



DOI: 10.5604/20830157.1176580

UKŁADY PRZESŁUCHUJĄCE MULTIPLEKSOWANE ŚWIATŁOWODOWE CZUJNIKI BRAGGA

Damian Harasim, Piotr Kisała

Politechnika Lubelska, Instytut Elektroniki i Techniki Informatycznej

Streszczenie. Czujniki oparte o światłowodowe siatki Bragga (FBG) znajdują zastosowanie jako wiarygodne, nieniszczące narzędzie do monitorowania, diagnozowania i kontroli w wielu konstrukcjach. Mnogość możliwości zastosowania czujników światłowodowych stanowi główną zaletę w porównaniu do innych technologii używanych do badań struktury materiałów. Umieszczenie wielu siatek o różniących się długościach fali Bragga na jednym włóknie stwarza możliwość budowy sieci rozłożonych czujników, dzięki czemu możliwe jest określenie zarówno wartości mierzonej wielkości jak i przestrzennej lokalizacji miejsca oddziaływania. Układy przesłuchujące są odpowiedzialne za odczytywanie przesunięcia długości fali Bragga siatki, powodowanego przez zmianę parametrów fizycznych takich jak temperatura, naprężenie. Analiza przeprowadzona w ramach tej pracy może posłużyć jako źródło użytecznych wiadomości dla praktycznych zastosowań.

Słowa kluczowe: Światłowod, siatka Bragga, FBG, układy przesłuchujące, WDM, TDM, czujniki optyczne

СИСТЕМИ ПРОСЛУХОВУВАННЯ МУЛЬТИПЛЕКСОВАНИХ ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИХ ДАТЧИКІВ БРЕГГА

Анонція. датчики в основі яких є волоконні брегговські решітки (ВБР) використовуються в якості надійного, неруйнівного інструменту для моніторингу, діагностики та контролю в багатьох конструкціях. Волоконно-оптичні датчики мають багато можливостей для використання, це їх основна перевага в порівнянні з іншими технологіями, що використовуються для вивчення структури матеріалів. Розміщення багатьох сіток з різними довжинами хвиль в одному волокні Брегга дозволяє побудувати мережу датчиків, це дає можливість визначити значення вимірюваної величини і просторове розташування місця взаємодії. Системи прослуховування несуть відповідальність за відчуття зсуву довжини хвилі сітки Брегга, створені зміною фізичних параметрів, таких як температура, напруга. Аналіз, проведений в рамках цієї роботи може бути корисним джерелом інформації для практичного застосування.

Ключові слова: Оптичне волокно, решітки Брегга, ВБР, системи прослуховування, WDM, TDM, оптичні датчики

INTERROGATION SYSTEMS FOR MULTIPLEXED FIBER BRAGG SENSORS

Abstract. Fibre Bragg grating (FBG) sensors have emerged as a reliable, non-destructive tool for monitoring, diagnostics and control in many structures. The versatility of FBG sensors represent a main advantage over other technologies in the structural sensing field. Mounting many fiber Bragg gratings with different central wavelengths on single fiber creates capacities for building arrays of distributed sensors thus it is possible to determine the magnitude of the measured value and a spatial location of the measurand change. The interrogation units are responsible for reading the Bragg wavelength shift of the FBGs induced by various physical parameters like strain, temperature, etc. This research can provide useful information for practical applications

Keywords: Optical fiber, fiber Bragg grating, FBG, interrogation, WDM, TDM, optical sensors

Wprowadzenie

Możliwość wykorzystywania systemów pomiarowych opartych o czujniki optyczne stanowi nową, interdyscyplinarną dziedzinę inżynierii zawierającą w sobie unikalną kombinację optoelektroniki, techniki laserowej, techniki światłowodowej, mikroelektroniki oraz inżynierii konstrukcji. Czujniki oparte o światłowodowe siatki Bragga (Fiber Bragg Gratings – FBG) są używane do pomiarów temperatury lub naprężenia. Najważniejszą cechą FBG jest przesuwanie się długości fali odbitego światła wraz ze zmianami parametru mierzonego. W ostatnich latach odnotować można duży wzrost zainteresowania oraz szybki rozwój czujników światłowodowych z uwagi na szereg posiadanych przez nie zalet w porównaniu do tradycyjnych rozwiązań elektronicznych. Cechy takie jak niski koszt wytwarzania, niewielkie rozmiary połączone z niewielką masą, odporność na działanie pola elektromagnetycznego sprawiają, że czujniki tego typu zdają się być idealne do tworzenia kompletnych systemów pomiarowych [6]. Niewielkie wymiary oraz niska masa pozwalają wbudować lub na stałe przytwierdzić czujniki do struktury poddawanej pomiarom.

W wielu zastosowaniach, czujniki światłowodowe umieszczone są w środowisku o zmiennej temperaturze. Wyeliminowanie wpływu temperatury na dokładność pomiaru odkształcenia jest jednym z problemów na jakie napotykać systemy pomiarowe przesłuchujące siatki Bragga. Jeżeli wpływ temperatury nie zostanie wzięty pod uwagę, jej zmiany będą powodować przesunięcie centralnej fali Bragga siatki a to spowoduje wystąpienie dodatkowej składowej błęd pomiarowego. Konwencjonalna metoda

Вступ

Можливість використовувати вимірювальні системи з оптичними датчиками, створює нову міждисциплінарну галузь інженерії, яка містить в собі унікальну комбінацію оптоелектроніки, лазерної техніки, волоконної оптики, мікроелектроніки та інженерного проектування. Датчики в основі яких є волоконні брегговські решітки (Fiber Bragg Gratings – FBG) використовуються для вимірювання температури або напруги. Важливою особливістю FBG є пересування довжини хвилі відбитого світла зі зміною вимірюваного параметра. В останніх роках, зростає інтерес і відбувається стрімкий розвиток волоконно-оптичних датчиків, бо вони мають багато переваг порівняно з традиційними електронними рішеннями. Переваги такі, як низька вартість виробництва, малий розмір в поєднанні з малою вагою, стійкість до електромагнітних полів, тому датчики цього типу є ідеальним для створення повної системи вимірювань [6]. Малі розміри і невелика вага дозволяють вбудувати або назавжди прикріпити датчики до структури, яка підлягає вимірюванню.

