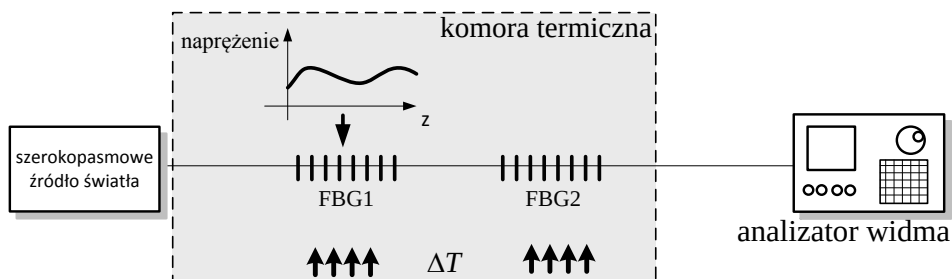
Rys. 4.1. Schemat układu do wielopunktowego pomiaru naprężenia, nieczułego na temperaturę. SS-sprzęgacz światłowodowy, CO-cyrkulator optyczny, FD-fotodiody, FBG-siatki Bragga

Na rysunku przedstawiono czujnik do wielopunktowego pomiaru naprężenia składający się z trzech głowic. Każda głowica posiada parę siatek Bragga, których widma częściowo zachodzą na siebie. Dwie siatki w jednej głowicy posiadają takie same czułości temperaturowe. Jednocześnie ich współczynniki czułości na naprężenie różnią się w wyniku odpowiedniego umieszczenia siatek. W przypadku gdy przełącznik optyczny kieruje światło szerokopasmowego źródła światła ze sprzęgacza światłowodowego SS1 do FBG1, odbite długości fali od FBG1 są poprzez sprzęgacz SS1 kierowane na sprzęgacz SS2, który rozdziela je na dwie wiązki. Jedną z wiązek rejestruje fotodiody FD1, jako

sygnał wejściowy do FBG2, druga wiązka zaś dociera do FBG2 poprzez cyrkulator optyczny CO. Sygnał odbity od elementu FBG2 poprzez cyrkulator optyczny jest następnie kierowany do fotoodbiornika FD2. Ponieważ widma FBG1 i FBG2 pokrywają się, wywołanie naprężenia głowicy nr 1 czujnika spowoduje, że pojawi się odpowiedź na naprężenie w postaci zmiany widma FBG2. Doprowadzi to do przesunięcia widma odbiciowego FBG2 w stronę fal dłuższych i w efekcie zwiększenia pokrycia widm FBG1 i FBG2, co z kolei zwiększy moc odebraną przez detektor FD2. Wielkość mocy odbieranej przez FD2 będzie liniowo zależna od naprężenia i może być wykorzystana do wyznaczania naprężenia osiowego przyłożonego do głowicy nr 1. Moc optyczna odbierana przez FD2 nie zmieni się przy zmianie temperatury otoczenia, ponieważ widma odbiciowe obydwu siatek (FBG1 i FBG2) przesuwają się równocześnie wraz z jej zmianą. W przypadku pozostałych głowic czujnika zasada działania jest podobna.

4.2. Idea pomiaru niejednorodnego naprężenia oraz temperatury

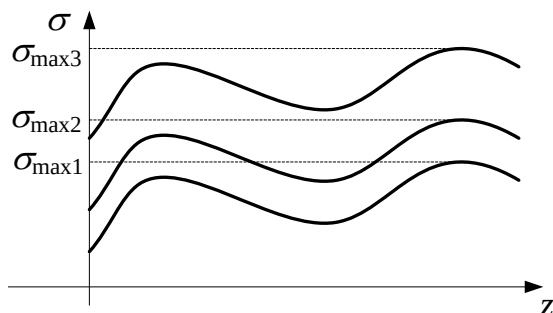
Układy przedstawione w rozdziale 4.1 dotyczą czujników wielopunktowych, w których ilość wykorzystywanych siatek Bragga jest równa ilości punktów pomiarowych danej wielkości. W niniejszym rozdziale opisana zostanie metoda pomiaru naprężenia niejednorodnego na długości przetwornika pomiarowego z jednoczesnym brakiem czułości skrośnej na temperaturę. Metoda ta wykorzystuje dwie siatki Bragga, przy czym jedna z nich poddana jest niejednorodnemu naprężeniu oraz zmieniającej się temperaturze, druga zaś poddana jest tylko zmianom temperatury. Schemat zaproponowanego układu do pomiaru rozkładu naprężenia zaprezentowano na rysunku 4.2. Jest on niewrażliwy na zmiany temperatury.



Rys. 4.2. Schemat układu czujnika ze światłowodowymi siatkami Bragga do pomiaru rozkładu naprężenia i zerową czułością skrośną na temperaturę

Na rysunku 4.2 przedstawiono układ pracujący w trybie transmisyjnym. Przy wykorzystaniu sprzęgacza światłowodowego istnieje możliwość pracy w trybie odbiciowym. Jedna z siatek czujnika (FBG1) poddana jest zmianom naprężenia

wywołanego nierównomiernym jej rozciąganiem. Odształcenie to jest niejednorodne na długości siatki – zgodnie z rysunkiem 4.3.



Rys. 4.3. Rozkład naprężenia wzdłuż z o znanym kształcie

Przy znanym *a-priori* kształcie krzywej naprężenia wyznaczać można jedynie jego maksymalną wartość, oznaczoną na rysunku 4.3 jako $\sigma_{\max}$. Dodatkowo, obydwie siatki są poddawane oddziaływaniu zmieniającej się temperatury panującej w komorze termicznej. Na FBG1 oddziałuje naprężenie natomiast FBG2 nie podlega temu oddziaływaniu. Analizator widma rejestruje sumaryczne widmo sygnału skierowanego z szeroko-pasmowego źródła światła po jego przejściu przez układ dwóch siatek (FBG1 i FBG2). Zsumowane widmo obydwu siatek, stanowi informację służącą określeniu naprężenia maksymalnego na długości FBG1 oraz temperatury obydwu siatek przy wykorzystaniu zaproponowanego układu.

4.3. Algorytm wyznaczania maksymalnego naprężenia i temperatury przy wykorzystaniu czujnika optoelektronicznego i metody gradientów sprzężonych

Wyznaczenie maksymalnej wartości naprężenia o niejednorodnym rozkładzie, przy jednoczesnym określeniu temperatury, za pomocą czujnika ze światłowodowymi siatkami Bragga, należy do kategorii pomiarów pośrednich. Maksymalną wartość naprężenia oraz temperaturę wyznacza się bowiem poprzez pomiar widma układu dwóch siatek czujnika. Określenie wartości maksymalnej niejednorodnego naprężenia oraz temperatury jest zatem przykładem wnioskowania o przyczynach na podstawie skutków. W tym przypadku przyczyną zmiany widma czujnika jest wywołany w siatce niejednorodny rozkład naprężenia oraz zmiana temperatury. Deformacja widma czujnika jest skutkiem zmiany naprężenia i temperatury siatek Bragga (FBG1 i FBG2).

W przypadku omawianego czujnika wartości maksymalnej niejednorodnego naprężenia oraz temperatury, równanie macierzowe (2.4) można zapisać w postaci:

$$\begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} \\ K_{21} & K_{22} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} T \\ \sigma_{\max} \end{bmatrix}, \quad (4.1)$$

gdzie współczynniki K oznaczają czułości parametrów P na temperaturę T oraz maksymalne naprężenie na długości przetwornika pomiarowego $\sigma_{\max}$, przy czym macierz współczynników K oznaczono jako:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} \\ K_{21} & K_{22} \end{bmatrix} = f(\sigma_{\max}, T). \quad (4.2)$$

Parametr P_1 oznacza szerokość połówkową widma czujnika (FBG1+FBG2), natomiast parametr P_2 odzwierciedla przesunięcie długości fali Bragga widma sumarycznego obydwu siatek. Obydwa parametry zależą od maksymalnej wartości naprężenia oraz temperatury, co można zapisać w postaci następujących równań:

$$P_1 = f_1[\sigma_{\max}, T], \quad (4.3)$$

$$P_2 = f_2[\sigma_{\max}, T]. \quad (4.4)$$

W tym przypadku istnieje konieczność wyznaczenia wartości temperatury i maksymalnej wartości naprężenia bez znajomości macierzy $\mathbf{A}$. Wektor wielkości poszukiwanych $\mathbf{x} = [\sigma_{\max}, T]$ zawiera wartość naprężenia i temperatury. Wektor wielkości mierzonych oznaczono jako

$\mathbf{b}=[P_1, P_2]=\left[FWHM^{FBG1+FBG2}, \Delta\lambda_{rez}^{FBG1+FBG2}\right]$, gdzie $FWHM^{FBG1+FBG2}$ jest szerokością połówkową widma układu FBG1+FBG2, $\Delta\lambda_{rez}^{FBG1+FBG2}$ oznacza przesunięcie długości fali rezonansowej układu FBG1+FBG2. Równanie 4.1 można zapisać w następującej postaci macierzowej:

$$\mathbf{b} = \mathbf{A}\mathbf{x}, \quad (4.5)$$

gdzie macierz $\mathbf{A}$ jest symetryczna, posiada rozmiary 2×2 dla wszystkich wektorów $\mathbf{x} \in R^2$ i jest rzeczywista. Do rozwiązania równania (4.5) użyć można metody gradientów sprzężonych [89], w której wykorzystuje się zbiór $\{p_k\}$ wzajemnie sprzężonych kierunków [122]. Oznaczając rozwiązanie układu (5.5) jako $\mathbf{x}^{wyzn}$ można rozwinąć to rozwiązanie w następujący szereg [204]:

$$\mathbf{x}^{wyzn} = \alpha_1 p_1 + \dots + \alpha_n p_n, \quad (4.6)$$

przy czym poszczególne współczynniki można zapisać zależnościami:

$$\begin{aligned} \mathbf{A}\mathbf{x}^{wyzn} &= \alpha_1 \mathbf{A}p_1 + \dots + \alpha_n \mathbf{A}p_n = \mathbf{b}, \\ p_k^T \mathbf{A}\mathbf{x}^* &= p_k^T \alpha_1 \mathbf{A}p_1 + \dots + p_k^T \alpha_k \mathbf{A}p_k + \dots + p_k^T \alpha_n \mathbf{A}p_n = \alpha_k p_k^T \mathbf{A}p_k = p_k^T \mathbf{b}, \quad (4.7) \\ \alpha_k &= \frac{p_k^T \mathbf{b}}{p_k^T \mathbf{A}p_k} = \frac{\langle p_k, \mathbf{b} \rangle}{\langle p_k, p_k \rangle_A} = \frac{\langle p_k, \mathbf{b} \rangle}{\|p_k\|_A^2}. \end{aligned}$$

Zgodnie z metodą gradientów sprzężonych, po obliczeniu sekwencji n sprzężonych kierunków, istnieje możliwość wyznaczenia współczynników α_k , co z kolei umożliwia rozwiązanie równania (4.5). Początkowa wartość wektora rozwiązań wynosi $\mathbf{x}_0$. Funkcję celu można zapisać w następującej postaci:

$$f(\mathbf{x}) = \|\mathbf{A}\mathbf{x} - \mathbf{b}\|^2. \quad (4.8)$$

Minimum funkcji otrzyma się, gdy gradient funkcji będzie równy zero:

$$\nabla_{\mathbf{x}} f = 2\mathbf{A}^T(\mathbf{A}\mathbf{x} - \mathbf{b}) = 0. \quad (4.9)$$

W rozważanym przypadku f jest funkcją maksymalnego naprężenia i temperatury, a jej gradient $\nabla_{\mathbf{x}} f$ oznacza kierunek maksymalnego wzrostu. Największy spadek funkcji f zapisano jako:

$$\Delta \mathbf{x}_0 = -\nabla_{\mathbf{x}} f(\mathbf{x}_0). \quad (4.10)$$

Zastosowano algorytm wyszukania minimum funkcji f przy pomocy regulowanej długości kroku oznaczonego jako α , polegający na wykorzystaniu metody poszukiwania liniowego [8]. Dla danego wektora kierunkowego $\Delta \mathbf{x}$

jednym ze sposobów wyboru α jest minimalizacja funkcji f wzdłuż linii $x_n - \alpha_n \Delta x$, co można zapisać jako:

$$\begin{aligned}\alpha_0 : \min_{\alpha} f(x + \alpha \Delta x) \\ x_1 = x_0 + \alpha \Delta x_0.\end{aligned}\tag{4.11}$$

Wektor rozwiązań w pierwszym kroku będzie zatem zależny od początkowego wektora rozwiązań w iteracji zerowej. Po pierwszej iteracji z kierunkiem Δx_0 wykonywane są kolejne, zgodnie z następnym sprzężonym kierunkiem Δx_n , przy czym $\Delta x_0 = \Delta x_0$. Obliczenie n -tego kierunku odbywa się z uwzględnieniem, że $\Delta x_n = -\nabla_x f(x_n)$. Parametr aproksymacji β_n w każdym kroku obliczany był zgodnie z metodą Polak–Ribière [205] zgodnie z poniższą zależnością:

$$\beta_n = \frac{\Delta x_n^T (\Delta x_n - \Delta x_{n-1})}{\Delta x_{n-1}^T \Delta x_{n-1}}.\tag{4.12}$$

Powyższe obliczenia pozwalają uaktualnić kierunek sprzężony, co można zapisać jako:

$$\Delta x_n = \Delta x_n + \beta_n \Delta x_{n-1}.\tag{4.13}$$

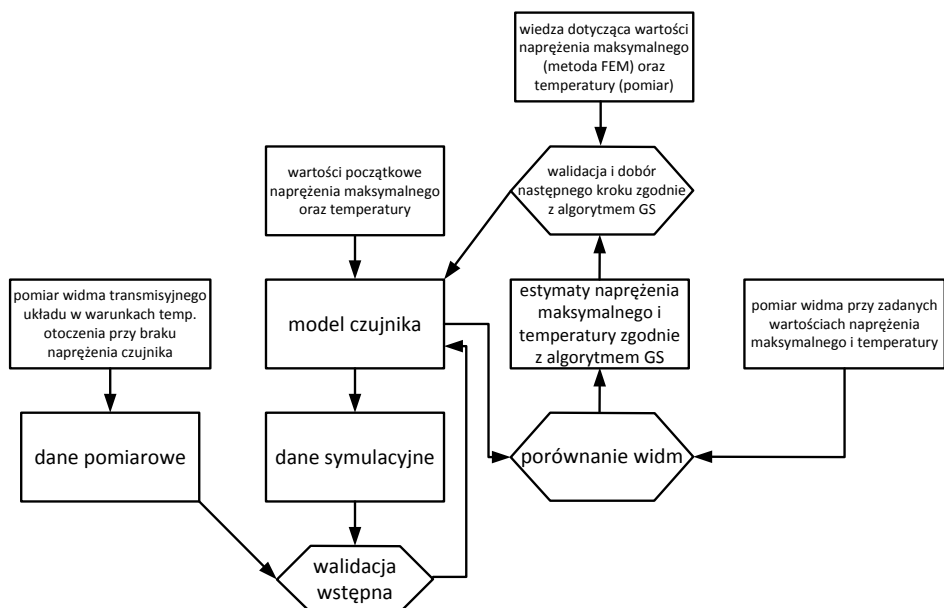
Następnie zastosowano, rozwijaną również obecnie [185], metodę przeszukiwania liniowego, służącą optymalnemu doborowi α_n , $\min_{\alpha_n} f(x_n + \alpha_n \Delta x_n)$. Prowadzi to do uaktualnienia lub wyznaczenia ostatecznej wartości wektora naprężenia i temperatury poprzez rozwiązanie równania:

$$x_{n+1} = x_n + \alpha_n \Delta x_n.\tag{4.13}$$

W celu wyznaczenia wartości macierzy $\mathbf{A}$ zbudowano model czujnika z siatkami Bragga, który pozwala na wyznaczenie widma transmisyjnego na podstawie wartości maksymalnego naprężenia oraz temperatury, zgodnie z procedurą przedstawioną na rysunku 4.4.

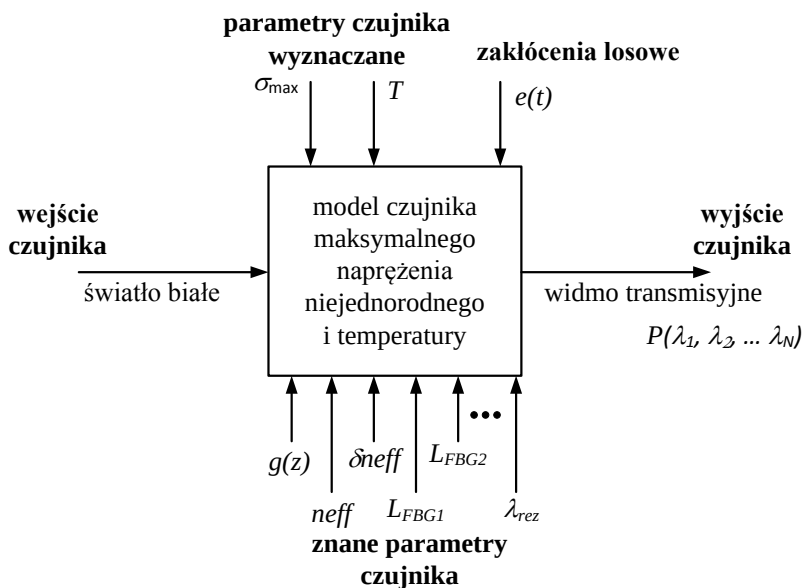
4.4. Model czujnika do równoczesnego pomiaru temperatury i maksymalnej wartości naprężenia niejednorodnego

Na podstawie pomiarowych widm transmisyjnych czujnika rzeczywistego, dokonano walidacji wstępnej modelu czujnika (rys. 4.4). Dane uzyskane z modelu (dane symulacyjne) porównane zostały z danymi pomiarowymi. Procedura minimalizacji funkcji (4.8) z wykorzystaniem metody gradientów sprzężonych została przedstawiona na rysunku 4.4.



