



## Miernik kąta obrotu płaszczyzny polaryzacji światła propagującego w światłowodzie oraz sposób pomiaru kąta obrotu płaszczyzny polaryzacji

Przedmiotem wynalazku jest miernik kąta obrotu płaszczyzny polaryzacji światła i sposób pomiaru kąta obrotu płaszczyzny polaryzacji światła propagującego przez światłowód, odporny na zakłócenia elektromagnetyczne, indukcję elektromagnetyczną, zanieczyszczenie światłem i zanieczyszczenia, nie posiadający elementów ruchomych.

Układy do pomiaru kąta obrotu płaszczyzny polaryzacji światła propagującego przez światłowód stanowią istotny element systemów pomiarowych opartych o czujniki światłowodowe. Znajdują zastosowanie w polarymetrach czy układach, stosowanych w badaniu właściwości powierzchni, wykorzystujących optyczne właściwości światła spolaryzowanego.

Powszechnie znane są układy do pomiaru kąta obrotu płaszczyzny polaryzacji światła zbudowane z filtra polaryzacyjnego (analizatora) oraz fotodetektora. Światło spolaryzowane przesyłane jest przez analizator do fotodetektora mierzącego natężenie światła. Analizator obracany jest wokół osi pokrywającej się z kierunkiem promienia a natężenie światła jest analizowane przez analizator. Wskazanie maksymalnej wartości przez analizator oznacza, że kąt obrotu polaryzacji światła jest zgodny z płaszczyzną przepuszczania światła filtra polaryzacyjnego.

Znany jest też sposób pomiaru kąta obrotu płaszczyzny polaryzacji światła opierający się na prawie Malusa. Układ pomiarowy podlega wstępnej kalibracji dla użytego źródła światła spolaryzowanego poprzez określenie zmian natężenia światła w funkcji kąta obrotu płaszczyzny polaryzacji. Pomiar polega na odczytaniu z utworzonej funkcji kąta obrotu płaszczyzny polaryzacji światła na podstawie zmierzonego natężenia światła.

W zgłoszeniu patentowym [JPS59100828A](#) do pomiaru polaryzacji światła zastosowano szkło Faradaya oraz fotodetektor. Kierunek polaryzacji szkła Faradaya jest obracany za pomocą pola magnetycznego o odpowiednim natężeniu generowanego w komórce Faradaya a natężenie światła mierzone jest pośrednio poprzez pomiar natężenia prądu płynącego przez komórkę Faradaya

Ze zgłoszenia patentowego [EP3910310A1](#) znany jest układ i sposób pomiaru wybranych parametrów polaryzacji światła, który jest generalizacją metody macierzy Muellera. Pomiar polaryzacji wykonywany jest pośrednio poprzez pomiar straty zależnej od polaryzacji. Wykonywane są sekwencyjne skany dla różnych długości fal przy stanach polaryzacji na wejściu oscylujących sinusoidalnie w funkcji częstotliwości optycznej. Dla każdego skanu otrzymuje się krzywą transmisji będącą odpowiedzią urządzenia poddawanego testom. Kąt obrotu płaszczyzny polaryzacji światła obliczany jest poprzez analizę zestawu krzywych transmisji.

Problemem technicznym do rozwiązania jest wytworzenie miernika kąta obrotu i sposobu pomiaru kąta obrotu płaszczyzny polaryzacji światła propagującego w światłowodzie odpornego na zakłócenia elektromagnetyczne, pole magnetyczne, światło, nie wprowadzającego zakłóceń, pozwalającego na określenie kąta obrotu płaszczyzny polaryzacji bez konieczności ciągłego śledzenia jego zmian.

Przedmiotem wynalazku jest miernik kąta obrotu i sposób pomiaru kąta obrotu płaszczyzny polaryzacji światła propagującego przez światłowód.

Istotą miernika kąta obrotu płaszczyzny polaryzacji światła propagującego przez światłowód, jest to, że do światłowodu z wytworzoną w jego rdzeniu światłowodową skośną siatką Bragga zamocowane jest złącze światłowodowe. Drugi koniec światłowodu podłączony jest do analizatora widma optycznego, który połączony jest z modułem obliczeniowym.