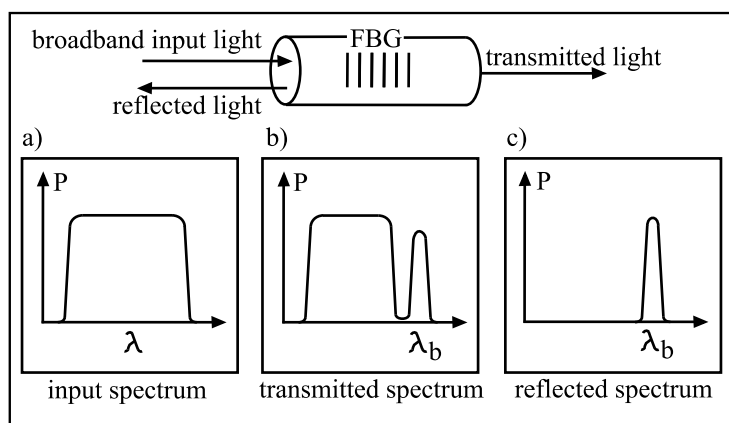
У багатьох місцях використання, датчики волоконно-оптичні розміщені в середовищі де змінюється температура. Усунення впливу температури на точність вимірювання є однією з проблем, з якою стикаються системи вимірювання брегговських решіток. Якщо вплив температури, не буде прийматися до уваги, то зміни будуть викликати порушення довжини центральної хвилі сітки Брегга і це призведе до додаткового компоненту помилки виміру. Звичайним

oceny wpływu zmian temperatury na układ pomiarowy polega na użyciu drugiej, identycznej FBG w tym samym środowisku. Dzięki temu zabiegowi, możliwe jest wyodrębnienie informacji o przesunięciu fali Bragga spowodowanym zmianą temperatury otoczenia. Umożliwia to odczyt zmian odkształcenia obciążony minimalnym błędem pochodzącym od zmiennych warunków pomiaru. W układzie mierzącym odkształcenie belki, przykładem niwelowania wpływu temperatury na jakość pomiaru jest umieszczenie czujników światłowodowych na przeciwnych stronach wyginanego elementu co sprawia, że siatki Bragga poddawane są odkształceniemu identycznemu co do wartości lecz działającym w przeciwnych kierunkach [7].

Czujniki wykorzystujące zjawisko przesunięcia fali Bragga wymagają zastosowania wyrafinowanego oprzyrządowania takiego jak analizatory widma (Optical Spectrum Analyzer OSA) umożliwiające bezpośredni odczyt długości fali odbitego światła lub demodulatorów których zadaniem jest konwersja przesunięcia długości fali na zmianę napięcia lub prądu elektrycznego. Oprzyrządowanie tego typu z reguły jest bardzo kosztowne a szybkość pomiaru jest ograniczona przez szybkość skanowania filtra lub lasera regulowanego. Technologia siatek Bragga może być z powodzeniem wykorzystywana do pomiarów wielopunktowych dzięki wykorzystaniu techniki multipleksowania z podziałem długości fali [3].

1. Punktowe czujniki z siatką Bragga

Światłowodowa siatka Bragga to periodyczna zmiana współczynnika załamania w rdzeniu jednomodowego włókna optycznego. Światło wprowadzane jest do włókna za pomocą szerokopasmowego źródła. Siatka odbija część światła o określonym, wąskim zakresie długości fali. Widmo światła transmitowanego przez FBG pozbawione jest części odpowiadającej światłu odbitemu co zostało pokazane na rys. 1. Rysunek ten ukazuje schematycznie strukturę siatki Bragga oraz widma światła: a) wprowadzonego, b) transmitowanego, c) odbitego. Szerokość widma światła odbitego przez siatkę jest uzależniona od kilku parametrów, szczególnie od długości siatki. Typowo, szerokość widma światła odbitego dla większości zastosowań w układach pomiarowych wynosi od $\sim 0,05$ do $\sim 0,3$ nm [4].



Rys. 1. Widma światła transmitowanego i odbitego siatki Bragga [6]

Мал. 1. Спектри світла подаваного і відбитого брегговськими решітками [6]

Podstawą funkcjonowania układów pomiarowych opartych o światłowodowe siatki Bragga jest monitorowanie przesunięcia długości fali światła odbitego od FBG wywołanego przez zmianę mierzalną (temperatury, odkształcenia). Długość centralnej fali światła odbitego od FBG (fali Bragga) wyrażona jest przez

$$\Lambda_B = 2\eta\Lambda \quad (1)$$

gdzie Λ jest okresem siatki a η jest efektywnym współczynnikiem załamania rdzenia światłowodu dla środkowej długości fali [6].

методом оцінки впливу змін температури на вимірювальну систему є використання другої, ідентичної FBG в тому ж середовищі. Завдяки цьому, можна витягнути інформацію про зсув довжини хвилі Брегга, через зміни в температурі навколишнього середовища. Це дозволяє відчитати ці зміни обтяжені мінімальною помилкою, яка походить зі змінних умов вимірювання. В системі вимірювання деформації балки, прикладом виключення впливу температури, на якість вимірювання, є розташування волоконно-оптичних датчиків на протилежних сторонах гнучкого елемента, це призводить, що брегговські решітки піддаються однаковій деформації, яка діє в протилежному напрямку [7].

Датчики, що використовують явище порушення довжини хвилі Брегга вимагають складної апаратури, наприклад, аналізаторів спектру (Optical Spectrum Analyzer OSA), яка дозволяє пряме зчитування довжини хвилі відбитого світла або демодуляторів, завдання яких полягає в перетворенні зрушення довжини хвилі на зміну напруги або електричного струму. Інструменти цього типу, як правило, дуже дорогі, а швидкість вимірювань обмежена швидкістю сканування фільтра або регульованого лазера. Технологія решіток Брегга може бути успішно використана для мульти-вимірювань за допомогою методики мультиплексування зі спектральним розділенням [3].

1. Пунктові датчики з решіткою Брегга

Волоконно-оптична решітка Брегга є періодичною зміною показника заломлення в основі одномодового оптичного волокна. Світло вводиться у волокно з використанням ширококутового джерела. Сітка відбиває частину світла з певною, вузькою областю довжини хвилі. Спектр світла, який пройшов через FBG поzbавлені частини, що відповідає відбитому світлу, як показано на мал. 1. Цей малюнок схематично показує структуру брегговської решітки, і спектр світла: а) введеного, б) переданого, в) відбитого. Ширина спектра світла, відбитого від решітки залежить від декількох параметрів, зокрема, довжини сітки. Як правило, ширина спектра відбитого світла для більшості застосувань в системах виміру коливається від $\sim 0,05$ до $\sim 0,3$ nm [4].

Системи вимірювання функціонують на основі брегговських решіток, які контролюють зсув довжини хвилі світла, відбитого від FBG викликані змінами (температури, деформацією). Довжина центральної хвилі світла, відбитого від FBG (хвилі Брегга) виражається

де Λ являє собою період решітки, η являє собою ефективний показник заломлення серцевини волокна, для центральної довжини хвилі [6].

Pojawienie się naprężenia oddziaływującego na FBG powoduje zmianę długości centralnej fali Bragga o wartość wyrażoną wzorem:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - \rho_e)\varepsilon \quad (2)$$

gdzie ε jest wzdłużnym odkształceniem jakiego poddana zostaje siatka, ρ_e jest stałą fotoelastyczną dla materiału z jakiego został wykonany rdzeń światłowodu. Wartość ρ_e wyrażona jest przez

$$\rho_e = \frac{\eta^2}{2} [\rho_{12} - \nu(\rho_{11} + \rho_{12})] \quad (3)$$

gdzie ν jest współczynnikiem Poissona a ρ_{ij} jest współczynnikiem składowej napięcia fotoelastycznego krzemu. Dla FBG z centralną długością fali 1550 nm, typowa czułość wynosi około 0,0011 nm/ $\mu\varepsilon$ [10].