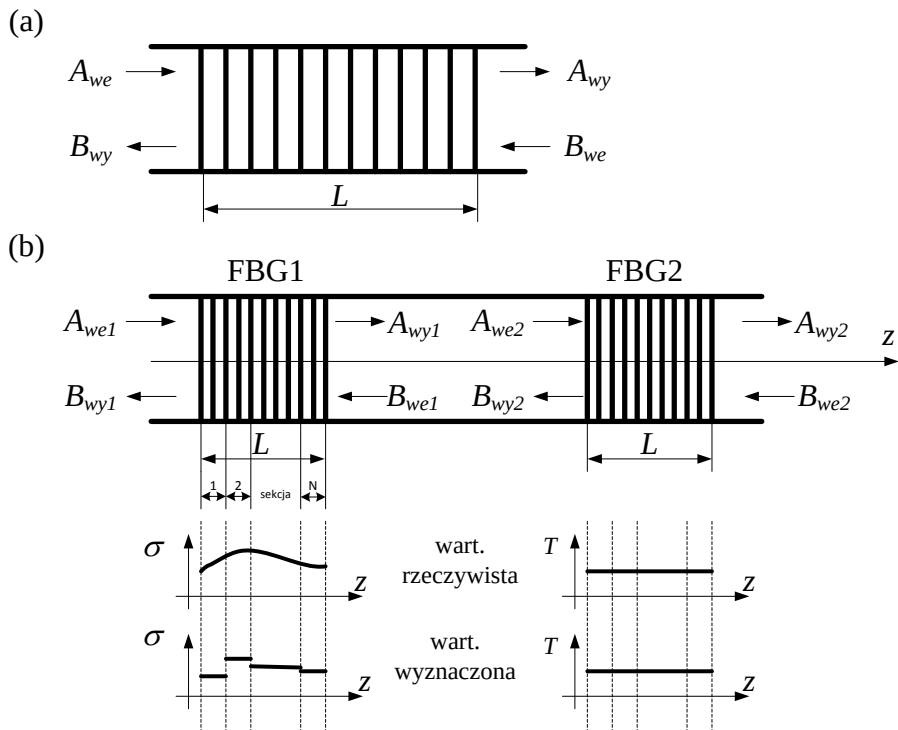
Rys. 4.4. Procedura wyznaczania maksymalnej wartości naprężenia i temperatury przy wykorzystaniu zaproponowanego czujnika optoelektronicznego i metody gradientów sprzężonych

Schemat blokowy modelu czujnika z zaznaczonymi wielkościami mierzonymi przedstawiono na rysunku 4.5. Wśród parametrów modelu znanych *a-priori* wymienić należy: chirp siatek, ich profil apodyzacyjny [243], rezonansowa długość fali czujnika, szerokość połowkowa charakterystyki transmisyjnej czujnika w temperaturze otoczenia przy braku naprężenia, długości siatek czujnika, amplituda modulacji współczynnika załamania siatki, efektywny współczynnik załamania światła i inne. Maksymalna wartość naprężenia oraz temperatura są wielkościami wyznaczanymi. Widmo transmisyjne czujnika jest obliczane dla dyskretnej liczby długości fali: $P(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_N)$, przy czym $N = 500$.



Rys. 4.5. Schemat blokowy modelu czujnika z ważniejszymi parametrami, $g(z)$ – charakterystyka apodyzacyjna siatek czujnika, n_{eff} – efektywny współczynnik załamania światła włókna, na którym zapisane są siatki, δn_{eff} – amplituda modulacji współczynnika załamania światła w rejonie FBG1 i FBG2, L_{FBG} – długości siatek, λ_{rez} – rezonansowa długość fali czujnika

Do budowy modelu czujnika zastosowano metodę macierzy przejścia [257]. Zasadę konstrukcji macierzy i warunki brzegowe metody przedstawiono na rysunku 4.6.



Rys. 4.6. (a) Struktura jednolitej siatki Bragga o długości L . Parametry A i B są wolnozmiennymi amplitudami modów propagujących w kierunku dodatnim i ujemnym, (b) Dwie FBG tworzące czujnik do jednoczesnego pomiaru rozkładu naprężenia i temperatury

Założono, że parametry $A_{we,wy}$ oraz $B_{we,wy}$ z rysunku 4.6 są amplitudami modów propagujących odpowiednio w kierunku dodatnim (od wejścia układu do wyjścia) i ujemnym (od wyjścia do wejścia).

W przypadku pojedynczej siatki macierz przejścia jednorodnej FBG otrzymano wychodząc od równań modów sprzężonych [119, 121] i metody macierzy transferujących, co można przedstawić za pomocą następującego równania:

$$\begin{bmatrix} A_{we} \\ B_{wy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{t} & \frac{r^*}{t^*} \\ r & \frac{1}{t^*} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_{wy} \\ B_{we} \end{bmatrix}, \quad (5.5)$$

gdzie $r = |r| \exp(i\phi_r)$ oraz $t = |t| \exp(i\phi_t)$ odpowiadają współczynnikom odbicia i transmisji, ϕ_r i ϕ_t to fazy współczynników odbicia i transmisji FBG. Stosując metodę macierzy przejścia, zastosowano pewne założenia upraszczające, umożliwiające wyznaczenie widma transmisyjnego i odbiciowego siatki Bragga. Na rysunku 4.6 (b) wartość amplitudy modu transmisyjnego czujnika oznaczona

została jako A_{wy2} , zaś wartość amplitudy modu odbiciowego oznaczono jako B_{wy1} . Założono, że moc optyczna wprowadzana jest do siatki z jednego jej końca, w kierunku dodatnim (na rysunku oznaczona jako A_{we1}), zatem sygnał $B_{we2} = 0$. Założono również, że cały sygnał wyjściowy FBG1 jest równy sygnałowi wejściowemu FBG2, zatem $A_{wy1} = A_{we2}$. Założono także brak strat odbitego sygnału optycznego pomiędzy FBG2 i FBG1 ($B_{wy2} = B_{we1}$). Cały układ optyczny od pierwszej FBG do drugiej FBG z rysunku 4.6 (b) można przedstawić stosując następujące równanie macierzowe:

$$\begin{bmatrix} A_{we1} \\ B_{wy1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{111} & T_{121} \\ T_{211} & T_{221} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} A_{wy1} \\ B_{we1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{111} & T_{121} \\ T_{211} & T_{221} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} T_{112} & T_{122} \\ T_{212} & T_{222} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} A_{wy2} \\ B_{we2} \end{bmatrix} =$$

$$= \begin{bmatrix} \frac{1}{t} & \frac{r^*}{t^*} \\ \frac{r}{t} & \frac{1}{t^*} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \frac{1}{t} & \frac{r^*}{t^*} \\ \frac{r}{t} & \frac{1}{t^*} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_{wy2} \\ B_{we2} \end{bmatrix}, \quad (4.6)$$

przy czym macierz $\begin{bmatrix} T_{111} & T_{121} \\ T_{211} & T_{221} \end{bmatrix}$ określającą transfer światła przez FBG1 można wyrazić jako:

$$\begin{bmatrix} T_{111} & T_{121} \\ T_{211} & T_{221} \end{bmatrix} = [T^N] \dots [T^3][T^2][T^1]. \quad (4.7)$$

Przy podziale pierwszej siatki (FBG1) na N części, macierz $[T^j]$ oznacza j -tą część siatki, przy czym $j=1,2,\dots,N$. Każda z macierzy $[T^j]$ jest funkcją położenia wzdłuż osi siatki (pozycja wzdłuż osi z , zgodnie z rysunkiem 4.6), co pozwala na uzależnienie funkcji przejścia światła przez FBG1 od pozycji wzdłuż osi z . Każdą z macierzy $[T^j]$ wyrazić można w następujący sposób:

$$[T^j] = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma_{FBG1}^j) - \frac{i\sigma \sinh(\gamma_{FBG1}^j)}{\gamma} & -\frac{i\kappa_{ac} \sinh(\gamma_{FBG1}^j)}{\gamma} \\ \frac{i\kappa_{ac} \sinh(\gamma_{FBG1}^j)}{\gamma} & \cosh(\gamma_{FBG1}^j) + \frac{i\sigma \sinh(\gamma_{FBG1}^j)}{\gamma} \end{bmatrix}, \quad (4.8)$$

w której γ_{FBG1}^j oznacza taki zakres długości siatki, który odpowiada i -tej sekcji podziału siatki, przy czym każda z sekcji jest reprezentowana przez inną macierz $[T^j]$. W konstrukcji modelu przyjęto długość siatki równą 15 mm oraz długość fali Bragga siatki równą 1555,1 nm. Zakresy długości FBG1 wraz z odpowiadającymi im numerami sekcji jej podziału dobrano zgodnie z tabelą 4.1.

Tabela 4.1. Wartości zakresów długości odpowiadające poszczególnym sekcjom podziału siatki.

Nr sekcji	j=1	j=2	j=3	j=4	j=5	j=6	j=7	j=8	j=9
zakresy długości siatki w każdej sekcji [m]	$l_{FBG1}^1 = 0-0,01(6)$	$l_{FBG1}^2 = 0,01(6)-0,0(3)$	$l_{FBG1}^3 = 0,0(3)-0,05$	$l_{FBG1}^4 = 0,05-0,0(6)$	$l_{FBG1}^5 = 0,0(6)-0,08(3)$	$l_{FBG1}^6 = 0,08(3)-0,1$	$l_{FBG1}^7 = 0,1-0,11(6)$	$l_{FBG1}^8 = 0,11(6)-0,1(3)$	$l_{FBG1}^9 = 0,1(3)-0,15$

Należy zwrócić uwagę, że wartość N w równaniu (4.7) wynosi 9. Współczynnik sprzężenia σ z równania (4.8) również jest funkcją pozycji wzdłuż osi siatki i może być wyrażony jako:

$$\sigma = \delta + \overline{\sigma} - \frac{1}{2} \frac{d\phi}{dz}, \quad (4.9)$$

przy czym δ jest parametrem rozstrojenia zależnym od długości fali λ równym:

$$\delta = 2\pi n_{eff} (1/\lambda - 1/\lambda_B), \quad (4.10)$$

gdzie długość fali Bragga spełnia warunek Bragga: $\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda$. Wielkość $\overline{\sigma}$ jest również zależna od długości fali oraz amplitudy zmian efektywnego współczynnika załamania światła siatki $\overline{\delta n_{eff}}$ zgodnie z zależnością:

$$\overline{\sigma} = \frac{2\pi}{\lambda} \overline{\delta n_{eff}}. \quad (4.11)$$

Wielkość κ_{ac} z równania (4.8) oznacza składową zmienną współczynnika sprzężenia, który również jest zależny od pozycji na osi z (wzdłuż której zapisana jest siatka, zgodnie z rys. 4.6), przy czym:

$$\kappa(z) = (\pi/\lambda) \delta n(z) g(z), \quad (4.12)$$

gdzie $g(z)$ jest funkcją opisującą apodyzycję [90, 152] siatki, która dla siatek wykorzystywanych w eksperymentach dana jest zależnością:

$$g(z) = e^{-a \left(\frac{z-L/2}{L} \right)^2} \quad \text{dla } z \in [0, L], \quad (4.13)$$

gdzie a jest parametrem szerokości funkcji Gaussa i w przypadku siatki stosowanej w eksperymentach $a = 65$.

Wielkość γ jest zależna od wzajemnej relacji wielkości κ_{ac} i σ w sposób następujący:

$$\begin{cases} \gamma = \sqrt{\kappa_{ac}^2 - \sigma^2} & \kappa_{ac}^2 > \sigma^2 \\ \gamma = i\sqrt{\sigma^2 - \kappa_{ac}^2} & \kappa_{ac}^2 < \sigma^2 \end{cases} \quad (4.14)$$

Z kolei FBG2 można przedstawić za pomocą jednej macierzy przejścia, reprezentującej całą długość FBG2, ponieważ zakładamy, że temperatura wzdłuż całej siatki jest taka sama. Nie ma zatem potrzeby uzależniania funkcji przejścia światła przez siatkę od pozycji wzdłuż osi z. To założenie znacznie upraszcza model matematyczny. Całą macierz przejścia zapiszemy w tym przypadku w postaci zależności:

$$\begin{bmatrix} T_{112} & T_{122} \\ T_{212} & T_{222} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma L_{FBG2}) - \frac{i\sigma \sinh(\gamma L_{FBG2})}{\gamma} & -\frac{i\kappa_{ac} \sinh(\gamma L_{FBG2})}{\gamma} \\ \frac{i\kappa_{ac} \sinh(\gamma L_{FBG2})}{\gamma} & \cosh(\gamma L_{FBG2}) + \frac{i\sigma \sinh(\gamma L_{FBG2})}{\gamma} \end{bmatrix}, \quad (4.15)$$

gdzie L_{FBG2} oznacza całkowitą długość FBG2.

Wyznaczenie wartości wszystkich macierzy $[T^j]$ z równania 4.7, z uwzględnieniem równania (4.8) pozwoli na wyznaczenie macierzy FBG1

$\begin{bmatrix} T_{111} & T_{121} \\ T_{211} & T_{221} \end{bmatrix}$, natomiast równanie (4.15) umożliwia wyznaczenie macierzy

opisującej FBG2 $\begin{bmatrix} T_{112} & T_{122} \\ T_{212} & T_{222} \end{bmatrix}$. Łączną macierz przejście dla dwóch siatek

zapisać można następująco:

$$[T_C] = \begin{bmatrix} T_{11C} & T_{12C} \\ T_{21C} & T_{22C} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{111} & T_{121} \\ T_{211} & T_{221} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{112} & T_{122} \\ T_{212} & T_{222} \end{bmatrix}, \quad (4.16)$$

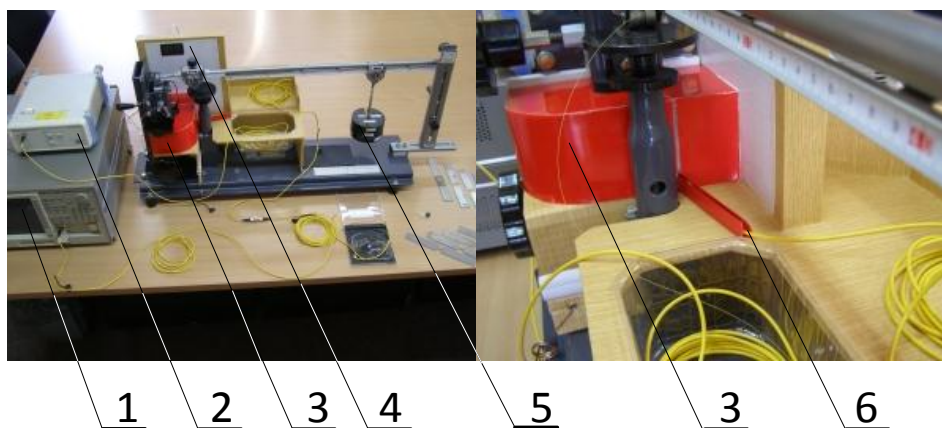
Uwzględniając przedstawione wyżej założenia upraszczające metody macierzy przejścia, cały czujnik opisać można równaniem:

$$\begin{bmatrix} 1 \\ B_{wy1} \end{bmatrix} = [T_C] \times \begin{bmatrix} A_{wy2} \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (4.17)$$

z którego wyznaczany jest, zależny od długości fali, sygnał odbity od czujnika B_{wy1} (widmo odbiciowe) oraz sygnał transmitowany przez czujnik (widmo transmisyjne) A_{wy2} .

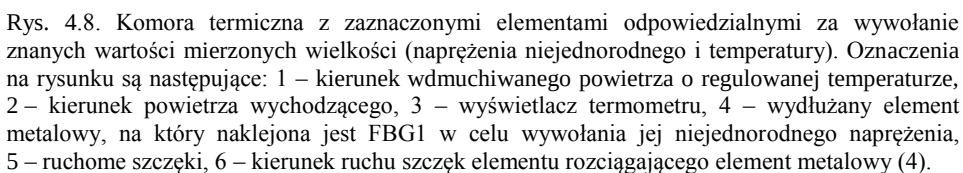
4.5. Implementacja metody pomiaru niejednorodnego naprężenia i temperatury

Aby zweryfikować eksperymentalnie możliwość użycia jednorodnych siatek do jednoczesnego pomiaru dwóch wielkości zaprojektowany został układ pomiarowy. Zbudowane na jego podstawie stanowisko pomiarowe przedstawia rysunek 4.7.



Rys. 4.7. Stanowisko pomiarowe do badań eksperymentalnych metody pomiaru maksymalnej wartości niejednorodnego naprężenia i temperatury. Oznaczenia na rysunku: 1 – analizator widma, 2 – źródło światła białego, 3 – komora termiczna, 4 – odczyt temperatury wewnątrz komory, 5 – ciężar powodujący odkształcenie próbki umieszczonej w komorze, 6 – wyjście z komory termicznej światłowodu z naniesionymi siatkami Bragga

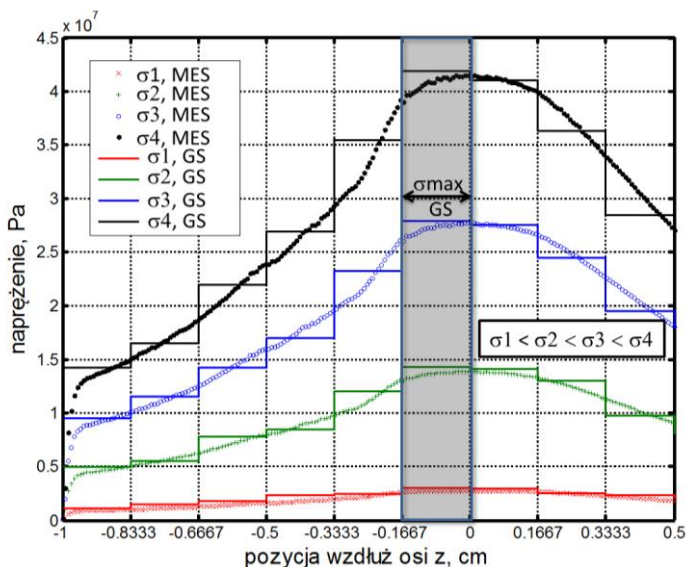
W badaniach eksperymentalnych wykorzystano dwie siatki Bragga o długościach fali Bragga równych 1551,5 nm. Siatki były zapisane na wodorowanym światłowodzie jednomodowym, metodą maski fazowej, apodyzowane zgodnie z profilem Gaussa, opisanym równaniem 4.13. Obydwie siatki posiadały długość $L=15$ mm, przy czym jedna z siatek (FBG1) klejona była do próbki metalowej - umożliwiającej wywołanie niejednorodnego naprężenia na jej długości, a druga (FBG2) - zawieszona swobodnie (nie klejona). Obydwie siatki połączone w układzie szeregowym, umieszczone zostały w komorze termicznej o regulowanej temperaturze powietrza opływającego 2-siatkowy czujnik. Kształt i rozmiary komory zapewniają przepływ powietrza zbliżony do laminarnego co prezentuje rysunek 4.8.