Istotą sposobu pomiaru kąta obrotu polaryzacji światła z wykorzystaniem światłowodu jednomodowego z siatką Bragga jest to, że kalibruje się miernik kąta obrotu w następujący sposób:

- Do miernika kąta obrotu przyłącza się źródło światła spolaryzowanego, z którego wysyła się światło spolaryzowane do miernika kąta obrotu poprzez złącze światłowodowe,
  - polaryzację światła ustawia się w pozycji początkowej, dla której kąt obrotu -  $K_{obr}$  równy jest  $0^\circ$ ,
  - ze źródła światła spolaryzowanego wysyła się poprzez światłowód światło do światłowodowej skośnej siatki Bragga, w której zmienia się widmo światła i przesyła się światło do analizatora, w którym mierzy się moc światła dla poszczególnych długości fali, zaś wartości zmierzonej mocy przesyła się do modułu obliczeniowego, w którym otrzymane wartości są przeliczane na serie wartości charakterystycznych dla ustawionego kąta obrotu płaszczyzny polaryzacji światła. Przeliczenie odbywa się w układzie obliczeniowym poprzez obliczenie współczynników szybkiej transformaty Fouriera – FFT z wartości zmierzonej w analizatorze widma mocy światła dla poszczególnych długości fali. Obliczone współczynniki - FFT zapisuje się wraz z odpowiadającym im kątem obrotu płaszczyzny polaryzacji światła
- $FC_j = \{(FC_{1j}, K_{obr\_j}), (FC_{2j}, K_{obr\_j}), \dots, (FC_{ij}, K_{obr\_j}), \dots, (FC_{nj}, K_{obr\_j})\}$ , gdzie  $FC_{ij}$  oznacza i-ty współczynnik transformaty zmierzony dla kąta obrotu wynoszącego j stopni,  $K_{obr\_j}$  oznacza kąt obrotu płaszczyzny polaryzacji światła równy j stopni, n oznacza połowę liczby wszystkich uzyskanych współczynników transformaty, w przypadku gdy n nie jest liczbą całkowitą zaokrągla się tę liczbę w dół,
- kąt obrotu płaszczyzny polaryzacji światła zmienia się o zadany, stały kąt,
  - wykonuje się zmianę kąta obrotu płaszczyzny polaryzacji światła do momentu, w którym uzyskano obrót o 180 stopni,
  - z obliczonych współczynników  $FC_{ij}$  tworzy się funkcje –  $C_i = F(K_{obr\_j})$  zależności wartości i-tego współczynnika FFT od kąta obrotu płaszczyzny polaryzacji światła, w taki sposób, że dla każdego numeru współczynnika  $FC_i$  (i należy do zbioru  $\langle 1, n \rangle$ ), odczytuje się jego wartość dla wszystkich kątów obrotu płaszczyzny polaryzacji światła, dla których wykonywano kalibrację -  $(FC_{ij}, K_{obr\_j})$ .

Następnie z odczytanych par wartości tworzy się funkcję poprzez wyznaczenie funkcji liniowych dla odczytanych wartości współczynnika dla kolejnych kątów obrotu, następnie wyznaczone funkcje łączy się i w ten sposób tworzy się funkcje zależności wartości współczynnika FFT od kąta obrotu płaszczyzny polaryzacji światła –  $C_i=F(K_{obr\_j})$  dla co najmniej dziesięciu współczynników - WA, korzystnie nie mniej niż 30,

- utworzone funkcje (charakterystyki)  $C_i=F(K_{obr\_j})$  zapisuje się trwale w układzie obliczeniowym.

Pomiar polega na tym, że ze źródła światła spolaryzowanego wysyła się poprzez światłowod światło do skośnej siatki Bragga, w której zmienia się widmo światła i przesyła się światło do analizatora, w którym mierzy się moc światła dla poszczególnych długości fali. Wartości zmierzonej mocy przesyła się do modułu obliczeniowego, w którym otrzymane wartości są przeliczane na wartość kąta obrotu płaszczyzny polaryzacji światła. Przeliczenie odbywa się w układzie obliczeniowym poprzez obliczenie współczynników FFT z wartości zmierzonej mocy światła w analizatorze widma dla poszczególnych długości fali. Spośród obliczonych współczynników FFT wybiera się te, dla których utworzono funkcje  $C_i=F(K_{obr\_j})$  podczas kalibracji miernika a następnie określa się wartości potencjalnego kąta obrotu - PKO, jakie mogą być przez nie identyfikowane. Dokonuje się tego poprzez wyliczenie wartości PKO z funkcji  $C_i=F(K_{obr\_j})$  uzyskanych podczas kalibracji. Jako PKO przyjmuje się wszystkie wartości  $K_{obr\_j}$ , które po podstawieniu do równania  $C_i=F(K_{obr\_j})$  dają w wyniku wartość i-tego współczynnika FFT zmierzoną dla badanego kąta obrotu.