Istotny wpływ na długość fali Bragga ma temperatura jakiej poddawana jest część włókna z FBG. Przesunięcie długości centralnej fali Bragga wywołana przez zmianę temperatury wyrażone jest przez

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (\alpha + \xi)\Delta T \quad (4)$$

gdzie ΔT wyraża zmianę temperatury w miejscu umieszczenia siatki Bragga, ξ jest współczynnikiem termo-optycznym a α wyraża rozszerzalność cieplną materiału. Typowa czułość temperatury FBG o centralnej długości fali równej 1550 nm wynosi około 0,0112 nm/ $^{\circ}\text{C}$ [10].

Jednym z parametrów charakteryzujących pracę siatki Bragga jest współczynnik odbicia. Wartość współczynnika odbicia rośnie wraz ze wzrostem długości siatki, w skutek większej ilości odbić. Ponadto, wydłużanie siatki powoduje zawężenie pasma charakterystyki widmowej. Parametrem decydującym o własnościach transmisyjnych siatki jest również głębokość modulacji współczynnika załamania, której wzrost oznacza zwiększenie energii fali odbitej w obszarze siatki i tym samym wzrost współczynnika odbicia [2].

2. Zwielokrotnienie FBG z podziałem długości fali

Wśród różnych technik zwielokrotnienia czujników FBG, jedną z najczęściej stosowanych jest multipleksowanie z podziałem długości fali (Wavelength-Division Multiplexing WDM). Maksymalna liczba czujników umieszczonych na pojedynczym włóknie światłowodowym jest ograniczona przez zakres spektrum szerokopasmowego źródła światła oraz zakres w jakim może zmieniać się centralna fala Bragga każdej z siatek. Każdemu z czujników przypisane jest niezależne okno o określonych długościach fali. Dla układu pomiarowego mierzącego odkształcenia w zakresie od 0 do 10 000 $\mu\varepsilon$, na pojedynczym włóknie światłowodowym możliwe jest umieszczenie 5 czujników [1].

2.1. Przesłuchiwanie czujników Bragga za pomocą siatek filtrujących

Istnieje silna potrzeba rozwijania metod pozwalających w tani sposób przesłuchiwać światłowodowe czujniki Bragga. Jedną z proponowanych metod jest użycie izolowanej FBG, której centralna długość fali może być w kontrolowany sposób zmieniana. Podstawową operacją przy takiej technice, jest użycie siatki przesłuchującej jako filtru zaporowego silnie odbijającego światło powracające od czujnika Bragga. Aby tego dokonać, konieczne jest wytworzenie dwóch siatek o identycznej wartości długości centralnej fali Bragga. Przesunięcie długości fali światła odbitego od elementu pomiarowego wywołane odkształceniem może być „śledzone” przez odbiorczy filtr zaporowy. Dokonuje się tego przez kontrolowane odkształcanie siatki filtrującej za pomocą np. piezoelektrycznych aktuatorów do tego momentu, aż długości fal Bragga obu siatek pokryją się. Używając tej techniki, możliwe jest zastosowanie wielu czujników Bragga na pojedynczym włóknie. W takim wypadku, konieczne jest stworzenie filtru zaporowego złożonego z FBG o identycznych długościach centralnej fali Bra-

gga. Pojawienie się naprężenia oddziaływującego na FBG powoduje zmianę długości centralnej fali Bragga o wartość wyrażoną wzorem:

gdzie ε pozdłużnia deformacja, której podlega siatka, ρ_e jest stałą fotoelastyczną dla materiału z jakiego została wygotowana serce włókna. Wartość ρ_e wyrażona jest przez

gdzie ν współczynnik Poissona, a ρ_{ij} współczynnik komponentu naprężenia fotoelastycznego krzemu. Dla FBG z centralną długością fali 1550 nm, typowa czułość ε wynosi około 0,0011 nm/ $\mu\varepsilon$ [10].

Znaczny wpływ na długość fali Bragga ma temperatura, która działa na część włókna FBG. Przesunięcie długości centralnej fali Bragga, wywołane zmianą temperatury wyrażone jest przez

gdzie ΔT wyraża zmianę temperatury w miejscu braggowych siatek, ξ termo-optyczny współczynnik, a α wyraża rozszerzalność cieplną materiału. Typowa czułość temperatury FBG o centralnej długości fali 1550 nm wynosi około 0,0112 nm/ $^{\circ}\text{C}$ [10].

Jednym z parametrów charakteryzujących pracę siatki Bragga jest współczynnik odbicia. Wartość współczynnika odbicia rośnie wraz ze wzrostem długości siatki, w skutek większej ilości odbić. Ponadto, wydłużanie siatki powoduje zawężenie pasma charakterystyki widmowej. Parametrem decydującym o własnościach transmisyjnych siatki jest również głębokość modulacji współczynnika załamania, której wzrost oznacza zwiększenie energii fali odbitej w obszarze siatki i tym samym wzrost współczynnika odbicia [2].

2. Multipleksowanie FBG z podziałem spektrum fali

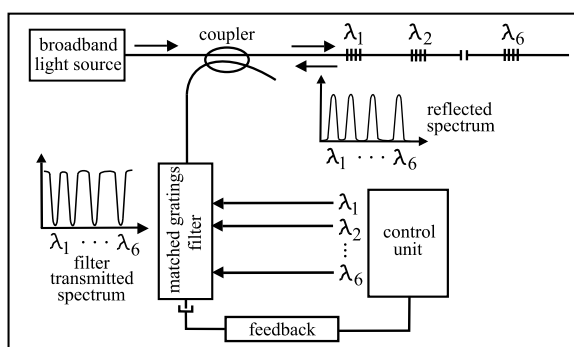
Sеред різних методів multipleksування датчиків FBG, одним з найбільш поширених є multipleksування з поділом довжини хвилі (Wavelength-Division Multiplexing WDM). Максимальна кількість датчиків розміщених на одному оптичному волокну є обмежена широкосмуговим спектром джерела світла і ступенем в якому може змінюватися центральна хвиля Bragga кожної з мереж. Кожен датчик має незалежне вікно з певною довжиною хвилі. Система для вимірювання деформації в межах від 0 до 10 000 $\mu\varepsilon$, на одному оптичному волокну, може розмістити 5 датчиків [1].