Rys. 4.9. Kształt głowicy pomiarowej czujnika. Oznaczenia: 1 – zakres długości, na którym zamocowana była FBG1 czujnika, 2 – naprężany element metalowy.

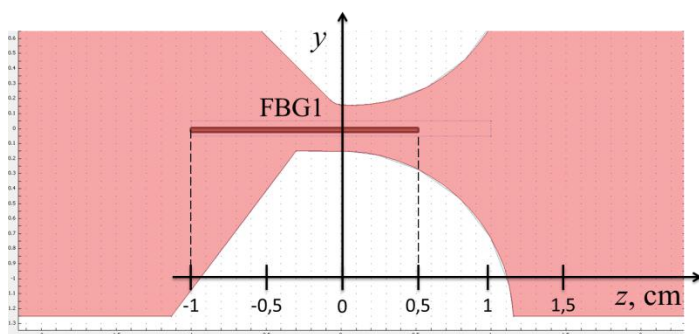
Metoda pomiaru, stanowisko, specjalnie zaprojektowana i przygotowana próbka oraz sekwencja postępowania podczas pomiarów, zostały zorganizowane w taki sposób, aby możliwe było sprawdzenie wielkości niejednorodnej. W tym celu FBG1 została naklejona na próbkę o specjalnym kształcie tworzącym określoną zmienność przekroju poprzecznego w osi z. Eksperyment pozwala dostarczyć informacji niezbędnych do wyznaczenia maksymalnej wartości naprężenia. Na rysunku 4.10 przedstawiono wartości niejednorodnego naprężenia oraz temperatury, wyznaczone przy wykorzystaniu metody

elementów skończonych oraz przy wykorzystaniu zbudowanego do badań czujnika i algorytmu przedstawionego na rysunku 4.4.



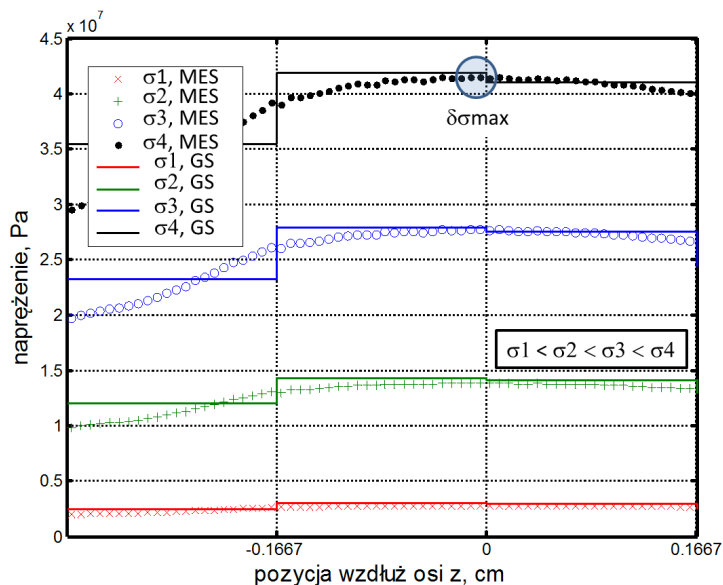
Rys. 4.10. Naprężenie obliczone przy wykorzystaniu metody elementów skończonych (linie złożone z punktów) oraz wyznaczone przy wykorzystaniu przedstawionego na rysunku 4.4 algorytmu. Zaciemnione pole oznacza obszar o maksymalnej wartości naprężenia

Obszar, w którym występuje maksymalna wartość naprężenia wyznaczona przy wykorzystaniu algorytmu gradientu sprzężonego, oznaczony został na rysunku jako $\sigma_{\max}$ GS. Sposób oznaczenia wartości wzdłuż osi z , z zamocowaną FBG1 przedstawiono na rysunku 4.11.



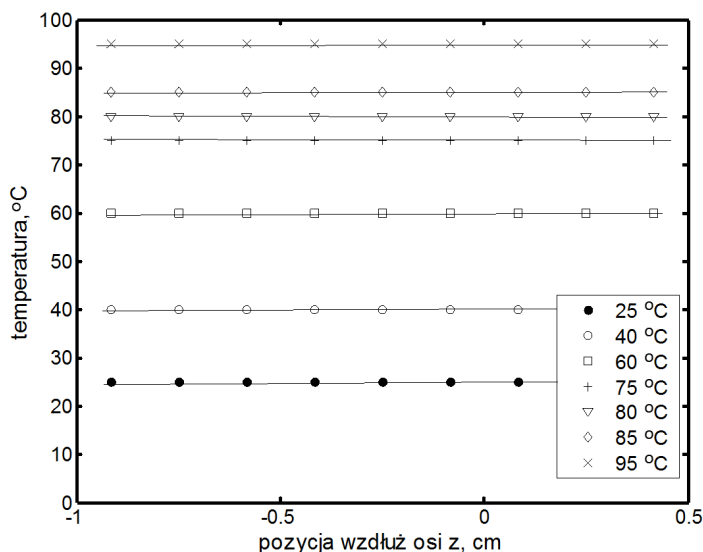
Rys. 4.11. Oznaczenie pozycji na osi z , wzdłuż której zamocowana jest jedna z siatek (FBG1) czujnika

Na uwagę zasługuje fakt, że maksymalne wartości niejednorodnego naprężenia wyznaczone metodą elementów skończonych występują również w zakresie zaznaczonej na rysunku 4.10 pozycji wzdłuż osi z.



Rys. 4.12. Naprężenie obliczone przy wykorzystaniu metody elementów skończonych oraz algorytmu gradientów sprzężonych

Na rysunku 4.12 zlokalizowano miejsce występowania największego błędu wyznaczania maksymalnej wartości naprężenia niejednorodnego, oznaczonego jako $\delta\sigma_{\max}$. (oznaczone kółkiem). Maksymalna wartość względnego błędu wyznaczenia wartości maksymalnej naprężenia niejednorodnego wyniosła 0,24%. Na rysunku 4.13 przedstawiono na wspólnym wykresie, wartości temperatur zmierzonych bezpośrednio podczas eksperymentalnych prób laboratoryjnych (punkty) oraz wyznaczonych przy wykorzystaniu zaproponowanej metody na podstawie pomiaru widma czujnika (linie).



Rys. 4.13. Temperatura wzdłuż osi z czujnika do równoczesnego pomiaru niejednorodnego naprężenia i temperatury. Linie oznaczają wartości zmierzone w komorze termicznej. Punkty oznaczają wartości wyznaczone przy wykorzystaniu metody przedstawionej na rysunku 4.4

Wyniki prób eksperymentalnych potwierdzają, że przy odpowiednim zaprojektowaniu układu czujnika światłowodowego z dwiema FBG, istnieje możliwość wyznaczenia maksymalnej wartości naprężenia niejednorodnego na długości pomiarowej. Przyjąć jednak należy pewne założenia upraszczające. W niniejszej metodzie założono że:

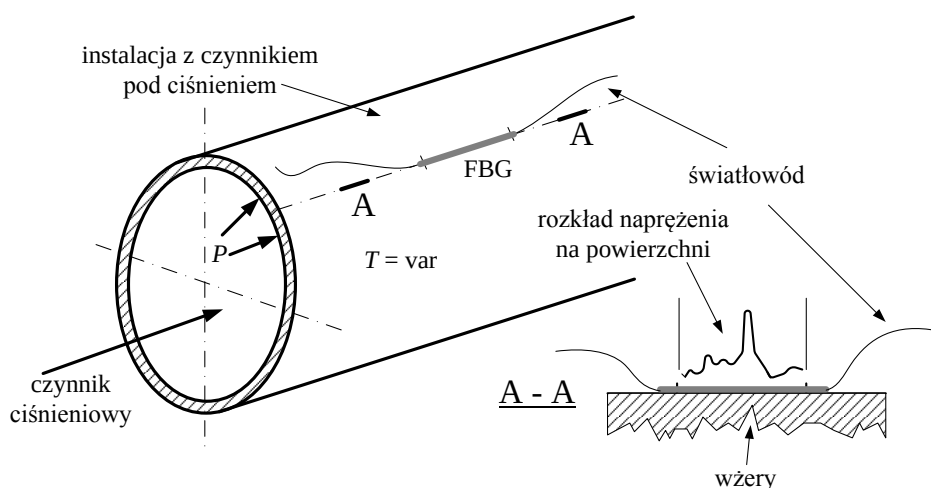
- kształt rozkładu naprężenia jest znany, zmienia się jedynie jego amplituda,
- pomiędzy siatkami czujnika nie występują straty, co determinuje użycie czujnika z dwiema siatkami Bragga, zapisanymi na jednym włóknie. Jest to niemożliwe do spełnienia w rzeczywistości z uwagi na stosowanie różnego rodzaju połączeń pomiędzy siatkami, wywołującymi straty energii pomiędzy siatkami czujnika.

Zastosowanie procedury przedstawionej na rysunku 4.4 wykorzystującej metodę gradientów sprzężonych oraz model czujnika pozwala na wyznaczenie maksymalnej wartości naprężenia niejednorodnego (rys. 4.10 i 4.12) oraz temperatury, przy której dokonywany jest pomiar (rys. 4.13).

5. Czujniki rozkładu naprężenia nieczule na temperaturę.

Badania i pomiary, a zwłaszcza ich wyniki mają zwykle istotny wymiar praktyczny, gdyż są wykonywane w określonym celu. Istnieją różne metody umożliwiające wykonywanie pomiarów, każda z nich generuje określone koszty. W sytuacji gdy pomiary należy dokonywać okresowo (są obligatoryjne, wymagane prawem, normą) i z różnych powodów wymagają dodatkowo precyzji, wiarygodności, łatwości wykonania powtórzeń, upraszczanie metod, małej pracochłonności, czy szybkości otrzymania diagnozy i/lub wyniku.

Rysunek 5.1 prezentuje przykład możliwego do zastosowania układu pomiarowego okresowo diagnozującego ważne z punktu bezpieczeństwa środowiskowego (np. zagrożenie poważną awarią) instalacje.



Rys. 5.1. Przykład miejsca zastosowania czujnika rozkładu naprężenia i temperatury, P – ciśnienie, T – temperatura

Raz zainstalowany układ pomiarowy do wielkości nieelektrycznych np. rozkładu naprężenia i temperatury, zabezpieczony przed uszkodzeniem, mógłby być ponownie aktywowany w dowolnym momencie przez podłączanie elementów mobilnych układu pomiarowego.

Dalsza część pracy ujmuje podstawy tego zagadnienia.

5.1. Sformułowanie równania całkowego Fredholma pierwszego rodzaju przy rekonstrukcji rozkładu naprężenia i temperatury

Rozważając zastosowanie czujnika (opisanego w rozdziale 4) temperatury i maksymalnego naprężenia niejednorodnego w pomiarach rozkładu naprężenia i temperatury, należy odpowiednio wybrać parametry, na podstawie których możliwe będzie jednoznaczne określenie wielkości mierzonej. Rozdział niniejszy prezentuje metodę, w której na podstawie zmierzonej charakterystyki widmowej czujnika wyznacza się jednocześnie temperaturę i rozkład naprężenia. Określenie wartości maksymalnej niejednorodnego naprężenia oraz temperatury jest przykładem wnioskowania o przyczynach na podstawie skutków. Proces ten, zwany zadaniem odwrotnym (ang.: *inverse problem*), może przyjmować mniej lub bardziej formalną formę [164]. Zadanie odwrotne wynika z konieczności ilościowego wyznaczenia rozkładu naprężenia i temperatury (przyczyn) przy znanej postaci widma transmisyjnego układu (skutku) poprzez budowę modelu czujnika. Obecnie rozwijane są metody wyznaczania rozkładu naprężenia przy wykorzystaniu światłowodowych siatek Bragga, nie pozwalające jednak na jednoczesny pomiar temperatury [242, 244].

W niniejszym rozdziale pracy problem odwrotny wykorzystano w celu estymacji parametrów modelu czujnika rozkładu naprężenia i temperatury.

Zadanie sprowadzi się zatem do wyznaczenia funkcji rozkładu naprężenia $\sigma(z)$ wzdłuż osi siatki (oś z) na podstawie zmierzonego widma, w tym przypadku zależności mocy transmitowanej przez siatkę Bragga od długości fali $P_t(\lambda)$.

W celu rozwiązania powyższego zadania należy zbudować model matematyczny czujnika opartego na dwóch siatkach Bragga, zawierający relacje matematyczne, umożliwiające skorelowanie mierzonego bezpośrednio widma transmisyjnego $P_t(\lambda)$ z szukanym rozkładem naprężenia $\sigma(z)$. Model matematyczny pomiaru widma transmisyjnego można sformułować w ogólnej postaci równania całkowego Fredholma pierwszego rodzaju [163]:

$$P_t(\lambda) = K[\sigma(z)] = \int_{z_{\min}}^{z_{\max}} K(\lambda, z) \sigma(z) dz, \quad \lambda_{\min} \leq \lambda \leq \lambda_{\max}, \quad (5.1)$$

gdzie $K(\lambda, z)$ jest funkcją jądra. Jak zasygnalizowano wcześniej, zagadnienie odwrotne polegać będzie na wyznaczeniu funkcji $\sigma(z)$ na podstawie pomiaru zależności $P_t(\lambda)$, przy wykorzystaniu modelu matematycznego oraz pomiaru odkształcenia, za pomocą układu dwóch siatek Bragga.

Problem odwrotny pośrednich pomiarów temperatury i rozkładu naprężenia czujnikami z siatkami Bragga, zdefiniowany jako rozwiązanie równania Fredholma zapisanego w postaci (5.1), polegać będzie na określeniu parametrów siatki w postaci naprężenia, które oznaczono jako σ na podstawie wielkości

mocy P_t , transmitowanej przez czujnik. Wielkość P_t określa dane pomiarowe i jest wyznaczana w pomiarze bezpośrednim przy wykorzystaniu analizatora widma optycznego. Funkcję odwzorowującą naprężenie σ na moc transmisyjną K można zapisać jako:

$$P_t = K(\sigma) = K\sigma. \quad (5.2)$$

W celu rozwiązania tak postawionego problemu konieczne jest zastosowanie metod iteracyjnych oraz dyskretyzacja problemu odwrotnego. W związku z powyższym wielkości P_t oraz σ można potraktować jako wektory, przy czym $\sigma \in R^m$ oraz $P_t \in R^n$, gdzie R^m oraz R^n są przestrzeniami euklidesowymi odpowiednio m i n wymiarowymi. Założono, że σ należy do przestrzeni metrycznej Σ natomiast P_t należy do przestrzeni metrycznej P . Operator K odwzorowuje przestrzeń Σ na P . Wielkość będącą przybliżeniem P_t uzyskaną w wyniku pomiarów oznaczono przez $\tilde{P}_t$. Należy zwrócić uwagę, że $\tilde{P}_t$ nie musi należeć do odwzorowania K . Zatem możliwe jest, że równanie:

$$\tilde{P}_t = K\sigma \quad (5.3)$$

nie będzie miało rozwiązania w całej przestrzeni metrycznej Σ , ($\sigma \in \Sigma$) dla dowolnej wartości $\tilde{P}_t \in P$. Z powodu możliwych błędów pomiaru widma transmisyjnego układu czujnika wykonywanego przy wykorzystaniu OSA, wywołanego jego skończoną rozdzielczością, bardzo prawdopodobne jest uzyskanie takich wartości mocy, które nie będą spełniały równania (5.3). W sytuacji gdy wyznaczenie rozwiązania równania (5.3) nie jest możliwe, należy znaleźć jego rozwiązanie przybliżone. Nawet jeżeli istnieje jednoznaczne rozwiązanie takie, że $\sigma \in \Sigma$ dla dowolnego $\tilde{P}_t \in P$ i może być ono odwzorowane poprzez operator R w postaci:

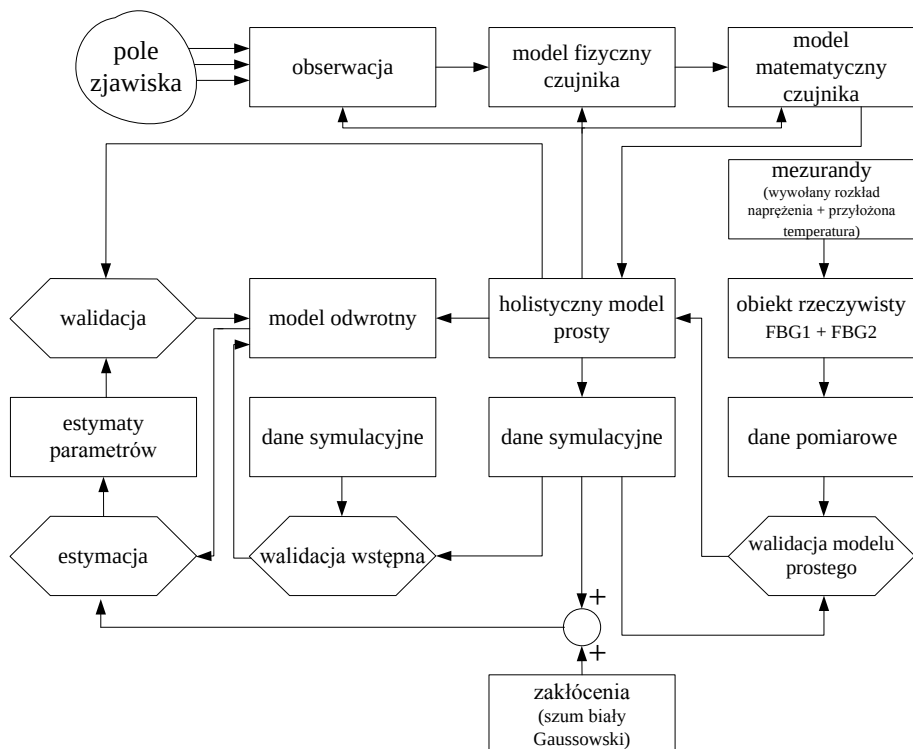
$$\tilde{\sigma} = R\tilde{P}_t, \quad (5.4)$$

to w przypadku odwzorowania wartości mocy zależnej od długości fali na wartości odkształcenia zależnego od pozycji siatki Bragga, bardzo często rozwiązanie to nie jest stabilne w przestrzeni (Σ, P) , przy czym stabilność określenia rozwiązania równania (5.3) rozumiana jest jako ciągłość zależności rozwiązania równania (5.4) od danych pomiarowych $\tilde{P}_t$ [164]. Stabilność rozwiązania problemu odwrotnego przy wyznaczaniu rozkładu naprężenia i temperatury determinuje jego dobre uwarunkowanie. Rozwiązanie równania (5.3) spełnia warunek taki, że $\tilde{\sigma} \in \Sigma$ na podstawie pomiarów mocy transmisyjnej siatki, przy czym $\tilde{P}_t \in P$ - będzie problemem dobrze

postawionym na parze przestrzeni metrycznych (Σ, P) jeżeli spełnione będą 3 zasady Hadamarda [84]. Pierwsza zasada narzuca istnienie takiego rozwiązania, że $\tilde{\sigma} \in \Sigma$ w postaci rozkładu naprężenia i temperatury dla wszystkich wartości zmierzonej mocy transmisyjnej, przy czym $\tilde{P}_t \in P$. Drugi warunek determinuje jednoznaczność tego rozwiązania, trzeci zaś określa konieczność stabilności tego rozwiązania na całej parze przestrzeni metrycznych Σ, P . W całym zakresie zmian widma transmisyjnego oraz związanego z nim rozkładu odkształcenia i temperatury rozwiązanie nie jest jednoznaczne, co świadczy o złym uwarunkowaniu problemu odwrotnego. Rozwiązanie tak postawionego zadania wymaga zatem wykorzystania algorytmów inwersyjnych wykorzystujących wiedzę *a-priori* o postaci wyznaczonej funkcji $\sigma(z)$.