Obliczone wartości PKO dla wszystkich współczynników zapisuje się w zbiorze – ZW. W zbiorze ZW tworzy się podzbiory z rozdzielczością jednego stopnia obrotu i zlicza się ile wartości PKO znajduje się w każdym z przedziałów. Wartość środkowa przedziału, w którym znajduje się najwięcej PKO oznacza kąt obrotu płaszczyzny polaryzacji światła - KOH.

W celu zwiększenia dokładności odczytu kąta obrotu otrzymane wyniki poddaje się dalszej analizie zgodnie z następującymi krokami:

- spośród obliczonych PKO analizuje się tylko te, dla których wartość różnicy kąta obrotu pomiędzy kątem obrotu KOH a potencjalnymi kątami obrotu - PKO jest mniejsza niż  $2^\circ$ ,
- sortuje się rosnąco pozostawione wartości PKO,
- usuwa się 10% najmniejszych wartości oraz 10% największych wartości PKO.

Oblicza się średnią z pozostałych wartości PKO, z których obliczona średnia stanowi odczytaną wartość kąta obrotu.

Korzystnym skutkiem zastosowania wynalazku jest to, że rozwiązanie pozwala na miniaturyzację elementów miernika, co pozwala na konstruowanie czujników o niewielkich rozmiarach. Konsekwencją zastosowania czujników, których sygnały transmitowane są w formie optycznej jest brak wrażliwości prowadzonych pomiarów na zakłócenia pochodzące od obcych pól elektromagnetycznych. Transmisja z użyciem włókien światłowodowych zapewnia wykluczenie niebezpieczeństwa wybuchowego lub pożarowego w warunkach, gdzie stosowanie elektronicznych odpowiedników zasilanych prądem elektrycznym może powodować zagrożenie. Brak elementów zasilanych elektrycznie zapewnia również możliwość stosowania wynalazku w zanurzeniu, gdzie

obecność wody nie będzie powodować zagrożenia spięć elektrycznych. Ponadto, zastosowanie światłowodowej skośnej siatki Bragga jako elementu pomiarowego pozwala na budowanie złożonych układów czujników mierzących różne wielkości fizyczne, takie jak kąt obrotu, temperatura, naprężenia, wykorzystując pojedyncze włókno światłowodowe.

5

Przedmiot wynalazku w przykładzie wykonania jest uwidoczniony na rysunku, na którym poszczególne figury przedstawiają:

Fig. 1 – Schemat wykonania miernika,

Fig. 2 – Wykres obrazujący sposób odczytu PKO z wykresu wartości współczynnika od kąta obrotu płaszczyzny polaryzacji światła,

Fig. 3 – Przykładowy histogram liczby odczytów PKO dla kąta obrotu płaszczyzny polaryzacji światła,

Fig. 4 – Przykład wyznaczenia funkcji  $C_i = F(K_{obr\_i})$  (charakterystyki) i-tego współczynnika WA,

Fig. 5 – Funkcja uzyskana dla współczynnika WA o numerze 1 w zakresie 0-180 stopni obrotu kąta płaszczyzny polaryzacji światła,

Fig. 6 – Funkcje uzyskane dla współczynników WA o numerach 2, 17 w zakresie 0-180 stopni kąta obrotu płaszczyzny polaryzacji światła,

Fig. 7 – Funkcje uzyskane dla współczynników WA o numerach 4, 8, 10, 20, 21, 23, 25, 35, 36 w zakresie 0-180 stopni kąta obrotu płaszczyzny polaryzacji światła,

Fig. 8 – Funkcje uzyskane dla współczynników WA o numerach 37, 45 - 51, 63, 64 w zakresie 0-180 stopni kąta obrotu płaszczyzny polaryzacji światła,