2.1. Прослуховування датчиків Bragga за допомогою фільтруючих решіток

Існує необхідність у розробці методів які дозволять на дешевий спосіб прослуховування волоконних датчиків Bragga. Один із запропонованих методів полягає на використанні ізольованої FBG, тоді центральна довжина хвилі може бути змінена контрольованим чином. Цей метод полягає у використанні сітки, в якості бар'єрного фільтра, який сильно відбиває світло, що повертається з датчика Bragga. Щоб досягти цього, необхідні дві мережі однакової довжини центральної хвилі Bragga. Порушення довжини хвилі світла, відбитого від чутливого елемента вимірювання, викликане деформацією, може бути "відстежуване" бар'єрним фільтром, який приймає. Це робиться шляхом контрольованої деформації фільтруючої сітки, за допомогою, напр. п'єзоелектричних приводів до того моменту, поки довжини хвилі Bragga двох сіток перекриються. Застосовуючи цю техніку, можливим є використання багатьох датчиків Bragga на одному волокну. У цьому випадку, необхідно створити

gga jak siatki zastosowane jako czujniki przy czym, każda z siatek filtrujących musi być niezależnie dostrajana tak, by możliwe było znalezienie długości fali światła odbitego od korespondującego z nią elementu mierzacego [5].

Przykładowe zestawienie układu pomiarowego wykorzystującego zasadę opisaną wyżej pokazane jest za rys. 2. Światło wprowadzone do włókna przez superluminescencyjne źródło kierowane jest przez sprzączacz do układu pomiarowego. Czujnik składa się z sześciu połączonych szeregowo siatek Bragga o długościach fali Bragga wynoszących od 1530 do 1570 nm rozdzielonych o ~ 5 nm. Światło odbite od układu siatek pomiarowych kierowane jest na filtr składający się z FBG wykonanych dla identycznych długości centralnych fali odbitego światła. Na wyjściu tego filtru umieszczony został fotodetektor przekształcający moc optyczną sygnału na wartość napięcia elektrycznego.



Rys. 2. Zestawienie układu przesłuchującego światłowodowe czujniki Bragga przy użyciu regulowanego filtra zaporowego [5]
Мал. 2. Система прослуховування волоконних брегговських датчиків при застосуванні регульованого бар'єрного фільтру [5]

W warunkach początkowych, przy zerowym odkształceniu wszystkich siatek, moc rejestrowana przez fotodetektor jest znikoma. W momencie wystąpienia zmian naprężenia w siatce pomiarowej, moc optyczna zwiększa się. Na podstawie zmierzonej wartości napięcia, układ sterujący siatkami wewnątrz filtru zaporowego dostraja niezależnie każdą z siatek aż do momentu zminimalizowania mocy światła padającego na fotodetektor.

2.2. Interrogacja przy użyciu filtru Fabry-Perota

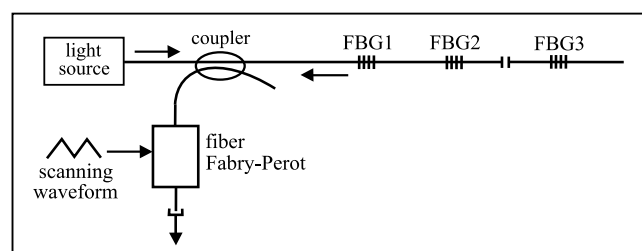
Jedną z najbardziej rozwiniętych technik przesłuchiwania czujników FBG jest użycie filtru o regulowanym paśmie przeniesienia do śledzenia sygnału odbitego od czujników. Powszechnie stosowaną metodą jest zastosowanie filtrów Fabry-Perota (FP). System oparty o skanujący filtr FP schematycznie pokazany został na rys. 3.

Światło odbite od każdego czujnika FBG przechodzi przez filtr, który przepuszcza wąskie pasmo światła o konkretnej długości fali która zależy od odległości pomiędzy elementami lustrzanymi filtru. Regulacja odległości pomiędzy lustrami, możliwa jest dzięki elektronicznie sterowanym piezoelektrycznym stosom, co pozwala dostrajać transmitowane przez filtr długości fali. Podczas dostrajania filtru, pasmo przeniesienia skanuje sygnał światła odbitego od czujników Bragga. Długości centralnej fali Bragga światła odbitego od sensorów jest wyznaczana przez pomiar mocy optycznej sygnału transmitowanego przez FP.

Typowe filtry Fabry-Perota charakteryzują się zakresem skanowanego pasma na poziomie 50 nm o szerokości $\sim 0,3$ nm. Przy zastosowaniu na wyjściu takiego układu przetwornika analogowo-cyfrowego możliwa do uzyskania rozdzielczość pomiaru przesunięcia długości fali odbitej przez czujnik wynosi około 0,8 pm.

бар'єрний фільтр, що складається з FBG із однаковими довжинами центральної хвилі Брегга, як сітки, використовуваної в якості датчиків, при чому кожна з сіток фільтра повинна бути індивідуально налаштована, таким чином, щоб мати можливість знайти довжину хвилі світла, відбитого від відповідного засобу вимірювання [5].

Приклад порівняння виміральної системи з використанням принципу, описаного вище, показаний на мал. 2. Світло вводиться у волокно через суперлюмінесцентне джерело спрямоване через з'єднувач до виміральної системи. Датчик складається з шести послідовно з'єднаних решіток Брегга з довжиною хвиль від 1530 до 1570 nm, розділених ~ 5 nm. Світло, відбите від виміральної сітки направлено на фільтр, що складається з решіток Брегга зроблених для центральної хвилі відбитого світла однакової довжини. На виході цього фільтра поміщають фотодетектор, що перетворює оптичну напругу сигналу на значення електричної напруги.



Rys. 3. Układ przesłuchujący czujniki Bragga z użyciem filtru Fabry-Perota [4]
Мал. 3. Система прослуховування датчиків Брегга з використанням фільтра Фабрі-Перо [4]

На початку при нульовій деформації всіх сіток, сила реєстрована фотоприймачем є незначна. В моменті зміни напруги в сітці вимірювання, оптична потужність збільшується. На підставі виміряного значення напруги, система, яка керує сітками в середині бар'єрного фільтра, регулює незалежно кожен з сіток, аж до моменту мінімізації потужності світла, що падає на фотоприймач.

2.2. Інтеррогація при застосуванні фільтра Фабрі-Перо

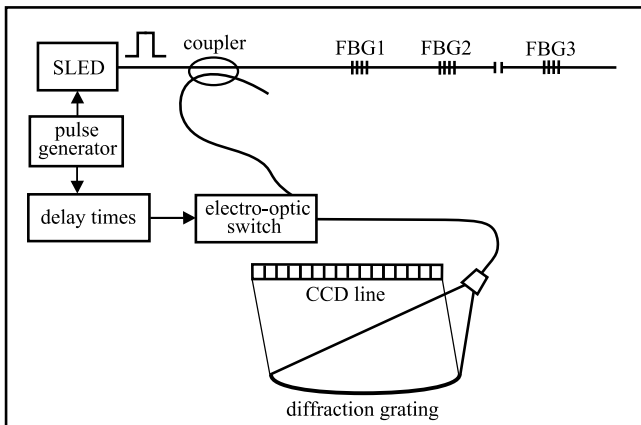
Одним з найбільш розвинених методів прослуховування датчиків FBG є використання фільтра з регульованою смугою пропускання, для відстеження відбитого сигналу від датчиків. Поширеним методом є використання фільтра Фабрі-Перо (FP). Система має в своїй основі фільтр для сканування FP схематично показаний на мал. 3.