5.2. Budowa i walidacja modelu czujnika rozkładu naprężenia nieczułego na zmiany temperatury

W celu przeprowadzenia walidacji zbudowanego modelu czujnika zaproponowano algorytm, który przedstawiono na rysunku 5.2.



Rys. 5.2. Schemat blokowy procesu tworzenia i walidacji modelu czujnika temperatury i rozkładu naprężenia.

Dane symulacyjne uzyskane z modelu odwrotnego przedstawionego na rysunku 5.2. są porównywane z danymi uzyskanymi z modelu prostego, który z kolei podlega walidacji na podstawie uzyskanych danych pomiarowych, przy znanych wartościach wielkości mierzonych. W celu uzyskania zadanych i znanych wartości wielkości (rozkładu odkształcenia i temperatury) wykorzystać można stanowisko laboratoryjne przedstawione na rysunku 4.7.

5.3. Rozwiązywanie problemu odwrotnego dla pomiaru temperatury i rozkładu naprężenia

Rozwiązanie zadania odwrotnego, polegającego na wyznaczeniu temperatury oraz nieznanego rozkładu naprężenia w N punktach, wymaga wyznaczenia wektora wielkości poszukiwanych, zdefiniowanego jako $\mathbf{x} = [\sigma_1(z), \sigma_2(z), \sigma_3(z), \dots, \sigma_N(z), T]$, gdzie $\sigma_i(z)$ oznacza wartość naprężenia w każdym wyznaczanym punkcie, zależnego od pozycji na osi z , przy czym $i=1, 2, \dots, N$. W przypadku gdy rozkład naprężenia przyjmuje określony kształt należy uwzględnić fakt, że efektywny współczynnik załamania światła jest funkcją pozycji wzdłuż osi z , co można zapisać w postaci:

$$n_{eff}(z) = n_0 + \overline{\delta n}_{eff}(z) \cos \left[\frac{2\pi}{\Lambda(z)} z \right], \quad (5.5)$$

gdzie n_0 jest współczynnikiem załamania światła światłowodu, na którym zapisane są siatki. Okres siatki $\Lambda(z)$, będący również funkcją pozycji wzdłuż osi z można w takim przypadku przybliżyć funkcją kwadratową:

$$\Lambda(z) = \Lambda_0 (1 + d_1 z + d_2 z^2), \quad (5.6)$$

gdzie Λ_0 jest oryginalnym okresem siatki, występującym przy braku zmian temperatury i naprężenia. Zakładając również, że siatka jest apodyzowana, np. profilem Gaussa, $\overline{\delta n}_{eff}(z)$ można zapisać jako:

$$\overline{\delta n}_{eff}(z) = \overline{\delta n}_{eff} \exp \left[\frac{-4 \ln 2 \left(z - \frac{L}{2} \right)^2}{L^2} \right], \quad (5.7)$$

gdzie $0 \leq z \leq L$, L jest długością siatki, $\overline{\delta n}_{eff}$ jest amplitudą zmian efektywnego współczynnika załamania światła w siatce. Przy wykorzystaniu modelu czujnika, dla każdego zestawu parametrów $\lambda, L, \Lambda, d_1, d_2, \delta n_{eff}, \sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \dots, \sigma_N, T$ można wyznaczyć widmo transmisyjne siatki, które oznaczono jako $P_t^{obl}(\lambda)$. Zakładając, że $P_t(\lambda)$ jest widmem siatki uzyskanym podczas pomiaru, parametry siatki można wyznaczyć np. przy wykorzystaniu algorytmu symulowanego wyżarzania poprzez minimalizację normy w przestrzeni L^p [51, 202]:

$$\|f\|_{L^p} = \left(\int_0^\infty P_t(\lambda) - P_t^{obl}(\lambda, L, \Lambda, d_1, d_2, \delta n_{eff}, \sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \dots, \sigma_N, T)^p \right)^{\frac{1}{p}}, \quad (5.8)$$

gdzie funkcjonal $\|f\|_{L^p}$ jest normą w przestrzeni L^p .

W celu minimalizacji funkcjonalu z równania (5.8) należałoby wykorzystać jeden z algorytmów umożliwiających wykonanie procesu rekonstrukcji wartości parametrów siatki, np. opisaną w pracy [202] metodę wyznaczenia fazy na podstawie danych uzyskanych z pomiaru widma amplitudowego czujnika. Można zauważyć, że wartość funkcji $P^{obl}_t(\lambda, L, \Lambda, d_1, d_2, \delta_{neff}, \sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \dots, \sigma_N, T)$ można z kolei obliczyć przy wykorzystaniu modelu czujnika, w którym parametrami będą zmienne funkcji P^{obl}_t . Model czujnika może być skonstruowany zarówno w oparciu o opisaną w rozdziale 4.4 metodę macierzy przejścia, jak również poprzez zastosowanie metody zdejmowania warstw LPA (ang.: *Layer Peeling Algorithm* [40, 266]) oraz metodę Rungego-Kutty [180].

6. Wnioski końcowe

Eksperymentalne charakterystyki przedstawione w rozdziale 4.5 dowodzą, że możliwe jest zastosowanie metody pomiaru z wykorzystaniem czujnika o dwóch siatkach Bragga. Jedna z nich poddana została niejednorodnemu naprężeniu, oraz zmieniającej się temperaturze, druga zaś poddana została działaniu tylko temperatury. Porównanie charakterystyk widmowych takiego czujnika z charakterystykami widmowymi modelu, zgodnie z algorytmem zaproponowanym w rozdziale 4.3, pozwoliło na znalezienie maksymalnej wartości naprężenia niejednorodnego i temperatury (jako parametrów modelu). Wartości te, pozostając w zgodności z naprężeniem obliczonym metodą elementów skończonych, pozwoliły na weryfikację metody pomiarowej, potwierdzając słuszność założeń przy budowie modelu czujnika. Metoda zatem nadaje się do pomiarów maksymalnej wartości naprężenia oraz temperatury, w tym samym czasie i przy wykorzystaniu jednego czujnika.

Wyniki badań przeprowadzonych w ramach rozprawy wskazują na innowacyjny sposób pomiaru wielkości fizycznych z wykorzystaniem czujników optoelektronicznych z zamkniętym torem optycznym.

Do najważniejszych uzyskanych rezultatów niniejszej pracy należą:

- Sformułowanie równania macierzowego dla czujnika z dwiema jednorodnymi siatkami Bragga, wykorzystywanego do równoczesnego pomiaru odkształcenia i temperatury, a po eksperymentalnym pomiarze poszczególnych czułości siatek zamieszczonych w macierzy przetwarzania czujnika wykazanie możliwości określenia zmian temperatury i odkształcenia poprzez involucję macierzy, ze względu na jej dobre uwarunkowanie.
- Dokonanie analizy możliwości zastąpienia czujnika wykorzystującego dwie LPG czujnikiem z siatką Bragga długookresową i jednorodną, wskazując jednocześnie które parametry siatek należy w takiej sytuacji poddać pomiarom.
- Wykazanie, że układy LPGP mogą być wykorzystane do równoczesnych pomiarów odkształcenia i temperatury ze szczególnym wskazaniem takich przypadków, w których wykorzystanie siatek LPG staje się mniej efektywne.
- Wskazanie, że w celu poprawienia rozdzielczości czujnika LPGP konieczne jest użycie maski fazowej o mniejszym okresie i zapis siatki np. na światłowodzie domieszkowanym borem i germanem, ze względu na zwiększoną czułości jego parametrów na odkształcenie.
- Dokonanie analizy wpływu właściwości światłowodu na równania macierzowe oraz wskazanie takich parametrów siatek, które należy poddać pomiarowi w celu jednoczesnego wyznaczenia odkształcenia

względnego i temperatury. W przypadku czujników do równoczesnego pomiaru odkształcenia i temperatury wykorzystujących odpowiedni sposób umiejscowienia siatek Bragga na odpowiednio zaprojektowanych światłowodach można wykazać, że zależność pomiędzy parametrami siatek i całkowitym odkształceniem doznawanym przez parę siatek może być wyrażona w postaci macierzowej. W celu wykazania który parametr siatki lub układu siatek Bragga, w jakim stopniu i od której wielkości mierzonej (temperatury czy odkształcenia) jest uzależniony, wykonano analizę macierzowych równań przetwarzania wybranych układów.

- Opracowanie metody generacji chirpu w części FBG do pomiaru odkształcenia względnego i temperatury. W opracowaniu tym przedstawiono projekt układu czujnika oraz wykazano zasadność doboru parametrów siatki wykorzystywanych następnie do określenia odkształcenia i temperatury. Przedstawiono sposób uzyskania informacji o wielkościach mierzonych z wykorzystaniem wygenerowanego chirpu w FBG. Dokonano analizy odpowiedzi czujnika uzyskanej podczas prób ze zmieniającą się temperaturą i odkształceniem, wyznaczając błędy nieliniowości i czułości poszczególnych parametrów LPG na wymuszenie. Wykazano, że możliwość równoczesnego pomiaru odkształcenia i temperatury przy wykorzystaniu pojedynczej FBG, rozszerza perspektywę zwielokrotnienia tego typu czujnika. Rozwiązanie to pozwala na zastosowanie większej ilości czujników we włóknie w stosunku do czujników opartych na kilku siatkach lub elementach optoelektronicznych zmieniających widmo wraz ze zmianą wielkości mierzonej.
- Przeanalizowanie możliwości wykorzystania właściwości propagacyjnych modu rdzeniowego i modów płaszczowych światłowodu do równoczesnego pomiaru wielkości fizycznych w warunkach zmiennej temperatury.
- Wskazanie możliwości analizy uwarunkowań mechanicznych dla pomiarów siły i temperatury czujnikami optoelektronicznymi ze światłowodowymi siatkami Bragga, rozpatrując wybrane układy statycznie wyznaczalne. Przedstawiono autorskie rozwiązania wybranych układów czujników siły i temperatury ze światłowodowymi siatkami Bragga, analizując poszczególne równania przetwarzania w celu wykazania możliwości zastosowania tych układów do niezależnego pomiaru pośredniego wielkości badanych.
- Opracowanie i potwierdzenie założeń metody równoczesnego pomiaru temperatury i dwóch składowych siły czujnikami ze

światłowodowymi siatkami Bragga. Wykazano zgodność obliczeń teoretycznych z pomiarami. Wskazano również zalety metody w porównaniu do istniejących rozwiązań czujników siły i temperatury. Na podstawie kąta nachylenia prostej regresji przy pomiarach ze zmieniającą się temperaturą i wartościami sił, wyznaczono czułości badanego układu na temperaturę i poszczególne składowe siły. Wykorzystywany w metodzie czujnik do równoczesnego pomiaru siły i temperatury, składający się z dwóch siatek Bragga oraz wspornika można potraktować jako moduł, który można rozbudowywać i dopasowywać do potrzeb. W pracy wykazano możliwość jego zwielokrotnienia. Brak symetrii widm siatek czujnika, a także brak symetrii w widmach tych samych siatek poddawanych siłom o różnych kierunkach, stwarza możliwość zastosowania analizy odwrotnej w celu określenia sił działających jednocześnie. W pracy wykazano, że opisaną metodę pomiaru pośredniego siły i temperatury można również rozszerzyć na przypadki, w których wspornik i siatki ulegają np. skręcaniu.

- Zaproponowanie metody pomiaru temperatury i maksymalnej wartości naprężenia o niejednorodnym rozkładzie liniowym, przedstawiając założenia i ideę takiej metody.
- Opracowanie algorytmu wyznaczania niejednorodnego naprężenia w warunkach zmiennej temperatury, wykorzystujący zbudowany w tym celu model czujnika oraz metodę gradientów sprzężonych. Do budowy modelu czujnika zastosowano metodę macierzy przejścia. Badania eksperymentalne wykazały możliwość zastosowania metody do pomiarów tzw. równoczesnych – temperatury i niejednorodnego naprężenia. Maksymalną wartość błędu względnego, wyznaczenia wartości maksymalnej naprężenia niejednorodnego, osiągnięto na poziomie 0,24%.
- Sformułowanie równania całkowitego Fredholma pierwszego rodzaju do rekonstrukcji temperatury i rozkładu naprężenia. Zaproponowano tutaj autorską metodę wyznaczania zmiennego rozkładu naprężenia w warunkach zmieniającej się temperatury otoczenia. Zademonstrowano algorytm weryfikacji modelu czujnika rozkładu naprężenia nieczułego na zmiany temperatury, a także określono sposób rozwiązania postawionego problemu odwrotnego dla pomiaru temperatury i rozkładu naprężenia.

Przedstawione w niniejszej pracy wyniki analiz i badań nie wyczerpują wszystkich problemów związanych z wyznaczaniem wielkości fizycznych jak m.in. odkształcenie względne, siła, maksymalne naprężenie niejednorodne czy rozkład naprężenia przy zmiennej temperaturze otoczenia. W szczególności doskonalenia wymagają procedury obliczeniowe, pozwalające na budowę

i weryfikację modelu odwrotnego, przy wyznaczaniu rozkładu odkształcenia w warunkach zmieniającej się temperatury. Obecnie takie przypadki mogą być analizowane i rozwiązywane przy założeniu określonego kształtu rozkładu naprężenia i braku informacji o temperaturze. Istotne mogą być tu próby określenia niektórych parametrów siatki czujnika, w celu określenia rozkładu wielkości powodującej zmianę rozkładu liniowego tego parametru. Najczęściej kształt rozkładu odkształcenia przybliżany jest znanym rozkładem np. Gaussa, a stosowane algorytmy wyznaczają jedynie jego parametry. Określenie rozkładu naprężenia czujnikami optoelektronicznymi wykorzystującymi siatki Bragga przy zmiennej temperaturze, pozostaje nadal kłopotliwe ze względu na wielowymiarowość problemu. Pomiarom objęte są bowiem najczęściej charakterystyki transmisyjne i odbiciowe czujnika, przy czym pomiar taki określa wartość mocy dla kilkuset długości fali w rejonie fali rezonansowych czujnika w strefie pomiaru.

Prezentowane w pracy zależności wpływu temperatury na wartość mierzonych wielkości nieelektrycznych, za pomocą układów światłowodowych, stanowią informację dodatkową o temperaturze i jej zmianach. Istnieje możliwość wykorzystania informacji o temperaturze uzyskiwanej podczas pomiaru, bowiem zjawisko przesunięcia charakterystyki widmowej zachodzi według stałej prawidłowości zależnej od typu siatki w układzie czujnikowym, co przy zastosowaniu np. dodatkowej skali może posłużyć do otrzymywania dwóch informacji pomiarowych w jednym procesie pomiaru.