Fig. 9 – Funkcje uzyskane dla współczynników WA o numerach 3, 14, 15, 26, 28, 29, 31, 32, 33, 34 w zakresie 0-180 stopni kąta obrotu płaszczyzny polaryzacji światła,

Fig. 10 – Funkcje uzyskane dla współczynników WA o numerach 38 - 44, 52 w zakresie 0-180 stopni kąta obrotu płaszczyzny polaryzacji światła,

Fig. 11 – Funkcje uzyskane dla współczynników WA o numerach 53, 54, 55, 87, 105, 108, 127, 130, 153, 169 w zakresie 0-180 stopni kąta obrotu płaszczyzny polaryzacji światła.

Miernik kąta obrotu płaszczyzny polaryzacji światła, według wynalazku w przykładzie wykonania składa się ze złącza światłowodowego 1 - SC do którego przymocowany jest światłowód 2 – SMF-28 z wytworzoną w nim skośną siatką Bragga 3 o kącie struktury wewnętrznej wynoszącym 7°. Światłowód 2 podłączony jest do analizatora widma optycznego 4 – Yokogawa AQ6730D, który połączony jest z modulem obliczeniowym 6 w postaci komputera klasy PC, za pomocą kabla 5 – USB 2.0.

Sposób pomiaru kąta obrotu płaszczyzny polaryzacji światła z wykorzystaniem światłowodu jednomodowego z siatką Bragga przy użyciu wyżej opisanego miernika zrealizowano według procedury opisanej poniżej.

Przeprowadzono kalibrację miernika według następujących kroków:

- 5 a) polaryzację światła dostarczanego do miernika poprzez złącze 1 ustawiono w pozycji początkowej, dla której kąt obrotu -  $K_{obr}$  równy jest  $0^\circ$ ,
- b) z przyłączonego źródła światła poprzez złącze 1 wysłano światło do światłowodu 2 ze światłowodową skośną siatką Bragga 3, w której zmieniło się widmo światła i światło zostało przesłane do analizatora 4, w którym zmierzono moc światła dla fal z zakresu 1540 - 1560nm z krokiem 0,004nm. Wartości zmierzonej mocy poprzez kabel 5 przesłano do modułu obliczeniowego 6, w którym otrzymane wartości zostały przeliczone na serię wartości charakterystycznych dla ustawionego kąta obrotu płaszczyzny polaryzacji światła. Przeliczenie odbyło się poprzez obliczenie współczynników szybkiej transformaty Fouriera – FFT z wartości zmierzonej w analizatorze widma 4 mocy światła dla poszczególnych długości fali. Obliczone współczynniki - FFT zapisano wraz z odpowiadającym im kątem obrotu płaszczyzny polaryzacji światła  $FC_j = \{(FC_{1j}, K_{obr\_j}), (FC_{2j}, K_{obr\_j}), \dots, (FC_{ij}, K_{obr\_j}), \dots, (FC_{nj}, K_{obr\_j})\}$ , gdzie  $FC_{ij}$  oznacza i-ty współczynnik transformaty zmierzony dla kąta obrotu wynoszącego j stopni,  $K_{obr\_j}$  oznacza kąt obrotu płaszczyzny polaryzacji światła równy j stopni, n oznacza połowę liczby wszystkich uzyskanych współczynników transformaty, w przypadku gdy n nie jest liczbą całkowitą zaokrągla się tę liczbę w dół. W przykładzie wykonania użyto współczynników - WA o numerach: 1, 2, 3, 4, 8, 10, 14, 15, 17, 20, 21, 23, 25, 26, 28, 29, 31-55, 63, 64, 87, 105, 108, 127, 130, 153, 169. Przykładowe funkcje (charakterystyki) wymienionych współczynników pokazano na wykresach przedstawionych na Fig. 5 – Fig. 11,
- 10 c) polaryzację światła przesyłanego do miernika obracano o zadany, stały kąt, równy  $2^\circ$  i powtarzano krok b),
- 15 d) wykonywano obrót kąta polaryzacji światła i powtarzano krok b) do momentu, w którym uzyskano obrót równy 180 stopni,
- e) z obliczonych współczynników  $FC_{ij}$  utworzono funkcje –  $C_i = F(K_{obr\_j})$  zależności wartości i-tego współczynnika FFT od kąta obrotu płaszczyzny polaryzacji światła, w taki sposób, że dla każdego numeru współczynnika  $FC_i$ , gdzie i należy do zbioru  $\langle 1, n \rangle$ , odczytano jego wartość dla wszystkich kątów obrotu płaszczyzny polaryzacji światła, dla których wykonano kalibrację (Fig. 5 – Fig. 11), a następnie z odczytanych par wartości utworzono funkcję poprzez wyznaczenie funkcji liniowych dla odczytanych wartości współczynnika dla kolejnych kątów obrotu, następnie wyznaczone funkcje łączy się i w ten sposób utworzono funkcje (charakterystyki) -  $C_i = F(K_{obr\_j})$  dla wszystkich 20 współczynników – WA – Fig. 4 rysunku,
- 25 f) utworzone funkcje -  $C_i = F(K_{obr\_j})$  zapisano trwale w module obliczeniowym 6.