Світло, відбите від кожного датчика FBG проходить через фільтр, який пропускає вузьку смугу світла, хвилі певної довжини, яка залежить від відстані між дзеркалом фільтра. Регулювання відстані між дзеркалами стало можливим завдяки електронному управлінні п'єзоелектричних стеків, це дозволяє точно налаштувати передану через фільтр довжину хвилі. При налаштуванні фільтр сканує смуги сигналу світла, відбитого від датчиків Брегга. Довжина центральної хвилі Брегга, відбитого світла від датчиків визначається, шляхом вимірювання оптичної потужності сигналу, що передається FP.

Типові фільтри Фабрі-Перо характеризуються діапазоном сканованої смуги 50 nm, шириною $\sim 0,3$ nm. При використанні на виході такої системи 16-бітного перетворювача аналого-цифрового, можна отримати роздільну здатність виміру зрушення довжини хвилі відбитої датчиком приблизно 0,8 pm.

2.3. Multiplexowanie FBG metodą podziału czasu

Ograniczenie liczby czujników umieszczonych na pojedynczym włóknie optycznym w metodzie WDM przyczyniło się do rozwoju techniki „Time-Division Multiplexing” (TDM). Zastosowanie takiego mechanizmu pozwala na umieszczenie szeregowo dziesiątek lub nawet setek siatek Bragga o niskim współczynniku odbicia [1]. Wszystkie FBG mogą być wykonane dla takiej samej centralnej długości fali światła odbitego. Rysunek 4. przedstawia zestawienie typowego układu wykorzystującego TDM.



Rys. 4. Typowe zestawienie układu wykorzystującego metodą TDM [1]
Мал. 4. Типова система з використанням методу TDM [1]

Kiedy impuls światła transmitowany jest przez kolejne czujniki Bragga umieszczone w różnych odległościach od źródła, każdy z nich odbija niewielką jego część. Odbite impulsy światła o określonych długościach fal trafiają przez sprzęgacz na przełącznik optyczny z opóźnieniem określonym przez

$$\tau_i = 2nL_i / c \quad (5)$$

gdzie c oznacza prędkość światła w próżni a L_i oznacza dystans pomiędzy źródłem a i -tym czujnikiem Bragga. Czas opóźnienia załączenia przełącznika optycznego jest dobierany dla wybranej siatki. Widmo światła odbitego od niej jest rejestrowane przez detektor CCD. Zmiana długości czasu opóźnienia odpowiadającego odległości czujnika od źródła, pozwala na rejestrację widma odbitego od każdej FBG umieszczonej w badanej strukturze. Dla czujników Bragga umieszczonych w niewielkich odległościach, przerwa pomiędzy impulsami pochodzącymi od kolejnych siatek może okazać się zbyt krótka dla przełącznika optycznego bramkowanego elektronicznie.

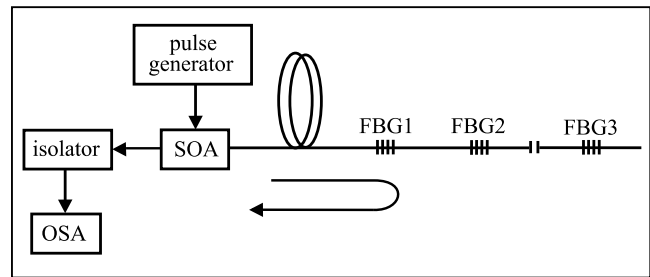
Alternatywą dla przełączników sterowanych elektronicznie są systemy sterowane optycznie. Układy TDM z bramkowaniem optycznym wyposażane są w półprzewodnikowe wzmacniacze optyczne ang. Semiconductor Optical Amplifier (SOA). Rysunek 5 przedstawia schemat układu pomiarowego wykorzystującego SOA. W układzie przesłuchującym system TDM, wzmacniacz optyczny sterowany jest przez programowany generator impulsowy, w konfiguracji zapewniającej krótkie impulsy o wysokiej mocy.

Podczas pierwszego załączenia SOA, układ sterujący wymusza wyemitowanie przez wzmacniacz krótkiego, szerokopasmowego impulsu optycznego wykorzystując zjawisko emisji spontanicznej.

W tym czasie SOA jest używany wyłącznie jako źródło światła. Wygenerowany szerokopasmowy impuls światła przemieszcza się w kierunku czujników FBG umieszczonych w odległościach L_i . Kiedy światło dociera do siatki, niewielka jego część zostaje odbita i skierowana z powrotem do SOA. Czas potrzebny na propagację sygnału od źródła do FBG i z powrotem określa wzór (5). W chwili czasowej w której sygnał odbity trafia do SOA, układ sterujący ponownie załącza wzmacniacz co pozwala na wzmocnienie sygnału optycznego. Wzmocniony sygnał przecho-

2.3. Мультиплексування FBG методом розподілу часу

Обмежена кількість датчиків розміщена на одному оптичному волокну в методі WDM стала причиною розвитку техніки „Time-Division Multiplexing” (TDM). Використання такого механізму дозволяє розмістити десятки або навіть сотні решіток Брегга з низькою відбитною здатністю [1]. Всі FBG можуть бути виконані для тієї ж центральної довжини хвилі відбитого світла. На малюнку 4 показано типову систему з використанням TDM.



Rys. 5. Schemat bramkowanego optycznie układu przesłuchującego FBG w systemie Time-Division Multiplexing [1]
Мал. 5. Схе́ма оптично закритої системи прослуховування FBG в системі Time-Division Multiplexing [1]

Коли імпульс світла передається через наступні датчики Брегга, розташовані на різних відстанях від джерела, кожен з яких відображає невелику його частину. Відображені імпульси світла на певних довжинах хвиль проходять через з'єднання з оптичним перемикачем із затримкою, що визначається

де c швидкість світла у вакуумі, L_i відстань між джерелом і датчиком Брегга. Час затримки оптичного перемикача, вибраний для конкретної сітки. Спектр світла, відбитого від неї записується через детектор в ПЗС. Зміна довжини часу затримки, яка є відповідною відстанню датчика від джерела, дозволяє реєструвати спектр відбитого від кожної FBG, поміщеної в тестовій структурі. Для датчиків Брегга, розташованих на коротких відстанях, інтервали між імпульсами, отриманими з наступних мереж, можуть бути занадто коротким для електронного закритого оптичного перемикача.

Альтернатива для перемикачів, якими керують електронно є системи якими керують оптично. Системи TDM з оптичним замикачем, оснащені в напівпровідникові оптичні підсилювачі, називаються англ. Semiconductor Optical Amplifier (SOA). Мал.5 являє собою схематичне зображення системи вимірювання з використанням SOA. В системі прослуховування TDM, оптичний підсилювач управляється програмованим генератором імпульсів в конфігурації, що забезпечує короткі імпульси високої потужності.