Literatura

- [1] Abi Kaed Bey S.K., Lam C.C.C., Sun T., Grattan K.T.V., *Chloride ion optical sensing using a long period grating pair*, "Sensors and Actuators A", 2008 vol. 141 s. 390-395.
- [2] Abi Kaed Bey S.K., Sun T., Grattan K.T.V., *Sensitivity enhancement of long period gratings for temperature measurement using the long period grating pair technique*, "Sensors and Actuators A", 2008 vol. 141, s. 314-320.
- [3] Abi Kaed Bey S.K., Sun T., Grattan K.T.V., *Simultaneous measurement of temperature and strain with long period grating pairs using low resolution detection*, "Sensors and Actuators A", 2008 vol. 144, s. 83-89.
- [4] Abi Kaed Bey S.K., Sun T., Grattan K.T.V., *Optimization of a long-period grating-based Mach-Zehnder interferometer for temperature measurement*, "Optics Communications", 2007 vol. 272, s. 15-21.
- [5] Ansari F., *State-of-the-art in the Applications of Fiber-optic Sensors to Cementitious Composites*, "Cement and Concrete Composites", 1997 vol. 19, s. 3-19.
- [6] Anscombe F.J., *Graphs in Statistical Analysis*, "The American Statistician", 1973 vol. 27, no. 1, s. 17-21.
- [7] Araujo F. M., Ferreira L. A., Santos J., Farahi L.F., *Temperature and strain insensitive bending measurements with D-type fibre Bragg gratings*, "Meas. Sci. Technol". 2001 vol. 12, s. 829-833.
- [8] Armijo L., *Minimization of functions having Lipschitz continuous first partial derivatives*, "Pacific Journal of Mathematics", 1966 vol 16, s. 1-3.
- [9] Ayoama H., Tanaka K., Watanabe H., Takeda N., *Health-monitoring technologies for alumina-fiber-reinforced plastics*, "Composite Structures", 2001 vol. 52, s. 523-531.
- [10] Baptista J.M., Santos S.F., Rego G., Frazao O., Santos J.L., *Micro-displacement or bending measurement using a long-period fibre grating in a self-referenced fibre optic intensity sensor*, "Optics Communications", 2006 vol. 260, s. 8-11.
- [11] Barnes J.A., Brown R.S., Cheung A.H., Dreher M.A., Mackey G., Looock H.-P., *Chemical sensing using a polymer coated long-period fiber grating interrogated by ring-down spectroscopy*, "Sensors and Actuators B", vol. 148, s. 221-226.
- [12] Berger N.K., Levit B., Atkins S., Fischer B., *Repetition-rate multiplication of optical pulses using uniform fiber Bragg gratings*, "Optics Communications", 2003 vol. 221, s. 331-335.
- [13] G. Berruti M. Consales M. Giordano L. Sansone P. Petagna S. Buontempo G. Breglio A. Cusano, *Radiation Hard Humidity Sensors for High Energy Physics Applications using Polyimide-coated Fiber Bragg Gratings*

- Sensors, "Sensors and Actuators B", 2012, Accepted Manuscript 8-10-2012, in press.
- [14] Bhatia V., *Applications of long-period gratings to single and multi-parameter sensing*, "OPTICS EXPRESS", 1999 vol. 4, no. 11, s. 457-466.
 - [15] Bhatia V., Burford M.K., Murphy K.A., Vengsarkar A. M., *Long-period fiber grating sensors*, OFC '96 "Technical Digest", 1996 s. 265-266.
 - [16] Bin M., Jian X., *Experimental Research of Coupling Fiber-optic Sensor for Vibration Measurement*, "Photonics and Optoelectronic (SOPO)", 2010, s. 1-4.
 - [17] Bo D., Qida Z., Feng L., Tuan G., Lifang X., Shuhong L., Hong G., *Liquid-level sensor with a high-birefringence-fiber loop mirror*, "Applied Optics", 2006 vol 45, Issue 30, s. 7767-7771.
 - [18] Bohnert K., Gabus P., Kostovic J., Brandle H., *Optical fiber sensors for the electric power industry*, "Optics and Lasers in Engineering", 2005 vol. 43, s. 511-526.
 - [19] Breglio G., Cusano A., Irace A., Cutolo A., *Fiber optic sensor arrays: a new method to improve multiplexing capability with a low complexity approach*, "Sensors and Actuators B", 2004 vol. 100, s. 147-150.
 - [20] Campbell M., Zheng G., Holmes-Smith A.S., Wallace P., *A frequency-modulated continuous wave birefringent fibre-optic strain sensor based on a Sagnac ring configuration*, "Meas. Sci. Technol.", 1999 vol. 10, s. 218-224.
 - [21] Carvalho J.P., Anuszkiewicz A., Statkiewicz-Barabach G., Baptista J.M., Frazão O., Mergo P., Santos J.L., Urbanczyk W., *Long period gratings and rocking filters written with a CO₂ laser in highly-birefringent boron-doped photonic crystal fibers for sensing applications*, "Optics Communications", 2012 vol. 285, s. 264-268.
 - [22] Caucheteur C., Chen C., Albert J., Mégret P., *Use of weakly tilted fiber Bragg gratings for strain sensing purposes*, "Proc. of SPIE", 2008 vol. 7003, s. 700307-1-700307-12.
 - [23] Caucheteur C., Lhomme F., Chah K., Blondel M., Megret P., *Simultaneous strain and temperature sensor based on the numerical reconstruction of polarization maintaining fiber Bragg gratings*, "Optics and Lasers in Engineering", 2006 vol. 44, s. 411-422.
 - [24] Caucheteur C., Mégret P., *Demodulation Technique for Weakly Tilted Fiber Bragg Grating Refractometer*, "IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS", 2005 vol. 17, no. 12, s. 2703-2705.
 - [25] Cavaleiro P.M., Araujo F.M., Ferreira L.A., Santos J.L., Farahi F., *Simultaneous Measurement of Strain and Temperature Using Bragg Gratings Written in Germanosilicate and Boron-Codoped Germanosilicate Fibers*, "IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS", 1999 vol. 11, no. 12, s. 1635-1637.

- [26] Cavallo A., De Maria G., Natale C., Pirozzi S., *Optoelectronic joint angular sensor for robotic fingers*, "Sensors and Actuators A", 2009 vol. 152, s. 203-210.
- [27] Chan T.H.T., Yu L., Tam H.Y., Ni Y.Q., Liu S.Y., Chung W.H., Cheng L.K., *Fiber Bragg grating sensors for structural health monitoring of Tsing Ma bridge: Background and experimental observation*, "Engineering Structures", 2006 vol. 28, s. 648-659.
- [28] Chang Y.M., Cheng C.-C., Lo Yu-Lung, *Thermal Compensation for a Chirp Fiber Bragg Grating Bonded Substrate*, "IEEE TRANSACTIONS ON ADVANCED PACKAGING", 2004 vol. 27, no. 1, s. 188-193.
- [29] Chehura E., James S.W., Tatam R.P., *Temperature and strain discrimination using a single tilted fibre Bragg grating*, "Optics Communications", 2007 vol. 275, s. 344-347.
- [30] Chen D., Liu W., Jiang M., He S., *Strain Sensor System Based on a High Finesse Fiber Bragg Grating Fabry-Perot Cavity*, "Optical Society of America AOE" 2008, s. 1-3.
- [31] Chen S., Tong Z., Zhao Q., Liu Z., Dong X., *A smart bending sensor with a novel temperature- and strain-insensitive long-period grating*, "Sensors and Actuators A", 2004 vol. 116, s. 103-106.
- [32] Chen J.-H., Huang X.-G., He W.-X., Tao J., *A parallel-multipoint fiber-optic temperature sensor based on Fresnel reflection*, "Optics & Laser Technology", 2011 vol. 43, s. 1424-1427.
- [33] Chen Y.C., Hsieh C.C., Lin C.C., *Strain measurement for composite tubes using embedded, fiber Bragg grating sensor*, "Sensors and Actuators A", 2011 vol. 167, s. 63-69.
- [34] Cheng H.-C., Huang J.-F., Lo Y.-L., *Simultaneous strain and temperature distribution sensing using two fiber Bragg grating pairs and a genetic algorithm*, "Optical Fiber Technology", 2006 vol. 12, s. 340-349.
- [35] Chmielewska E., Urbańczyk W., Bock W.J., *Sensitivity of Bragg grating imprinted in a three-mode elliptical core fiber to temperature and to strain*, "Optik" 2003 vol. 114, no. 9, s. 407-412.
- [36] Chong J.H., Shum P., Haryono H., Yohana A., Rao M.K., Lu C., Zhu Y., *Measurements of refractive index sensitivity using long-period grating refractometer*, "Optics Communications", 2004 vol. 229, s. 65-69.
- [37] Chung W., Kang D., *Full-scale test of a concrete box girder using FBG sensing system*, "Engineering Structures", 2008 vol. 30, s. 643-652.
- [38] Cohen J., *Statistical power analysis for the behavioral sciences*, Lawrence Erlbaum Associates, Inc., Publishers, 1988.
- [39] Colpo F., Humbert L., Botsis J., *Characterisation of residual stresses in a single fibre composite with FBG sensor*, "Composites Science and Technology", 2007 vol. 67, s. 1830-1841.

- [40] Colpo F., Humbert L., Giaccari P., Botsis J., *Characterization of residual strains in an epoxy block using an embedded FBG sensor and the OLCR technique*, "Composites: Part A", 2006 vol. 37, s. 652-661.
- [41] Consales M., Buosciolo A., Cutolo A., Breglio G., Irace A., Buontempo S., Petagna P., Giordano M., Cusano A., *Fiber optic humidity sensors for high-energy physics applications at CERN*, "Sensors and Actuators B", 2011 vol. 159, s. 66-74.
- [42] Costa B.J.A., Figueiras J.A., *Evaluation of a strain monitoring system for existing steel railway bridges*, "Journal of Constructional Steel Research", 2012 vol. 72, s. 179-191.
- [43] Culshaw B., Dakin J., *Optical Fiber Sensors: Applications, Analysis, and Future Trends*, Vol. 4, Boston, Artech House Books, 1996.
- [44] Dai Y., Liu Y., Leng J., Deng G., Asundi A., *A novel time-division multiplexing fiber Bragg grating sensor interrogator for structural health monitoring*, "Optics and Lasers in Engineering", 2009 vol. 47, s. 1028-1033.
- [45] Davino D., Visone C., Ambrosino C., Campopiano S., Cusano A., Cutolo A., *Compensation of hysteresis in magnetic field sensors employing Fiber Bragg Grating and magneto-elastic materials*, "Sensors and Actuators A", 2008 vol. 147, s. 127-136.
- [46] Dianov E.M., Vasiliev S.A., Kurkov A.S., Medvedkov O.I., Protopopov V.N., *In-fiber Mach-Zehnder interferometer based on a pair of long-period gratings*, "Optical Communication, 1996. ECOC '96. 22nd European Conference" 1996 vol 1, s. 65-68.
- [47] Diminstein O., Gorbato N., Tur M., *Dispersion-based differential wavelength measurements for Bragg grating sensors*, "ELECTRONICS LETTERS", 2001 vol. 37, no. 7, s. 12-14.
- [48] Ding J.-F., Zhang A.P., Shao L.-Y., Yan J.-H., He S., *Fiber-Taper Seeded Long-Period Grating Pair as a Highly Sensitive Refractive-Index Sensor*, "IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS", 2005 vol. 17, no. 6, s. 1247-1249.
- [49] Dong B., Zhao Q., Liu L., Huang G., Jin L., Zhou J., Liao T., *Tunable Chirped Fiber Bragg Grating Filter Based on Special Strain Function Modulation and Its Application in Fiber Sensor*, "JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY", 2008 vol. 26, no. 14, s. 2286- 2290.
- [50] Dong B., Zhao Q., Zhao L., Jin L., Miao Y., Liao T., Zeng X., *Simultaneous measurement of temperature and force based on a special-strain-function-chirped FBG*, "Sensors and Actuators A", 2008 vol. 147, s. 169-172.
- [51] Dong P., Azana J., Kirk A.G., *Synthesis of fiber Bragg grating parameters from reflectivity by means of a simulated annealing algorithm*, "Optics Communications", 2003 vol. 228, s. 303-308.

- [52] Dong X., Liu Y., Liu Z., Dong X., *Simultaneous displacement and temperature measurement with cantilever-based fiber Bragg grating sensor*, "Optics Communications", 2001 vol. 192, s. 213-217.
- [53] Dong X., Liu Y., Shao L.-Y., Kang J., Zhao C.-L., *Temperature-Independent Fiber Bending Sensor Based on a Superimposed Grating*, "IEEE SENSORS JOURNAL", 2011 vol. 11, no. 11, s. 3019-3022.
- [54] Dong X., Yang X., Zhao C.-L., Ding L., Shum P., Ngo N. Q., *Novel temperature-insensitive displacement sensor using a fiber Bragg grating*, "Smart Mater. Struct.", 2005 vol. 14, no. 2, s. N7-N10.
- [55] Douay M., Fertein E., Xie W.X., Bernage P., Niay P., Bayon J. F., Georges T., *Thermal Hysteresis of Bragg Wavelengths of Intra-core Fiber Gratings*, "IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS", 1993 vol. 5, no. 11, s. 1331-1334.
- [56] Du W., Tao X., Tam H., *Temperature Independent Strain Measurement with a Fiber Grating Tapered Cavity Sensor*, "IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS", 1999 vol. 11, no. 5, s. 596-598.
- [57] Enriquez D.A.C., da Cruz A.R., Maria Therez M., Giraldi R., *Hybrid FBG-LPG sensor for surrounding refractive index and temperature simultaneous discrimination*, "Optics & Laser Technology", 2012 vol. 44, s. 981-986.
- [58] Erdogan T., Sipe J.E., *Tilted fiber phase gratings*, "Journal of the Optical Society of America A", 1996 vol. 13, issue 2, s. 296-313.
- [59] Falciai R., Mignani A.G., Vannini A., *Long period gratings as solution concentration sensors*, "Sensors and Actuators B", 2001 vol. 74, s. 74-77.
- [60] Farahi F., Webb D.J., Jones J.D.C., Jackson D.A., *Simultaneous Measurement of Temperature and Strain: Cross-Sensitivity Considerations*, "Journal of Lightwave Technology", 1990 vol. 8, no. 2, s. 138-142.
- [61] Feng S., Xu O., Lu S., Mao X., Ning T., Jian S., *Switchable dual-wavelength erbium-doped fiber-ring laser based on one polarization maintaining fiber Bragg grating in a Sagnac loop interferometer*, "Optics & Laser Technology", 2009 vol. 41, s. 264-267.
- [62] Fernandez-Valdivielso C., Matoas I.R., Arregui F.J., *Simultaneous measurement of strain and temperature using a fiber Bragg grating and a thermochromic material*, "Sensors and Actuators A", 2002 vol. 101, s. 107-116.
- [63] Fernandez-Valdivielso C., Matoas I.R., Arregui F.J., *Simultaneous Measurement of Strain and Temperature using a Fiber Bragg Grating and a Thermochromic Material*, "Optical Fiber Sensors Conference Technical Digest, 2002. OFS 2002, 15th", 2002 vol. 1, s. 203-206.
- [64] Ferreira L. A., Ribeiro A.B.L., Santos J.L., Farahi F., *Simultaneous displacement and temperature sensing using a white light interrogated*

- low finesse cavity in line with a fiber Bragg grating, "Smart Mater. Struct.", 1998 vol. 7, s. 189-198.
- [65] Ferreira L.A., Ribeiro A.B.L., Santos J.L., Farahi F., *Simultaneous Measurement of Displacement and Temperature Using a Low Finesse Cavity and a Fiber Bragg Grating*, "IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS", 1996 vol. 8, no. 11, s. 1519-1521.
 - [66] Frazão O., Marque L., Marques J.M., Baptista J.M., Santos J.L., *Simple sensing head geometry using fibre Bragg gratings for strain-temperature discrimination*, "Optics Communications", 2007 vol. 279, s. 68-71.
 - [67] Frazão O., Marques L.M., Santos S., Baptista J.M., Santos J.L., *Simultaneous Measurement for Strain and Temperature Based on a Long-Period Grating Combined With a High-Birefringence Fiber Loop Mirror*, "IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS", 2006 vol. 18, no. 22, s. 2407-2409.
 - [68] Frazão O., Romeroa R., Araujo F.M., Ferreira L.A., Santos J.L., *Strain-temperature discrimination using a step spectrum profile fibre Bragg grating arrangement*, "Sensors and Actuators A", 2005 vol. 120, s. 490-493.
 - [69] Frazão O., Santos J.L., Baptista J.M., *Strain and Temperature Discrimination Using Concatenated High-Birefringence Fiber Loop Mirrors*, "IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS", 2007 vol. 19, no. 16, s. 1260-1262.
 - [70] Frieden J., Cugnoni J., Botsis J., Gmür T., *Low energy impact damage monitoring of composites using dynamic strain signals from FBG sensors – Part I: Impact detection and localization*, "Composite Structures", 2012 vol. 94, s. 438-445.
 - [71] Frieden J., Cugnoni J., Botsis J., Gmür T., Coric D., *High-speed internal strain measurements in composite structures under dynamic load using embedded FBG sensors*, "Composite Structures", 2010 vol. 92, s. 1905-1912.
 - [72] Fu H., Shu X., Zhang A., Liu W., Zhang L., He S., Bennion I., *Implementation and Characterization of Liquid-Level Sensor Based on a Long-Period Fiber Grating Mach-Zehnder Interferometer*, "IEEE SENSORS JOURNAL", 2011 vol. 11, no. 11, s. 2878-2882.
 - [73] Furstenau N., Schmidt M., Horack H., Goetze W., Schmidt W., *Extrinsic Fabry-Perot interferometer vibration and acoustic sensor systems for airport ground traffic monitoring*, "IEE Proc –Optoelectron", 1997 vol. 144, no 3, s. 134-144.
 - [74] Gangopadhyay T.K., Majumder M., Chakraborty A.K., Dikshit A.K., Bhattacharya D.K., *Fibre Bragg grating strain sensor and study of its packaging material for use in critical analysis on steel structure*, "Sensors and Actuators A", 2009 vol. 150, s. 78-86.