Pomiar polegał na tym, że z przyłączonego źródła światła spolaryzowanego wysłano poprzez złącze 1 światło do światłowodu 2 ze światłowodową skośną siatką Bragga 3, w której zmieniło się widmo światła, które to światło przesłano do analizatora widma optycznego 4, gdzie zmierzono moc

światła dla poszczególnych długości fali. Wartości zmierzonej mocy przekazano do modułu obliczeniowego 6, w którym otrzymane wartości zostały przeliczone na wartość kąta obrotu płaszczyzny polaryzacji światła. Przeliczenie odbywało się w module obliczeniowym 6 poprzez obliczenie współczynników - FFT z wartości zmierzonej mocy światła w analizatorze widma 5 optycznego 4 dla poszczególnych długości fali. Spośród obliczonych współczynników FFT wybrano te, dla których utworzono funkcje  $C_i=F(K_{obr\_j})$  podczas kalibracji miernika a następnie określono wartości potencjalnego kąta obrotu – PKO, jakie mogły być przez nie identyfikowane – fig. 2. Dokonano tego poprzez wyliczenie wartości PKO z funkcji  $C_i=F(K_{obr\_j})$  uzyskanych podczas kalibracji. Jako PKO przyjęto wszystkie wartości  $K_{obr\_j}$ , które po podstawieniu do równania  $C_i=F(K_{obr\_j})$  dały w wyniku 10 wartość i-tego współczynnika FFT zmierzoną dla badanego kąta obrotu.

Obliczone wartości PKO dla wszystkich współczynników WA zapisano w zbiorze – ZW.

Następnie utworzono przedziały pełnego kąta obrotu z rozdzielczością jednego stopnia (0,5 stopnia- 1,5 stopień, 1,5 stopnia – 2,5 stopnia, ... 179,5 stopnia – 0,5 stopnia), zliczono ile PKO znajduje się w każdym z przedziałów. Środkowa wartość przedziału, w którym znajdowało się najwięcej PKO 15 oznaczała kąt obrotu płaszczyzny polaryzacji światła – KOH, który wynosił 8 stopni. Przykładowe wyniki zobrazowano na histogramie przedstawionym na Fig. 3.

W celu zwiększenia dokładności odczytu kąta obrotu otrzymane wyniki poddano dalszej analizie zgodnie z krokami poniżej:

- spośród obliczonych PKO analizowano tylko te, dla których wartość różnicy kąta obrotu 20 pomiędzy kątem obrotu KOH a potencjalnymi kątami obrotu - PKO była mniejsza niż  $2^\circ$ ,
- posortowano rosnąco pozostawione wartości PKO,
- usunięto 10% najmniejszych wartości oraz 10% największych wartości PKO, obliczono średnią z pozostałych wartości PKO, z których obliczona średnia stanowiła odczytaną wartość kąta obrotu, która wynosiła  $8,03$  stopnia.

RZECZNIK PATENTOWY

*Maciej Nowicki*  
mgr inż. Maciej Nowicki  
Nr wp. 3476

## Wykaz oznaczeń

1. Złącze światłowodowe
2. Światłowód jednomodowy
3. Światłowodowa skośna siatka Bragga
4. Analizator widma optycznego
5. Kabel
6. Moduł obliczeniowy