Коли вперше включите SOA, контролер змушує підсилювач подавати короткий, широкопasmовий оптичний імпульс використовуючи явище спонтанного випромінювання.

У той час, SOA використовується тільки, як джерело світла. Генерований високошвидкісний світловий імпульс проходить у напрямку датчиків FBG, розташованих на відстанях L_i . Коли світло досягає сітки, невелика його частина відбивається і прямує назад до SOA. Час, необхідний для поширення сигналу від джерела до FBG і назад, визначається за формулою (5). У той час, коли відбитий сигнал потрапляє до SOA, система управління повторно включає підсилювач, який дозволяє посилення оптичного сигналу. Посилений

dzi przez izolator uniezależniający wzmocnienie od odbić i może być obserwowany za pomocą analizatora widma. Czas opóźnienia τ_i generatora impulsowego może być regulowany dzięki czemu możliwe jest niezależne przesłuchiwanie każdej z siatek umieszczonych w strukturze pomiarowej. SOA może pracować w trybie szybkiego przełączania z minimalnym czasem przełączania równym ~ 1 ns.

3. Analiza wydajności układu przesłuchowego pod kątem ilości czujników na pojedynczym włóknie

Wobec powszechnego zastosowania techniki Wavelength Division Multiplexing, zasadne jest przeprowadzenie analizy ilości czujników FBG możliwych do umieszczenia na pojedynczym włóknie światłowodowym. Głównym zadaniem podczas projektowania tego typu systemu pomiarowego, jest wytworzenie siatek Bragga o centralnych długościach fali różniących się o wartości zapewniające brak zachodzenia widm światła odbitego od kolejnych siatek. Konieczne jest zapewnienie możliwości bezspornego odseparowania poszczególnych pików odbiciowych pochodzących od poszczególnych siatek przy skrajnych wartościach wielkości mierzonej.

Światło propagując wzdłuż włókna światłowodowego traci część mocy wejściowej. Zjawisko to nazywamy tłumiennością włókna optycznego. Wartość strat na kilometr jest silnie uzależniona od długości fali światła jakie jest wprowadzane do światłowodu. W telekomunikacji najczęściej używanymi zakresami długości fali są: zakres konwencjonalny 1530 – 1565 nm oraz zakres fal długich 1565 – 1625 nm. Pasma te zapewniają niski stopień strat w światłowodzie krzemowym oraz zapewniają kompatybilność z obecnie stosowanymi na rynku wzmacniaczami optycznymi domieszkowanymi erbem [8]. Z tego powodu, do analizy ilościowej czujników Bragga możliwych do wbudowania w pojedynczym włóknie wybrany został zakres długości fal od 1530 do 1625 nm. Zakładamy również, że pomiar mocy optycznej sygnału odbywa się przy pomocy urządzeń elektronicznych, zatem konieczne jest zapewnienie absolutnego braku zachodzenia na siebie widm światła odbitego od kolejnych siatek.

3.1. Obliczenia dla warunku maksymalnego odkształcenia

Poniższa analiza przeprowadzona została przy założeniu, że współczynnik odbicia badanej siatki równy jest 1 oraz, że światło o długościach fali innych niż długość fali Bragga transmitowane jest przez siatkę bezstratnie. Dla maksymalnego odkształcenia równego 8000 $\mu\epsilon$, biorąc po uwagę czułość siatki Bragga na poziomie 0,0011 nm/ $\mu\epsilon$, przesunięcie długości centralnej fali wynosi 8,8 nm. Mając na uwadze, że szerokość widma odbitego od FBG w najszerszym miejscu charakterystyki dla typowych, komercyjnych siatek wynosi ok. 0,4 nm, szerokość okna zajmowanego przez jedną FBG umożliwiającą jednoznaczne odseparowanie widm odbiciowych kolejnych siatek wynosi 9,2 nm. Rysunek 6 schematycznie ukazuje ideę niezależnego okna o wybranych długościach fal dla każdej z siatek.

Biorąc pod uwagę szerokość użytecznego pasma długości fal wynoszącą 195 nm, oraz szerokość okna przypisanego każdej z siatek Bragga na poziomie 9,2 nm, dla danych warunków początkowych możliwe jest umieszczenie 10 czujników, gdzie nie ma możliwości zachodzenia widm sąsiednich siatek dla skrajnych wartości wielkości mierzonej.

сигнал проходить через зміцнений ізолятор унезалежнюючий посилення віддзеркалень і може спостерігатися за допомогою аналізатора спектра. Генератор імпульсів часу затримки τ_i можна регулювати таким чином, що можна незалежно прослуховувати кожну з сіток, розміщених в вимірювальній структурі. SOA може працювати в режимі швидкого перемикавання з мінімальним часом перемикавання, рівним ~ 1 ns.

3. Аналіз ефективності системи прослуховування з точки зору кількості датчиків на одному оптичному волокні

У зв'язку з широким застосуванням технології Wavelength Division Multiplexing, доцільно аналізувати кількість датчиків FBG, які можуть бути розміщені на одному волокні. Основним завданням при проектуванні цього типу вимірювальної системи є утворення решіток Бреґа з центральною довжиною хвилі різного забезпечення значень, без перекриття спектрів світла, відбитого від послідовних сіток. Необхідно забезпечити можливість відокремлення конкретних піків відображення, отриманих з окремих сіток, при крайніх значеннях вимірюваної величини.

Світло, що поширюється вздовж волокна втрачає частину вхідної потужності. Це явище називається ослабленням оптичного волокна. Значення втрат на кілометр сильно залежить від довжини хвилі світла, яке вводиться в оптичне волокно. В області телекомунікації, найчастіше використовуваним діапазоном довжин хвилі є: звичайний діапазон 1530 – 1565 нм, діапазон довгохвильовий 1565 – 1625 нм. Ці смуги забезпечують низький рівень втрат в волокнах кремнію і сумісність, з використовуваними на ринку, оптичними підсилювачами легованих ербієм [8]. З цієї причини, кількісний аналіз датчиків Бреґа, які можуть бути встановлені в одному волокні, при вибраному діапазоні довжин хвиль від 1530 до 1625 нм. Припустимо також, що вимірювання сигналу оптичної потужності здійснюється за допомогою електронних пристроїв, так що необхідно забезпечити абсолютну відсутність перекриття між спектрами світла, відбитого від послідовних сіток.