- [75] Gordon R.P., Lautz L.K., Briggs M.A., McKenzie J.M., *Automated calculation of vertical pore-water flux from field temperature time series using the VFLUX method and computer program*, "Journal of Hydrology" 2012 vol. 420–421, s. 142-158.
- [76] Grattan K.T.V., Sun. T., *Fiber optic sensor technology: an overview*, "Sensors and Actuators" 2000 vol. 82, s. 40-61.
- [77] Guan B.-O., Tam H.-Y., Chan H.L.W., Choy C.-L., Demokan M.S., *Discrimination between strain and temperature with a single fiber Bragg grating*, "MICROWAVE AND OPTICAL TECHNOLOGY LETTERS", 2002 vol. 33, no. 3, s. 200-202.
- [78] Guan B.-O., Tam H.-Y., Tao X.-M., Dong X.-Y., *Simultaneous Strain and Temperature Measurement Using a Superstructure Fiber Bragg Grating*, "IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS", 2000 vol. 12, no. 6, s. 675-677.
- [79] Guan Z.-G., Chen D., He S., *Coherence Multiplexing of Distributed Sensors Based on Pairs of Fiber Bragg Gratings of Low Reflectivity*, "JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY", 2007 vol. 25, no. 8, s. 2143-2148.
- [80] Guo T., Yang J., Zhao Q.D., Huang G.L., Xue L.F., Zhang H., Dong X.Y., *Temperature-immune and intensity-referenced pressure sensor based on strain-induced quadratic-chirped fibre Bragg grating*, "ELECTRONICS LETTERS", 2007 vol. 43, no. 2, s. 1-2.
- [81] Guo T., Zhang H., Liu B., Li G., Zhao Q., Dong X., *Gaussian-Strain-Chirped Fiber Bragg Grating Couple for Temperature-Insensitive and Intensity-Referenced Force Measurement*, "IEEE SENSORS JOURNAL", 2007 vol. 7, no. 10, s. 1390-1394.
- [82] Gwandu B.A.L., Shu X.W., Liu Y., Zhang W., Zhang L., Bennion I., *Simultaneous measurement of strain and curvature using superstructure fibre Bragg gratings*, "Sensors and Actuators A" 2002 vol. 96, s. 133-139.
- [83] Gwandu B.A.L., Zhang W., *Tailoring the temperature responsivity of fibre Bragg gratings*, "Sensors, 2004. Proceedings of IEEE", 2004 vol. 3, s. 1430-1433.
- [84] Hadamard J., *Sur les problemes aux dérivées partielles et leur signification physique*, "Princeton University Bulletin", 1902 vol. 13, s. 49-52.
- [85] Hao J.Z., Ong L.C., Gong Y.D., Cai Z.H., Ng J.H., Varghese P., A *Temperature-independent Lateral Force Sensor using a Pair of FBGs*, "Proceedings of Asia-Pacific Microwave Conference", 2007, s. 1-5.
- [86] Hao J., Cai Z., Ng J.H., Gong Y., Maniyeri J., Foo S. F., Yee M.-L., A *Simple Passive Temperature-Independent FBG Load Sensor*, "Lasers and Electro-Optics Society, LEOS", 2007, s. 232-233.
- [87] Haramoni N., Paterno A.S., Goedtel A., Soares G.R., Silva J.C.C., Kalinowski H.J., *Hybrid Wavelength-Time-Domain Interrogation System*

- for Multiplexed Fiber Bragg Sensors Using a Strain-Tuned Erbium-Doped Fiber Laser, "IEEE SENSORS JOURNAL", 2008 vol. 8, no. 7, s. 1061-1066.
- [88] Hassan M.R.A., Tamchek N., Ismail M.A., Izam T.F., Abas A.F., Johar R.M., Chong S.S., Mahamd Adikan F.R., *Effect of Epoxy Bonding on Strain Sensitivity and Spectral Behavior of Reflected Bragg Wavelength*, "Photonics Global Conference (PGC)" 2010, s. 1-4.
 - [89] Hestenes M.R., Stiefel E., *Methods of Conjugate Gradients for Solving Linear Systems*, "Journal of Research of The National Bureau of Standards", 1952 vol. 49, no. 6, s. 409-436.
 - [90] Hill K.O., *Aperiodic Distributed-Parameter Waveguides for Integrated Optics*, "Applied Optics" 1974 vol. 13, s. 1853-1856.
 - [91] Hochreiner H., Cada M., Wentzell P.D., *Modeling the Response of a Long-Period Fiber Grating to Ambient Refractive Index Change in Chemical Sensing Applications*, "JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY", 2008 vol. 26, no. 13, s. 1986-1992.
 - [92] Hongbo Z., Liang D., Zeng J., *Dynamic strain measurement using two wavelength-matched fiber Bragg grating sensors interrogated by cascaded long-period fiber grating*, "Optics and Lasers in Engineering", 2012 vol. 50, s. 199-203.
 - [93] Hotra Z., Mykytyuk Z., Sushynskyy O., Hotra O., **Kisala P.**, *Systemy sensorowe z optycznym kanałem przesyłu informacji*, „Przegląd Elektrotechniczny”, 2010 vol 10, s. 21-23.
 - [94] Iadicicco A., Cusano A., Campopiano S., Cutolo A., Giordano M., *Thinned Fiber Bragg Gratings as Refractive Index Sensors*, "IEEE SENSORS JOURNAL", Vol. 5, No. 6 (2005) s. 1288-1295.
 - [95] James S.W., Dockney M.L., Tatam R.P., *Simultaneous independent temperature and strain measurement using in-fibre Bragg grating sensors*, "ELECTRONICS LETTERS", 1996 vol. 32, no. 12, s. 1133-1134.
 - [96] Jang B.-W., Lee J.-R., Park S.-O., Kim C.-G., Kim J.-S., *A health management algorithm for composite train carbody based on FEM/FBG hybrid method*, "Composite Structures", 2010 vol. 92, s. 1019-1026.
 - [97] Jiang Q, Hu D., Yang M., *Simultaneous measurement of liquid level and surrounding refractive index using tilted fiber Bragg grating*, "Sensors and Actuators A", 2011 vol. 170, s. 62-65.
 - [98] Jin Y.X., Chan C.C., Dong X.Y., Zhang Y.F., *Temperature-independent bending sensor with tilted fiber Bragg grating interacting with multimode fiber*, "Optics Communications", 2009 vol. 282, s. 3905-3907.
 - [99] Junjie B., Jianqing L., Ying W., Jianfeng W., *Composite Tactile Sensor Array Using Fiber Bragg Grating Sensors and Measuring System*, "The 9th International Conference on Optical Communications and Networks ICOCN2010", 2010 s. 77-80.

- [100] Kaczmarek C., Kaczmarek T., Kaczmarek Z., *Fiber Bragg Grating Differential Strain Sensor*, "CADSM'2003 Lviv-Slasko", 2003, s. 172-174.
- [101] Kaddu S.C., Booth D.J., Garchev D.D., Collins S.F., *Intrinsic fibre Fabry-Perot sensors based on co-located Bragg gratings*, "Optics Communications" 1997 vol. 142, s. 189-192.
- [102] Kang D., Chung W., *Integrated monitoring scheme for a maglev guideway using multiplexed FBG sensor arrays*, "NDT&E International", 2009 vol. 42, s. 260-266.
- [103] Kang J., Dong X., Zhao C., Qian W., Li M., *Simultaneous measurement of strain and temperature with a long-period fiber grating inscribed Sagnac interferometer*, "Optics Communications", 2011 vol. 284, s. 2145-2148.
- [104] Kang S.C., Kim S.Y., Lee S.B., Kwon S.W., Choi S.S., Lee B., *Temperature-independent demodulation technique for fiber Bragg grating strain sensors using a tilted fiber Bragg grating*, "CLEO'98" 1998, s. 329-330.
- [105] Kang S.C., Kim S.Y., Lee S.B., Kwon S.W., Choi S.S., Lee B., *Temperature-Independent Strain Sensor System Using a Tilted Fiber Bragg Grating Demodulator*, "IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS", 1998 vol. 10, no. 10, s. 1461-1463.
- [106] Kerrouche A., Boyle W.J.O., Sun T., Grattan K.T.V., Schmidt J.W., Täljsten B., *Enhanced FBG sensor-based system performance assessment for monitoring strain along a prestressed CFRP rod in structural monitoring*, "Sensors and Actuators A", 2009 vol. 151, s. 127-132.
- [107] Kersey A.D., Berkoff T.A., *Fiber- Optic Bragg-Grating Differential-Temperature Sensor*, "IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS", 1992 vol. 4, no. 10, s. 1183-1185.
- [108] Kersey A.D., Berkoff T.A., Morey W.W., *Fibre optic Bragg grating strain sensor with drift compensated high resolution interferometric wavelength shift detection*, "Optics Letters", 1993 vol. 18, issue 1, s. 72-74.
- [109] Kersey A.D., Marrone M.J., *Bragg grating based nested fibre interferometers*, "ELECTRONICS LETTERS", 1996 vol. 32, no. 13, s. 1221-1222.
- [110] Kim S., Kwon J., Kim S., Lee B., *Temperature-Independent Strain Sensor Using a Chirped Grating Partially Embedded in a Glass Tube*, "IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS", 2000 vol. 12, no. 6, s. 678-680.
- [111] Kim C.-S., Lee T.H., Yu Y.S., Han Y.-G., Lee S.B., Jeong M.Y., *Multi-point interrogation of FBG sensors using cascaded flexible wavelength-division Sagnac loop filters*, "OPTICS EXPRESS", 2006 vol. 14, no. 19, s. 8546-8551.

- [112] Kim S., Kwon J., Lee B., *Temperature-independent strain sensor using a chirped Bragg grating partially embedded in a glass tube*, "Photonics Technology Letters, IEEE", 1999 vol.12, no.6, s. 878-879.
- [113] Kim S., Kwon J., Kim S., Lee B., *Temperature-Independent Strain Sensor Using a Chirped Grating Partially Embedded in a Glass Tube*, "IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS", 2000 vol. 12, no. 6, s. 678-680.
- [114] **Kisala P.**, *Application of inverse analysis to determine the strain distribution with optoelectronic method insensitive to temperature changes*, "Applied Optics", 2012 vol. 51, issue 16, s. 3599-3604.
- [115] **Kisala P.**, *Metrological conditions of strain measurement optoelectronic method by the use of fibre Bragg gratings*, "Metrology and Measurement Systems", 2012 vol. 19, no. 3, s. 471-480.
- [116] **Kisala P.**, *Optoelectronic sensor for simultaneous and independent temperature and elongation measurement using Bragg gratings*, "Przegląd Elektrotechniczny" 2012 vol. 11a, s. 343-346.
- [117] **Kisala P.**, *Generation of a zone chirp in uniform Bragg grating as a way of obtaining double functionality of a sensor*, "Metrology and Measurement Systems", 2012 vol. 19, no. 4, s. Article accepted 07-11-2012 in press, in press.
- [118] **Kisala P.**, *Detection of material defects with indirect method by determining the linear expansion with FBG sensor*, "Przegląd Elektrotechniczny" 2013 Article accepted 05-11-2012, in press.
- [119] Kogelnik H., *Filter Response of Nonuniform Almost-Periodic Structures*, "The Bell Systems Technical Journal", 1976 vol. 55, no. 1, s. 109-125.
- [120] Kohnke G.E., Erdogan T., Strasser T.A., White A.E., Milbrodt M.A., Henry C.H., Laskowski E.J., *Planar waveguide Mach-Zender bandpass filter fabricated with single exposure UV-induced gratings*, "OFC '96 Technical Digest", 1996, s. 277.
- [121] Kogelnik H., Shank C.V., *Coupled Wave Theory of Distributed Feedback Lasers*, "Journal of Applied Physics" 1972 vol. 43, s. 2327-2335.
- [122] Krzyżanowski P, Plaskota L., *Matematyka obliczeniowa II*, „Matematyka stosowana, Uniwersytet Warszawski”, s. 38-39, 2011.
- [123] Lai C.-W., Lo Y.-L., Yur J.-P., Liu W.-F., Chuang C.-H., *Application of Fabry-Pérot and fiber Bragg grating pressure sensors to simultaneous measurement of liquid level and specific gravity*, "Measurement", 2012 vol. 45, s. 469-473.
- [124] Lee C.-L., Lee R.-K., Kao Y.-M., *Synthesis of long-period fiber gratings with a Lagrange multiplier optimization method*, "Optics Communications", 2008 vol. 281, s. 61-74.
- [125] Lee J.-R., Chong S.Y., Yun C.-Y., Yoon D.-J. *A lasing wavelength stabilized simultaneous multipoint acoustic sensing system using*

- pressure-coupled fiber Bragg gratings*, “Optics and Lasers in Engineering”, 2011 vol. 49, s. 110-120.
- [126] Lee J.-R., Tsuda H., Toyama N., *Impact wave and damage detections using a strain-free fiber Bragg grating ultrasonic receiver*, “NDT&E International”, 2007 vol. 40, s. 85-93.
- [127] Lee K.S., Erdogan T., *Fiber Mode Coupling in Transmissive and Reflective Tilted Fiber Gratings*, “Applied Optics”, 2000 vol. 39, issue 9, s. 1394-1404.
- [128] Lee S.-M., Saini S.S., Jeong M.-Y., *Simultaneous Measurement of Refractive Index, Temperature, and Strain Using Etched-Core Fiber Bragg Grating Sensors*, “IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS”, 2010 vol. 22, no. 19, s. 1431-1433.
- [129] Leng J.S., Asundi A., *Non-destructive evaluation of smart materials by using extrinsic Fabry-Perot interferometric and fiber Bragg grating sensors*, “NDT&E International” 2002 vol. 35, s. 273-276.
- [130] Leng J., Asundi A., *Structural health monitoring of smart composite materials by using EFPI and FBG sensors*, “Sensors and Actuators A”, 2003 vol. 103, s. 330-340.
- [131] Lei K.F., Lee K.-F., Lee M.-Y., *Development of a Flexible PDMS Capacitive Pressure Sensor for Plantar Pressure Measurement*, “Microelectronic Engineering” 2012 vol. 99, s. 1-5.
- [132] Li B., Jiang L., Wang S., Wang Q.C.M., Yang J, *A new Mach-Zehnder interferometer in a thinned-cladding fiber fabricated by electric arc for high sensitivity refractive index sensing*, “Optics and Lasers in Engineering”, 2012 vol. 50, s. 829-832.
- [133] Li D., Li H., Ren L., Song G., *Strain transferring analysis of fiber Bragg grating sensors*, “Optical Engineering”, 2006 vol. 45, no. 2, s. 024402-1-024402-8.
- [134] Li D., Zhou Z., Ou J., *Development and sensing properties study of FRP–FBG smart stay cable for bridge health monitoring applications*, “Measurement”, 2011 vol. 44, s. 722-729.
- [135] Li L., Tong X.L., Zhou C.M., Wen H.Q., Lv D.J., Ling K., Wen C.S., *Integration of miniature Fabry–Perot fiber optic sensor with FBG for the measurement of temperature and strain*, “Optics Communications”, 2011 vol. 284, s. 1612-1615.
- [136] Liang W., Huang Y., Xu Y., Lee R.K., Yariv A., *Highly sensitive fiber Bragg grating refractive index sensors*, “Appl. Phys. Lett.”, 2005 vol. 86, s. 151122-1-151122-3.
- [137] Lima H. F., Antunes P. F., Pinto J. de L., Nogueira R.N., *Simultaneous Measurement of Strain and Temperature With a Single Fiber Bragg Grating Written in a Tapered Optical Fiber*, “IEEE SENSORS JOURNAL”, 2010 vol. 10, no. 2, s. 269-273.

- [138] Lin Y.B., Chang K.C., Chern J.C., Wang L.A., *Packaging Methods of Fiber-Bragg Grating Sensors in Civil Structure Applications*, "IEEE SENSORS JOURNAL", 2005 vol. 5, no. 3, s. 419-424.
- [139] Liu B., Zhang H., *Polarimetric distributed Bragg reflector fiber laser sensor array for simultaneous measurement of transverse load and temperature*, "Optical Fiber Technology", 2011 vol. 17, s. 619-625.
- [140] Liu H., Or S.W., Tam H.Y., *Magnetostrictive composite-fiber Bragg grating (MC-FBG) magnetic field sensor*, "Sensors and Actuators A", 2012 vol. 173, s. 122-126.
- [141] Liu Y., Liu B., Feng X., Zhang W., Zhou G., Yuan S., Kai G., Dong X., *High-birefringence fiber loop mirrors and their applications as sensors*, "Applied Optics", 2005 vol. 44, issue 12, s. 2382-2390.
- [142] Lo Y.L., *Using in-fiber Bragg-grating sensors for measuring axial strain and temperature simultaneously on surfaces of structures*, "Optics Engineering", 1998 vol. 37, s. 2272.
- [143] Lu P., Men L., Sooley K., Chen Q., *Tapered fiber Mach-Zehnder interferometer for simultaneous measurement of refractive index and temperature*, "APPLIED PHYSICS LETTERS" 2009 vol. 94, s. 131110-1- 131110-3.
- [144] Lu S.-W., Xie H.-Q., *Strengthen and real-time monitoring of RC beam using "intelligent" CFRP with embedded FBG sensors*, "Construction and Building Materials", 2007 vol. 21, s. 1839-1845.
- [145] Luo B.-b., Zhao M.-f., Zhou X.-j., Shi S.-h., Han X., Wang Y., *Etched fiber Bragg grating for refractive index distribution measurement*, "Optik", 2012, Article accepted 13-08-2012, in press.
- [146] Luyckx G., Voet E., Geernaert T., Chah K., Nasilowski T., De Waele W., Van Paepegem W., Becker M., Bartelt H., Urbańczyk W., Wójcik J., Degrieck J., Berghmans F., Thienpont H., *Response of FBGs in Microstructured and Bow Tie Fibers Embedded in Laminated Composite*, "IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS", 2009 vol. 21, no. 18, s. 1290-1292.
- [147] Ma C.-C., Chuang K.-C., Lin B.-R., *Investigation of the dynamic demodulation ability of a tilted fiber Bragg grating filter in an all-fiber displacement sensing system*, "Sensors and Actuators A", 2011 vol. 168, s. 179-186.
- [148] Ma G.-M., Li C.-R., Jiang J., Quan J.-T., Cheng Y.-C., *Design of Fiber Bragg Grating Load Sensor used in Ice Monitoring on Overhead Transmission Lines*, "High Voltage Engineering and Application ICHVE" 2010, s. 232-235.
- [149] MacDougall T.W., Pilevar S., Haggans C.W., Jackson M.A., *Generalized Expression for the Growth of Long Period Gratings*, "IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS", 1998 vol. 10, s. 1449-1451.