3.1. Розрахунки для стану максимальної деформації

Наступний аналіз проводили на припущенні про те, що відбивна здатність досліджуваної сітки дорівнює 1, і що світло в інших, ніж довжина хвилі Бреґа довжинах хвиль передається через сітку без втрат. Для максимального відхилення, що дорівнює 8000 $\mu\epsilon$, беручи до уваги чутливість решітки Бреґа на рівні 0,0011 nm/ $\mu\epsilon$, довжина зсуву центральної хвилі складає 8,8 nm. Беручи до уваги, що ширина спектра відбитого від FBG в найширшому місці характеристики для типових комерційних сіток становить бл. 0,4 nm, ширина вікна, яке займає одна FBG дозволяє однозначний поділ спектрів, відбиття послідовних сіток становить 9,2 nm. Мал. 6 схематично показує концепцію незалежного вікна з вибраними довжинами хвиль для кожної з сіток.

Враховуючи ширину використовуваної смуги, довжина хвиль становить 195 nm і ширина вікна, приписана кожній з сіток Бреґа 9,2 nm, при даних умовах можна помістити 10 датчиків, де немає можливості перекриття спектрів сусідніх сіток для крайніх значень вимірюваної величини.

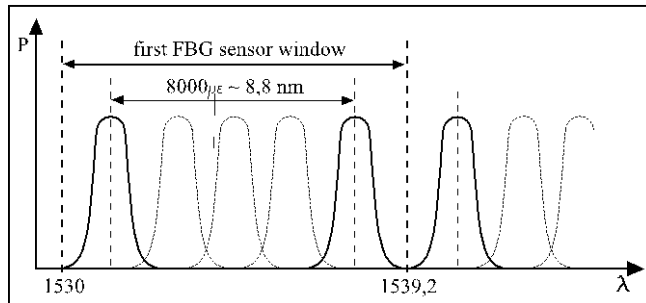
3.2. Obliczenia dla założonej różnicy temperatur

Analizę ilości możliwych do wbudowania w pojedynczym włóknie czujników Bragga przy założonych maksymalnych zmianach temperatury przeprowadzić można podobnie jak w poprzednim przypadku. Zakładamy zmiany temperatury badanej struktury od -50 do 150°C oraz identyczną jak w poprzednim przypadku użyteczną szerokość pasma długości fal wynoszącą 195 nm. Biorąc pod uwagę czułość temperaturową siatki na poziomie $0,0112$ nm/ $^\circ\text{C}$, oraz szerokość widma światła odbitego o wartości $0,4$ nm, szerokość okna długości fal zajmowanego przez jedną FBG powinna wynosić $2,64$ nm. W przypadku zmian temperatury od -50°C należy zwrócić uwagę, że centralna długość fali pierwszej FBG w temperaturze -50°C powinna wynosić ok. $1530,2$ nm, co za tym idzie, podczas procesu jej wytwarzania w temperaturze 20°C , centralna długość fali Bragga powinna wynosić $1530 + 0,0112 \cdot 70 + 0,2$ czyli $1530,984$ nm. Biorąc pod uwagę powyższe założenia, dla zmian temperatury w zakresie -50 do 150°C , w paśmie $1530 - 1625$ nm możliwe jest wbudowanie 35 czujników FBG.

Określając szerokość pasma użytecznych długości fal λ_U oraz znając czułość temperaturową siatki Bragga s_T , możliwe jest wyznaczenie charakterystyki, obrazującej liczbę FBG możliwych do wbudowania na pojedynczym włóknie światłowodowym N w zależności od maksymalnych możliwych zmian temperatury ΔT . Rysunek 7 przedstawia wykres wyżej wymienionej zależności, przy założeniu szerokości widma światła odbitego od siatki na poziomie $0,4$ nm. Charakterystyka została wykreślona ze wzoru:

$$N = \frac{\lambda_U}{(s_T \cdot \Delta T) + 0,4} \quad (6)$$

dla zakresów maksymalnych zmian temperatury wynoszących od 50 do 450°C .



Rys. 6. Idea niezależnego okna długości fali dla każdej z FBG

Mal. 6. Idea niezależnego okna długości fali dla każdego z FBG

4. Podsumowanie

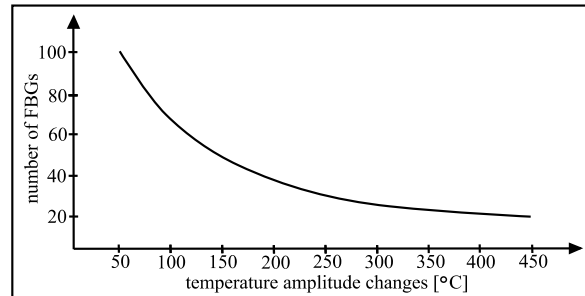
W ostatnich latach czujniki oparte o światłowodowe siatki Bragga podlegają intensywnym badaniom oraz rozwojowi w związku z szeregiem posiadanych przez nie zalet. Duża część tej pracy napędzana jest przez potrzebę rozwoju rozproszonych czujników odkształcenia do zastosowań w inteligentnych materiałach lub do pomiaru stanu technicznego dużych konstrukcji. W pracy przedstawiono kilka stosowanych metod przesłuchiwania czujników FBG multipleksowanych zarówno metodą WDM jak i metodą TDM. Przedstawiono również metodykę obliczania ilości siatek możliwych do wbudowania na pojedynczym włóknie światłowodowym dla multipleksacji WDM. Przy projektowaniu systemu pomiarowego z wieloma FBG na pojedynczym włóknie, należy pamiętać, że wykonane siatki Bragga muszą posiadać wysoki współczynnik transmisji światła o długościach fali innych niż centralna długość fali siatki.

3.2. Розрахунки для передбачуваної різниці температур

Аналіз кількості можливих для вбудовування в одне волокно датчиків Брегга з передбачуваними максимальними змінами температури може бути здійснено, як і в попередньому випадку. Припускаємо, зміну температури досліджуваної структури від -50 до 150°C , і таку ж, як і в попередньому випадку, корисну пропускну спроможність на довжині хвилі 195 nm. Беручи до уваги температурну чутливість сітки, на рівні $0,0112$ nm/ $^\circ\text{C}$, і ширину спектру відбитого світла $0,4$ nm, ширина вікна довжин хвиль, займаного однією FBG має бути $2,64$ nm. У разі зміни температури від -50°C , слід звернути увагу, що центральна довжина хвилі першої FBG при -50°C повинна бути прибіл. $1530,2$ nm, таким чином, в процесі підготовки на 20°C , центральна довжина хвилі Брегга повинна бути $1530 + 0,0112 \cdot 70 + 0,2$ або $1530,984$ nm. Враховуючи вище зазначене, для зміни температури в діапазоні від -50 до 150°C в межах $1530 - 1625$ nm, можна вбудувати 35 датчиків FBG.

При визначенні ширини корисної пропускну спроможності довжин хвиль λ_U і знаючи температурну чутливість решіток Брегга s_T , можна визначити характеристики, що ілюструють кількість FBG можливих, для оснащення на одному волокну N залежно від максимально можливої зміни температури ΔT . Мал. 7 показує графік, вищезгаданої залежності, за умови, що ширина спектра світла, відбитого від решітки на рівні $0,4$ nm. Характеристика була розрахована за формулою:

максимальні діапазони температури від 50 до 450°C .