- [150] Majumder M., Gangopadhyay T.K., Chakraborty A.K., Dasgupta K., Bhattacharya D.K., *Fibre Bragg gratings in structural health monitoring - Present status and applications*, "Sensors and Actuators A", 2008 vol. 147, s. 150-164.
- [151] Martinez-Rios A., Monzon-Hernandez D., Torres-Gomez I., *Highly sensitive cladding-etched arc-induced long-period fiber gratings for refractive index sensing*, "Optics Communications", 2010 vol. 283, s. 958-962.
- [152] Matsuhara M., Hill K.O., *Optical-Waveguide Band-Rejection Filters: Design*, "Applied Optics" 1974 vol. 13, s. 2886-2888.
- [153] Maurin L., Boussoir J., Rougeault S., Bugaud M., Ferdinand P., Landrod A.G., Grunevald Y.-H., Chauvin T., *FBG-based smart composite bogies for railway applications*, "Optical Fiber Sensors Conference Technical Digest, Ofs 2002" 2002 vol. 1, s. 91-94.
- [154] Meltz G., Morey W.W., Hewlet S.J., Love J.D. *Photosensitivity and quadratic nonlinearity in glass waveguides: fundamentals and applications*, "Technical Digest Series Optical Society of America", 1995 vol. 22, s. 14-17.
- [155] Miao Y., Liu B., Zhang W., Dong B., Zhou H., Zhao Q., *Dynamic Temperature Compensating Interrogation Technique for Strain Sensors With Tilted Fiber Bragg Gratings*, "IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS", 2008 vol. 20, no. 16, s. 1393-1395.
- [156] Miao Y.-P., Liu B., Zhang K., Zhao Q.-D., *Linear edge and temperature characteristic of tilted fiber Bragg gratings cladding-mode envelope*, "Optical Fiber Technology", 2011 vol. 17, s. 286-290.
- [157] Miao Y.-P., Liu B., Zhao Q.-D., *Refractive index sensor based on measuring the transmission power of tilted fiber Bragg grating*, "Optical Fiber Technology", 2009 vol. 15, s. 233-236.
- [158] Mihailov S.J., Grobncic D., Walker R.B., Smelser C.W., Cuglietta G., Graver T., Mendez A., *Bragg grating writing through the polyimide coating of high NA optical fibres with femtosecond IR radiation*, "Optics Communications", 2008 vol. 281, s. 5344-5348.
- [159] Moerman K.M., Sprengers A.M.J., Nederveenb A.J., Simms C.K., *A novel MRI compatible soft tissue indenter and fibre Bragg grating force sensor*, "Medical Engineering & Physics", 2012, article accepted 20-06-2012, in press.
- [160] Mokhtar M.R., Owens K., Kwasny J., Taylor S.E., Basheer P.A.M., Cleland D., Bai Y., Sonebi M., Davis G., Gupta A., Hogg I., Bell B., Doherty W., McKeague S., Moore D., Greeves K., Sun T., Grattan K.T.V., *Fiber-Optic Strain Sensor System With Temperature Compensation for Arch Bridge Condition Monitoring*, "IEEE SENSORS JOURNAL", 2012 vol. 12, no. 5, s. 1470-1476.

- [161] Moon D.S., Sun G., Lin A., Liu X., Chung Y., *Tunable dual-wavelength fiber laser based on a single fiber Bragg grating in a Sagnac loop interferometer*, "Optics Communications", 2008 vol. 281, s. 2513-2516.
- [162] Moyo P., Brownjohn J.M.W., Suresh R., Tjin S.C., *Development of fiber Bragg grating sensors for monitoring civil infrastructure*, "Engineering Structures" 2005 vol. 27, s. 1828-1834.
- [163] Mroczka J., Szczuczyński D., *Improved regularized solution of the inverse problem in turbidimetric measurements*, "Appl. Opt.", 2010 vol. 49, s. 4591-4603.
- [164] Mroczka J., Szczuczyński D., *Inverse problems formulated in terms of first-kind Fredholm integral equations in indirect measurements*, "Metrol. Meas. Syst.", 2009 vol. XVI, no 3, s. 333-357.
- [165] Ng J.H., Zhou X., Yang X., Hao J., *A simple temperature-insensitive fiber Bragg grating displacement sensor*, "Optics Communications", 2007 vol. 273, s. 398-401.
- [166] Ni N., Chan C.C., Wong W.C., Shao L.Y., Dong X.Y., Shum P., *Cavity ring-down long period grating pressure sensor*, "Sensors and Actuators A", 2010 vol. 158, s. 207-211.
- [167] Ni K., Dong X., Jin Y., Xu H., *Temperature-Independent Fiber Bragg Grating Tilt Sensor*, "IEEE Photonics and Optoelectronic SOPO", 2010, s. 1-3.
- [168] Nidhi, Kalerb R.S., Tiwaria U., Mishraa V., Singha N., Kapura P., *Investigation of Long Period Grating as refractive index sensor*, "Optik" 2012 vol. 123, 1071-1073.
- [169] Noordegraaf D., Scolari L., Lægsgaard J., Rindorf L., Alkeskjold T.T., *Electrically and mechanically induced long period gratings in liquid crystal photonic bandgap fibers*, "OPTICS EXPRESS", 2007 vol. 15, no. 13, s. 7901-7912.
- [170] A.F. Obaton G. Laffont C. Wang A. Allard P. Ferdinand, *Tilted Fiber Bragg Gratings and Phase Sensitive-Optical Low Coherence Interferometry for refractometry and liquid level sensing*, "Sensors and Actuators A", 2012, accepted manuscript 16-10-2012, in press.
- [171] Pal S., Suna T., Grattan K.T.V., Wade S.A., Collins S.F., Baxter G.W. Dussardier B., Monnom G., *Non-linear temperature dependence of Bragg gratings written in different fibres, optimised for sensor applications over a wide range of temperatures*, "Sensors and Actuators A", 2004 vol. 112, s. 211-219.
- [172] Pant J., Mitra A., Tiwari U., Mondal S., Singh N., Jain S., Kapur P., *Temperature Compensated Transverse Load Sensor Based on Dual FBG Sensor*, "Proceedings of International Conference on Microwave-08, IEEE", 2008, s. 395-397.

- [173] Papantoniou A., Rigas G., Alexopoulos N.D., *Assessment of the strain monitoring reliability of fiber Bragg grating sensor (FBGs) in advanced composite structures*, "Composite Structures", 2011 vol. 93, s. 2163-2172.
- [174] Patrick H.J., Kersey A.D., Bucholtz F., Ewing K.J., Judkins J.B., Vengsarkar A.M., *Chemical sensor based on long-period fiber grating response to index of refraction*, "CLEO'97", 1997, s. 420-421.
- [175] Patrick H.J., Williams G.M., Kersey A.D., Pedrazzani J.R., Vengsarkar A.M., *Hybrid Fiber Bragg Grating Long Period Fiber Grating Sensor for Strain/Temperature Discrimination*, "IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS", 1996 vol. 8, no. 9, s. 1223-1225.
- [176] Payo I., Feliu V., Cortázar O.D., *Fibre Bragg grating (FBG) sensor system for highly flexible single-link robots*, "Sensors and Actuators A", 2009 vol. 150, s. 24-39.
- [177] Pei J., Yang X., Zhan Y., Zhu R., Xiang S., *On a fiber grating sensor system with the capacity of cross-sensitivity discrimination*, "Optik", 2008 vol. 119, s. 565-570.
- [178] Peng B.-J., Zhao Y., Yang J., Zhao M., *Pressure sensor based on a free elastic cylinder and birefringence effect on an FBG with temperature-compensation*, "Measurement" 2005 vol. 38, s. 176-180.
- [179] Peng H., Su Y., Ye Z., Zhou B., *A novel fiber Bragg grating sensor for weak pressure measurement based on the Stokes parameter*, "Optical Fiber Technology", 2012, article revised 25-07-2012, in press.
- [180] Peng Y., Qiu K., Wu B., Ji S., *All-optically tuned fiber Bragg grating delay line by self-pumping*, "Optik", 2011 vol. 122, s. 881-886.
- [181] Pilla P., Contessa L., Iadicicco A., Campopiano S., Cutolo A., Giordano M., Cusano A., *Optoelectronic Sensor for Chemical Detection in Liquid by Using Ultra Thin Polymer Coating on Long Period Fiber Gratings*, "Fibres and Optical Passive Components, Proceedings of 2005 IEEE/LEOS Workshop", 2005, s. 349-354.
- [182] Prabhugoud M., Peters K., Pearson J., Zikry M.A., *Independent measurement of strain and sensor failure features in Bragg grating sensors through multiple mode coupling*, "Sensors and Actuators A", 2007 vol. 135, s. 433-442.
- [183] Putnam M.A., Williams G.M., Friebele E.J., *Fabrication of tapered, strain-gradient chirped fibre Bragg gratings*, "ELECTRONICS LETTERS", 1995 vol. 31, no. 4, s. 309- 310.
- [184] Qian W., Chan C.C., Zhao C.-L., Liu Y., Li T., Hu L., Ni K., Dong X., *Photonic crystal fiber refractive index sensor based on a fiber Bragg grating demodulation*, "Sensors and Actuators B", 2012 vol. 166-167, s. 761-765.
- [185] Qu A., Li D., Li Min, *The convergence rate of a restart MFR conjugate gradient method with inexact line search*, "Applied Mathematics and Computation" 2012 vol. 218, s. 11380-11390.

- [186] Raikara U.S., Lalasangia A.S., Akkia J.F., Raikarb P., Manoharc K.G., Srinivasd T., Badigera N.M., Radhakrishnane P., *Cd concentration sensor based on fiber grating technology*, "Sensors and Actuators B", 2012 vol. 161, s. 818-823.
- [187] Rajan G., Ramakrishnan M., Semenova Y., Domanski A., Boczkowska A., Wolinski T., Farrell G., *Analysis of Vibration Measurements in a Composite Material Using an Embedded PM-PCF Polarimetric Sensor and an FBG Sensor*, "IEEE SENSORS JOURNAL", 2012 vol. 12, no. 5, s. 1365-1371.
- [188] Rao Y.J., *Recent progress in applications of in-fibre Bragg grating sensors*, "Optics and Lasers in Engineering" 1999 vol. 31, s. 297-324.
- [189] Rao Y.J., Yuan S.F., Zeng X.K., Lian D.K., Zhu Y., Wang Y.P., Huang S.L., Liu T.Y., Fernando G.F., Zhang L., Bennion I., *Simultaneous strain and temperature measurement of advanced 3-D braided composite materials using an improved EFPI/FBG system*, "Optics and Lasers in Engineering", 2002 vol. 38, s. 557-566.
- [190] Rahimi S., Ban D., Xiao G., Zhang Z., Albert J., *Temperature and Strain Sensors Based on Integration of Tilted Fiber Bragg Gratings With a Free Spectral Range Matched Interrogation System*, "IEEE SENSORS JOURNAL", 2009 vol. 9, no. 7, s. 858-861.
- [191] Reilly S.P., James S.W. Tatam R.P., *Dual wavelength fibre Bragg grating external cavity semiconductor laser sources for sensor applications*, "Optical Fiber Sensors Conference Technical Digest Ofcs", 2002 vol. 1, s. 281-284.
- [192] Rensheng S., Yang L., Xiao Z., Wen L., Chuanhui C., Yushu Z., Guotong D., Lin Q., *Study on sensing properties of a temperature-independent high pressure sensor base on tapered FBG*, "Photonics and Optoelectronic SOPO", 2010, s. 1-4.
- [193] Rindorf L., Jensen J.B., Dufva M., Pedersen L.H. Høiby P.E., Bang O., *Photonic crystal fiber long-period gratings for biochemical sensing*, "OPTICS EXPRESS", 2006 vol. 14, no. 18, s. 8224-8231.
- [194] Rodrigues C., Cavadas F., Félix C., Figueiras J., *FBG based strain monitoring in the rehabilitation of a centenary metallic bridge*, "Engineering Structures", 2012, vol. 44, 281-290.
- [195] Rogers A.J., Handerek V.A., Kanellopoulos S.E., Zhang J., *New ideas in nonlinear distributed optical-fiber sensing*, "Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng. (SPIE)", 1995 vol. 2507, s. 162-174.
- [196] Sakata H., Ito H., *Optical fiber temperature sensor using a pair of nonidentical long-period fiber gratings for intensity-based sensing*, "Optics Communications", 2007 vol. 280, s. 87-90.
- [197] Sanada H., Sugita Y., Kashiwai Y., *Development of a multi-interval displacement sensor using Fiber Bragg Grating technology*, "International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences", 2012 vol. 54, s. 27-36.

- [198] Shao L.-Y., Albert J., *Lateral force sensor based on a core-offset tilted fiber Bragg grating*, "Optics Communications", 2011 vol. 284, s. 1855-1858.
- [199] Shao L.-Y., Laronche A., Smietana M., Mikulic P., Bock W.J., Albert J., *Highly sensitive bend sensor with hybrid long-period and tilted fiber Bragg grating*, "Optics Communications", 2010 vol. 283, s. 2690-2694.
- [200] Shen C., Zhong C., *Novel temperature-insensitive fiber Bragg grating sensor for displacement measurement*, "Sensors and Actuators A", Vol. 170 (2011) s. 51-54.
- [201] Shen X., Lin Y., *Measurements of Temperature and Residual Strain during Fatigue of a CFRP Composite Using FBG Sensors*, "2009 International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation", 2009, s. 35-38.
- [202] Shi C.Z., Zeng N., Zhang M., Liao Y.B., Lai S.R., *Non-minimum phase reconstruction from amplitude data in fiber Bragg gratings using an adaptive simulated annealing algorithm*, "Optics & Laser Technology", 2004 vol. 36, s. 259-264.
- [203] Shi Q., Kuhlmeier B.T., *Optimization of photonic bandgap fiber long period grating refractive-index sensors*, "Optics Communications", 2009 vol. 282, s. 4723-4728.
- [204] Shi Z.-J., Shen J., *Convergence of PRP method with new nonmonotone line search*, "Applied Mathematics and Computation", 2006 vol. 181, s. 423-431.
- [205] Shi Z.-J., Shen J., *Convergence of the Polak-Ribiere-Polyak conjugate gradient method*, "Nonlinear Analysis", 2007 vol. 66, s. 1428-1441.
- [206] Shu X., Allsop T., Gwandu B., Zhang L., Bennion I., *High-Temperature Sensitivity of Long-Period Gratings in B-Ge Codoped Fiber*, "IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS", 2001 vol. 13, no. 8, s. 818-820.
- [207] Silva R.M., Ferreira M.S., Frazão O., *Temperature independent torsion sensor using a high-birefringent Sagnac loop interferometer*, "Optics Communications", 2012 vol. 285, s. 1167-1170.
- [208] Sohn K.-R., *Fiber Bragg grating-tuned feedback laser flow sensor system*, "Sensors and Actuators A", 2012 vol. 179, s. 1-4.
- [209] Sohn K.-R., Shim J.-H., *Liquid-level monitoring sensor systems using fiber Bragg grating embedded in cantilever*, "Sensors and Actuators A", 2009 vol. 152, s. 248-251.
- [210] Song M., Lee S.B. Choi S.S., Lee B. *Simultaneous Measurement of Temperature and Strain Using Two Fiber Bragg Gratings Embedded in a Glass Tube*, "OPTICAL FIBER TECHNOLOGY", 1997 vol. 3, s. 194-196.

- [211] Sorensen L., Botsis J., Gmur T., Cugnoni J., *Delamination detection and characterisation of bridging tractions using long FBG optical sensors*, "Composites: Part A", 2007 vol. 38, s. 2087-2096.
- [212] Srimannarayana K., Sai Shankar M., Sai Prasad R.L.N., Krishna Mohan T.K., Ramakrishna S., Srikanth G., Ravi Prasad Rao S., *Fiber Bragg grating and long period grating sensor for simultaneous measurement and discrimination of strain and temperature effects*, "Optica Applicata", 2008 vol. 38, no. 3, s. 601-608.
- [213] Starodumov A.N., Zenteno L.A., Monzon D., De La Rosa E., *Fiber Sagnac interferometer temperature sensor*, "Applied Physics Letters", 1997 vol. 70, no. 19, s. 19-21.
- [214] Stegall D.B., Erdogan T., *Leaky Cladding Mode Propagation in Long-Period Fiber Grating Devices*, "IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS", 1999 vol. 11, no. 3, s. 343-345.
- [215] Suhir E., *Interfacial Stress in Bimetal Thermostats*, "Journal of Applied Mechanics", 1989 vol. 56, s. 595-600.
- [216] Suhir E., *Stress in Bi-Metal Thermostats*, "Journal of Applied Mechanics", 1986 vol. 53, s. 657-660.
- [217] Sun G., Moon D. S., Chung Y., *Simultaneous Temperature and Strain Measurement Using Two Types of High-Birefringence Fibers in Sagnac Loop Mirror*, "IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS", 2007 vol. 19, no. 24, s. 2027-2029.
- [218] Sun G., Tang H., Hu Y., Zhou Y., *Strain and Temperature Discrimination Using High Birefringence Fiber Sagnac Interferometer With Enhanced Sensitivities*, "IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS", 2012 vol. 24, no. 7, s. 587-589.
- [219] Suresh R., Tjin S. C., *Effects of dimensional and material parameters and cross-coupling on FBG based shear force sensor*, "Sensors and Actuators A", 2005 vol. 120, s. 26-36.
- [220] Suresh R., Tjin S. C., Bhalla S., *Multi-component force measurement using embedded fiber Bragg grating*, "Optics & Laser Technology", 2009 vol. 41, s. 431-440.
- [221] Takeda S., Minakuchi S., Okabe Y., Takeda N., *Delamination monitoring of laminated composites subjected to low-velocity impact using small-diameter FBG sensors*, "Composites: Part A", 2005 vol. 36, s. 903-908.
- [222] Takeda S., Okabe Y., Yamamoto T., Takeda N., *Detection of edge delamination in CFRP laminates under cyclic loading using small-diameter FBG sensors*, "Composites Science and Technology", 2003 vol. 63, s. 1885-1894.
- [223] Tan Y., Meng L., Zhang D., *Strain sensing characteristic of ultrasonic excitation-fiber Bragg gratings damage detection technique*, "Measurement", 2012, article accepted 2-07-2012, in press.