Rys. 7. Залежність кількості решіток Bragga, які можуть бути вмонтовані в одне волокно в залежності від повного діапазону зміни температури

Mal. 7. Залежність кількості решіток Брегга, які можуть бути вмонтовані в одне волокно в залежності від повного діапазону зміни температури

4. Підсумок

В останні роки, датчики на основі волоконно-оптичних решіток Брегга є предметом інтенсивних досліджень і розробок у зв'язку з низкою переваг, які вони мають. Велика частина цієї роботи керована необхідністю розвитку розподілених датчиків деформації для застосування в інтелектуальних матеріалах і для вимірювання технічного стану великих конструкцій. В роботі наведено кілька методів, використовуваних для прослуховування FBG датчиків мультіплексованих, як методом WDM, так і TDM методом. Представлено методику розрахунку кількості сіток, які можуть бути побудовані на одному волокну для WDM мультіплексування. При проектуванні вимірювальної системи з багатьма FBG на одному волокну, слід пам'ятати, що решітки Брегга повинні мати високу швидкість передачі світла з іншою довжиною хвилі, ніж центральна довжина хвилі сітки.

Podziękowania

Praca powstała w ramach projektu *PL-NTU Transgraniczna wymiana doświadczeń* PBU.03.01.00-06-386/11-00 współfinansowanego w ramach Programu Współpracy Transgranicznej Polska – Białoruś – Ukraina 2007–2013 finansowanego ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Instrumentu Sąsiedztwa i Partnerstwa.

Niniejsza publikacja została stworzona przy pomocy Unii Europejskiej. Wyłączną odpowiedzialność za zawartość niniejszej publikacji ponoszą Damian Harasim i Piotr Kisala oraz w żaden sposób nie może być ona postrzegana jako odzwierciedlenie poglądów Unii Europejskiej.

Literatura || Література

- [1] 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*, vol. 47, 2009, 1028–1033.
- [2] Helsztyński J., Lewandowski L., Jasiewicz W., Jędrzejewski K.: System multiplexowanych braggowskich czujników światłowodowych. *Elektronika* 8/2009, 171–176.
- [3] Hirayama N., Sano Y.: Fiber Bragg grating temperature sensor for practical use, *ISA Transactions*, vol. 39, 2000, 169–173.
- [4] Kersey A. D., Davis M. A., Patrick H. J., Le Blanc M., Koo K. P., Askins C. G., Putnam M. A., Fiebele E. J.: Fiber Grating Sensors, *Journal of Lightwave Technology*, vol. 15, 1997, 1442–1463.
- [5] Lloyd G. D., Everall L. A., Sugden K., Bennion I.: Resonant Cavity Time-Division-Multiplexed Bragg Grating Sensor Interrogator, *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 16, 2004, 2323–2325.
- [6] 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*, vol. 147, 2008, 150–164.
- [7] Ng J. H., Zhou X., Yang X., Hao J.: A simple temperature-insensitive fiber Bragg grating displacement sensor, *Optics Communications*, vol. 273, 2007, 398–401.
- [8] Ramaswami R., Givaranjan K., Sasaki G.: *Optical Networks: A Practical Perspective*. ELSEVIER, 2010.
- [9] Rao Y. J., Grattan K. T. V., Meggit B. T.: Fibre Bragg grating sensors: principles and applications, *Optical Fibre Sensor Technology*, vol. 2, 1998, 355–389.
- [10] Zhou D. P., Wei L., Liu W. K., Lit J. W. Y.: Simultaneous measurement of strain and temperature based on fiber Bragg grating combined with a high-birefringence fiber loop mirror, *Optics Communications*, vol. 281, 2008, 4640–4643.

Mgr inż. Damian Harasim
e-mail: d.harasim@pollub.pl

W 2014 roku obronił pracę magisterską na Wydziale Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Lubelskiej w Katedrze Metrologii Elektrycznej Automatyki. W tym samym roku rozpoczął studia doktoranckie w Instytucie Elektroniki i Techniki Informatycznych na Politechnice Lubelskiej z dziedziny Elektrotechniki. Zainteresowania pracy doktorskiej utrzymane są w tematyce przesłuchiwanie rozproszonych systemów pomiarowych opartych o światłowodowe siatki Bragga.



Магістр інж. Дам'ян Гарасім
e-mail: d.harasim@pollub.pl

У 2014 році захистив магістерську роботу на факультеті Електротехніки та Інформатики в Люблінській Політехніці на кафедрі Metrologii та Automatyki. У тому ж році розпочав аспірантуру в Інституті Електроніки та Інформаційних технологій в Люблінській Політехніці за напрямком Електротехніка. Науковий інтерес кандидатської дисертації складають дослідження розподілені вимірювальних систем на основі ґраток Брегга.

Dr hab. inż. Piotr Kisala
e-mail: p.kisala@pollub.pl

Od 2012 roku kierownik Zakładu Optoelektroniki i Sieci Teleinformatycznych w Instytucie Elektroniki i Techniki Informatycznych. W roku 2013 otrzymał tytuł doktora habilitowanego. Obecnie na stanowisku profesora na Wydziale Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Lubelskiej. Działalność naukowo-badawcza dotyczy głównie niatelekomunikacyjnych zastosowań światłowodów, szczególnie zastosowaniem światłowodowych siatek Bragga jako czujników optycznych. Prace skupiają się na modelowaniu obiektywnym periodycznych struktur w skali nano, przy wykorzystaniu programowania wysoko poziomowego. Obecnie badania koncentrują się na pomiarach rozkładu naprężenia na bardzo małych powierzchniach rzędu kilku mikrometrów. Prowadzi zajęcia laboratoryjne i wykłady m.in. z podstaw techniki światłowodowej, elektroniki, projektowania systemów wbudowanych opartych na procesorach ARM, programowania niskopoziomowego, sieci IP i telekomunikacji optoelektronicznej.



Д-р інж. Петро Кісала
e-mail: p.kisala@pollub.pl

Від 2012 року керівник Відділу оптоелектроніки і телеінформаційних мереж в Інституті Електроніки та Інформаційних технологій. В даний час професор факультету Електротехніки та Інформатики в Люблінській Політехніці. Науково-дослідницька діяльність стосується натекомунікаційних застосувань світлодіодів, зокрема використання ґраток Брегга, як оптичних датчиків. Робота фокусується на моделюванні об'єктів періодичних структур на нанорівні, використовуючи високій рівень програмування. На сьогодні, дослідження спрямовані на вимірювання розподілу напружень на дуже малих ділянках – у кілька мікрометрів. Проводить лекції та лабораторні заняття в тому числі з дисциплін: основи волоконної оптики, електроніка, проектування вбудованих систем заснованих на ARM процесорах, початкове програмування, IP-мережі і телекомунікація оптоелектронна.

otrzymano/отримано/received: 11.03.2015

przyjęto do druku/прийнято до друку/accepted: 27.08.2015