- [224] Tao X., Tanga L., Dua W.-C., Choy C.-L., *Internal strain measurement by Fiber Bragg grating sensors in textile composites*, "Composites Science and Technology", 2000 vol. 60, s. 657-669.
- [225] Tian K., Liu Y., Wang Q., *Temperature-independent fiber Bragg grating strain sensor using bimetal cantilever*, "Optical Fiber Technology", 2005 vol. 11, s. 370-377.
- [226] Tian K., Wang Y.L.Q., *A Practical Package Technique for FBG-based Temperature Independent sensor*, "Solid-State and Integrated Circuits Technology", 2004, vol. 3, s. 1908-1910.
- [227] Todd M.D., Johnson G.A., Althouse B.A., Vohra S.T., *Flexural beam-based fiber Bragg grating accelerometers*, "IEEE Photon. Technol. Lett.", 1998 vol. 10, s. 1605-1607.
- [228] Torres B., Payá-Zaforteza I., Calderón P.A., Adam J.M., *Analysis of the strain transfer in a new FBG sensor for Structural Health Monitoring*, "Engineering Structures", 2011 vol. 33, s. 539-548.
- [229] Vendittozzi C., Sindoni G., Paris C., del Marmo P. P., *Application of an FBG sensors system for structural health monitoring and high performance trimming on racing yacht*, "2011 Fifth International Conference on Sensing Technology", 2011, s. 617-622.
- [230] Vengsarkar A.M., Lemaire P.J., Judkins J.B., Bhatia V., Erdogan T., Sipe J.E., *Long-Period Fiber Gratings as Band-Rejection Filters*, "JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY", 1996 vol. 14, no. 1, s. 58-65.
- [231] Venugopalan T., Yeo T.L., Sun T., Grattan K.T.V., *High sensitivity long-period grating-based temperature monitoring using a wide wavelength range to 2.2 μm* , "Optics Communications", 2006 vol. 268, s. 42-45.
- [232] Wang D., Cao M., Li C., Li D., Chen Y., Xu X., Xu J., Li. Y., Wan Z., Wang B., *Fiber Bragg Grating Liquid Level Sensor with Double Pressure and Temperature Sensitivities*, "Procedia Engineering", 2011 vol. 15, s. 704-709.
- [233] Wang T., Guo Y., Zhan X., Zhao M., Wang K., *Simultaneous Measurements of Strain and Temperature with Dual Fiber Bragg Gratings for Pervasive Computing*, "1st International Symposium on Pervasive Computing and Applications", 2006 s. 786-790.
- [234] Wang W.-C., Yee S.S., Reinhall P. G., *Optical viscosity sensor using forward light scattering*, "Sensors and Actuators B", 1995 vol. 24-25, s. 753-755.
- [235] Wang Y., Wang M., Huang X., *Simultaneous strain and temperature measurement with a single fiber Bragg grating based on the polarization properties analysis*, "Optics Communications", 2012 vol. 285, s. 1834-1837.
- [236] Wang Z., Shen F., Song L., Wang X., Wang A., *Multiplexed Fiber Fabry-Pérot Interferometer Sensors Based on Ultrashort Bragg Gratings*, "IEEE

PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS”, 2007 vol. 19, no. 8, s. 622-624.

- [237] Wei C.Y., Ye C.C., James S.W., Irving P.E., Tatam R.P., *AFM observation of surface topography of fibre Bragg gratings fabricated in germanium–boron codoped fibres and hydrogen-loaded fibres*, “Optical Materials”, 2002 vol. 20, s. 283-294.
- [238] Wei C.Y., Ye C.C., James S.W., Tatam R.P., Irving P.E., *The influence of hydrogen loading and the fabrication process on the mechanical strength of optical fibre Bragg gratings*, “Optical Materials”, 2002 vol. 20, s. 241-251.
- [239] Wen X., Zhang D., Qian Y., Li J., Fei N., *Improving the peak wavelength detection accuracy of Sn-doped, H₂-loaded FBG high temperature sensors by wavelet filter and Gaussian curve fitting*, “Sensors and Actuators A”, 2012 vol. 174, s. 91-95.
- [240] Wong A.C.L., Childs P.A., Berndt R., Macken T., Peng G.-D., Gowripalan N., *Simultaneous measurement of shrinkage and temperature of reactive powder concrete at early-age using fibre Bragg grating sensors* *Cement & Concrete Composites*, Vol. 29 (2007) s. 490-497.
- [241] Wójcik W., Ciężczyk S., **Kisala P.**, *Wykorzystanie informacji o drugiej pochodnej widma w iteracyjnych algorytmach rekonstrukcji widm w spektroskopii*, „Przegląd Elektrotechniczny”, 2010 vol. 10, s. 143-146.
- [242] Wójcik W., **Kisala P.**, *Analiza niepewności wyznaczenia rozkładu wydłużenia siatki Bragga na podstawie jej charakterystyk spektralnych*, „Pomiary Automatyka Kontrola” 2010 vol. 56, no 5, s. 427-429.
- [243] Wójcik W., **Kisala P.**, *Metoda wyznaczania funkcji apodyzacji światłowodowych siatek Bragga na podstawie ich charakterystyk widmowych*, „Przegląd Elektrotechniczny”, 2010 vol. 10, s. 127-130.
- [244] Wójcik W., **Kisala P.**, *The application of inverse analysis in strain distribution recovery using the fibre Bragg grating sensors*, “Metrol. Meas. Syst.” 2009, vol. 16, no 4, s. 649-660.
- [245] Wu X.-D., Schmidt-Hattenberger C., Kruger K., Chen J., *Temperature-controlled fiber Bragg grating dynamic strain detection system*, “Sensors and Actuators A”, 2005 vol. 119, s. 68-74.
- [246] Xia L., Shuai B., Li W., Liu D., *Simultaneous measurement of temperature and infinitesimal displacement using the high cladding mode coupling loss in fiber Bragg grating*, “Sensors and Actuators A”, 2012 vol. 176, s. 53-56.
- [247] Xiao G., Long X., Zhang B., Jin S., *A novel active optical approach for acceleration measurement based on aY-shaped cavity dual-frequency laser*, “Optics & Laser Technology”, 2012 vol. 44, s. 344-348.
- [248] Xiaowei D., Ruifeng Z., *Detection of liquid-level variation using a side-polished fiber Bragg grating*, “Optics & Laser Technology”, 2010 vol. 42, s. 214-218.

- [249] Xie F., Chen X., Zhang L., *High stability interleaved fiber Michelson interferometer for on-line precision displacement measurements*, "Optics and Lasers in Engineering", 2009 vol. 47, s. 1301-1306.
- [250] Xie F., Chen X., Zhang L., Song M., *Realisation of an effective dual-parameter sensor employing a single fibre Bragg grating structure*, "Optics and Lasers in Engineering", 2006 vol. 44, s. 1088-1095.
- [251] Xie F., Ren J., Chen Z., *Design and analysis of a highly stabilised optical fiber Michelson interferometer measurement system*, "Sensors and Actuators A", 2009 vol. 152, s. 176-181.
- [252] Xu M.G., Archambault J.-L., Reekie L.J., Dakin P., *Discrimination between strain and temperature effects using dual-wavelength fibre grating sensors*, "ELECTRONICS LETTERS", 1994 vol. 30, no. 13, s. 1085-1087.
- [253] Xu M.G., Archambault J.-L., Reekie L., Dakin J.P., *Thermally-Compensated Bending Gauge Using Surface-Mounted Fibre Gratings*, "International Journal of Optoelectronics", 1994 vol. 9, s. 281-283.
- [254] Xu M.G., Dong L., Reekie L., Tucknott J.A. Cruz J.L., *Temperature-independent strain sensor using a chirped Bragg grating in a tapered optical fibre*, "ELECTRONICS LETTERS", 1995 vol. 31, no. 10, s. 823-825.
- [255] Yeom D.-I., Steinvurzel P., Eggleton B.J., Lim S.D., Kim B.-Y., *Tunable acoustic gratings in solid-core photonic bandgap fiber*, "OPTICS EXPRESS", 2007 vol. 15, no. 6, s. 3513-3518.
- [256] Yun B., Chen N., Cui Y., *Highly Sensitive Liquid-Level Sensor Based on Etched Fiber Bragg Grating*, "IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS", 2007 vol. 19, no. 21, s. 1747-1749.
- [257] Yamada M. Sakuda K., *Analysis of almost-periodic distributed feedback slab waveguides via a fundamental matrix approach*, "Applied Optics", 1987 vol. 26, no. 16, s. 3474-3478.
- [258] Yan J., Zhang A.P., Shao L.-Y., Ding J.-F., He S., *Simultaneous Measurement of Refractive Index and Temperature by Using Dual Long-Period Gratings With an Etching Process*, "IEEE SENSORS JOURNAL", 2007 vol. 7, no. 9, s. 1360-1361.
- [259] Yang G., Lin S., Jin J., Song N., *Effect of gamma radiation on the reflectance spectrum of fiber Bragg gratings*, "Optik", 2012, article accepted 24-06-2012, in press.
- [260] Yang J., Zhao Y., Peng B.-J., Wan X., *Temperature-compensated high pressure FBG sensor with a bulk-modulus and self-demodulation method*, "Sensors and Actuators A", 2005 vol. 118, s. 254-258.
- [261] Yang M., Wang D.N., Liao C.R., *Fiber Bragg Grating With Micro-Holes for Simultaneous and Independent Refractive Index and Temperature Sensing*, "IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS", 2011 vol. 23, no. 20, s. 1511-1513.

- [262] Yang X., Zhao C.-L., Peng Q., Zhou X., Lu C., *FBG sensor interrogation with high temperature insensitivity by using a HiBi-PCF Sagnac loop filter*, "Optics Communications", 2005 vol. 250, s. 63-68.
- [263] Yashiro S., Okabe T., Toyama N., Takeda N., *Monitoring damage in holed CFRP laminates using embedded chirped FBG sensors*, "International Journal of Solids and Structures", 2007 vol. 44, s. 603-613.
- [264] Yashiro S., Takeda N., Okabe T., Sekine H., *A new approach to predicting multiple damage states in composite laminates with embedded FBG sensors*, "Composites Science and Technology", 2005 vol. 65, s. 659-667.
- [265] Yi J., Zhu X., Zhang H., Shen L., Qiao X., *Spatial shape reconstruction using orthogonal fiber Bragg grating sensor array*, "Mechatronics", 2012 vol. 22, s. 679-687.
- [266] Yu X., Yao Y., Tian J., Liu C., *A hybrid method for designing fiber Bragg gratings with right-angled triangular spectrum in sensor applications*, "Optik", 2012, article accepted 18-03-2012, in press.
- [267] Yuan L.-B., *Multiplexed fiber optic sensors matrix demodulated by a white light interferometric Mach-Zehnder interrogator*, "Optics & Laser Technology", 2004 vol. 36, s. 365-369.
- [268] Yuan L., Zhou L., Jin W., *Fiber Optic Differential Interferometer*, "IEEE TRANSACTIONS ON INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT", 2000 vol. 49, no. 4, s. 779-782.
- [269] Zhan C., Zhu Y., Yin S., Ruffin P., *Multi-parameter harsh environment sensing using asymmetric Bragg gratings inscribed by IR femtosecond irradiation*, "Optical Fiber Technology", 2007 vol. 13, s. 98-107.
- [270] Zhan Y., Luo J., Wu H., Yu M., *An all-fiber high resolution fiber grating concentration sensor*, "Optik", 2012 vol. 123, s. 637-640.
- [271] Zhang A. P., Shao L.-Y., Ding J.-F., He S., *Sandwiched Long-Period Gratings for Simultaneous Measurement of Refractive Index and Temperature*, "IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS", 2005 vol. 17, no. 11, s. 2397-2399.
- [272] Zhang L., Liu Y., Everall L., Williams J.A.R., Bennion I., *Design and Realization of Long-Period Grating Devices in Conventional and High Birefringence Fibers and Their Novel Applications as Fiber-Optic Load Sensors*, "IEEE JOURNAL OF SELECTED TOPICS IN QUANTUM ELECTRONICS", 1999 vol. 5, no. 5, s. 1373-1378.
- [273] Zhang W., Dong X., Zhao Q., Kai G., Yuan S., *FBG-Type Sensor for Simultaneous Measurement of Force (or Displacement) and Temperature Based on Bilateral Cantilever Beam*, "IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS", 2001 vol. 13, no. 12, s. 1340-1342.
- [274] Zhang X., Liang D., Zeng J., Asundi A., *Genetic algorithm-support vector regression for high reliability SHM system based on FBG sensor network*, "Optics and Lasers in Engineering" 2012 vol. 50, 148-153.

- [275] Zhao C.-L., Demokan M.S., Jin W., Xiao L., *A cheap and practical FBG temperature sensor utilizing a long-period grating in a photonic crystal fiber*, "Optics Communications", 2007 vol. 276, s. 242-245.
- [276] Zhao X., Gou J., Song G., Jinping O., *Strain monitoring in glass fiber reinforced composites embedded with carbon nanopaper sheet using Fiber Bragg Grating (FBG) sensors*, "Composites: Part B", 2009 vol. 40, s. 134-140.
- [277] Zhao Q., Qu Y., Wang Y., Li F., *A Novel Temperature Sensor Based on a Long Period Fiber Grating With a Unique Double-cladding Layer Structure*, "International Conference on Electronics and Optoelectronics ICEOE 2011", 2011, s. 281-283.
- [278] Zhao Y., Huang H., Wang Q., *Interrogation technique using a novel spectra bandwidth measurement method with a blazed FBG and a fiber-optic array for an FBG displacement sensor*, "Sensors and Actuators A", 2011 vol. 165, s. 185-188.
- [279] Zhao Y., Liao Y., *Discrimination methods and demodulation techniques for fiber Bragg grating sensors*, "Optics and Lasers in Engineering", 2004 vol. 41, s. 1-18.
- [280] Zhao Y., Yu C., Liao Y., *Differential FBG sensor for temperature-compensated high-pressure (or displacement) measurement*, "Optics & Laser Technology", 2004 vol. 36, s. 39-42.
- [281] Zhao Y., Zhao Y., Zhao M., *Novel force sensor based on a couple of fiber Bragg gratings*, "Measurement", 2005 vol. 38, s. 30-33.
- [282] Zheng J., *Single-Mode Birefringent Fiber Frequency-Modulated Continuous-Wave Interferometric Strain Sensor*, "IEEE SENSORS JOURNAL", 2010 vol. 10, no. 2, s. 281-285.
- [283] Zhong C., Shen C., Li K., *A novel temperature-insensitive fiber Bragg grating sensor for pressure measurement*, Photonics and Optoelectronics SOPO, 2011, s. 1-3.
- [284] Zhou D.-P., Wei L., Liu W.-K., Lit J.W.Y., *Simultaneous measurement of strain and temperature based on a fiber Bragg grating combined with a high-birefringence fiber loop mirror*, Optics Communications, Vol. 281 (2008) s. 4640-4643.
- [285] Zhou D.-P., Wei L., Liu W.-K., Liu Y., Lit J.W.Y., *Simultaneous measurement for strain and temperature using fiber Bragg gratings and multimode fibers*, "Applied Optics", 2008 vol. 47, issue 10, s. 1668-1672.
- [286] Zhou W., Dong X., Jin Y., Zhao C.-L., *Cantilever-based FBG sensor for temperature-independent acceleration measurement*, "SPIE-OSA-IEEE", 2009 vol. 7634, s. 763413-1-763413-6.
- [287] Zhou W., Dong X., Jin Y., Zhao C., *Cantilever-based FBG sensor for temperature-independent acceleration measurement*, "Optical Society of America", 2009, s. 1-2.

- [288] Zhou W., Dong X., Nia K., Chan C.C., Shum P., *Temperature-insensitive accelerometer based on a strain-chirped FBG*, "Sensors and Actuators A" 2010 vol.157, s. 15-18.
- [289] Zhou W., Zhao C.-L., Huang J., Shen W. Dong X., *A novel FBG sensing head geometry for strain-temperature discrimination*, "SPIE-OSA-IEEE", 2009 vol. 7634, s. 763411-1-763411-6.
- [290] Zhu J.-J., Zhang A. P., Zhou B., Tu F., Guo J.-T., Tong W.-J., He S., Xue W., *Effects of doping concentrations on the regeneration of Bragg gratings in hydrogen loaded optical fibers*, "Optics Communications", 2011 vol. 284, s. 2808-2811.
- [291] Zhu T., Rao Y.J., Wang J.L. Liu M., *Transverse-load characteristics of twisted long-period fibre gratings written by high-frequency CO₂ laser pulses*, "ELECTRONICS LETTERS", 2006 vol. 42, no. 8, s. 1-2.
- [292] Zhu Y., He Z., Kanka J., Du H., *Numerical analysis of refractive index sensitivity of long-period gratings in photonic crystal fiber*, "Sensors and Actuators B", 2008 vol. 129, s. 99-105.

Summary

Periodic fiber structures in optoelectronic sensors for measurements of selected non-electrical quantities.

This work describes periodic fiber optic structures used in optoelectronic sensors and proposes sensor system solutions for measuring selected non-electrical quantities. The main section of the work presents methods and systems to reduce the problem of dependence of the sensor parameters on the variable temperature when measuring various physical quantities using fiber optic sensors.

The work contains a description of the chirp generation method in the FBG section to measure the strain and temperature. The sensor system design is presented, and the validity of the selection of grating parameters that are subsequently used to determine the strain and temperature is demonstrated. A method of obtaining information on the quantities measured using the chirp generated in the FBG is described. The work presents an analysis of the sensor response during the variable temperature and strain tests, determining the non-linearity errors and sensitivity of the individual LPG parameters to the force. A method is described to enable simultaneous measurement of the temperature and two force components using sensors with fiber Bragg gratings. The advantages of this method when compared to the existing solutions for the force and temperature sensors are indicated.

The next section describes a method for measuring the temperature and maximum value of the heterogeneous linear stress distribution, clearly stating the assumptions of the method. It also presents an algorithm for determining the uniform stress under a variable temperature, using a sensor model constructed for this purpose and the conjugate gradients method.

The final section contains an interpretation of the Fredholm integral equation of the first type used to reconstruct the temperature and stress distribution; a proprietary method is proposed to determine the variable stress distribution at a variable ambient temperature.

In summary, this work presents a comprehensive approach to the problems associated with measurements of selected non-electrical quantities using optoelectronic sensors with a closed optical path and fiber optic segments on which periodic changes in the refractive index have been induced in the form of Bragg gratings. The dependence of the sensor parameters on temperature is also considered. The work describes systems and methods allowing for temperature-independent measurements or simultaneous measurements of a given non-electrical quantity and temperature.