

Zastosowanie światłowodów o emisji bocznej w pomiarach

Streszczenie. W artykule przedstawiono informacje dotyczące detekcji promieniowania za pomocą światłowodów bocznych. Światłowody kształtowane służą nie tylko do celów oświetleniowych, lecz mogą być również stosowane wszędzie tam, gdzie jest potrzeba liniowej detekcji promieniowania. Koncepcja czujnika opiera się na wykorzystaniu światłowodu walcowego z wykonanym zaburzeniem pryzmatycznym.

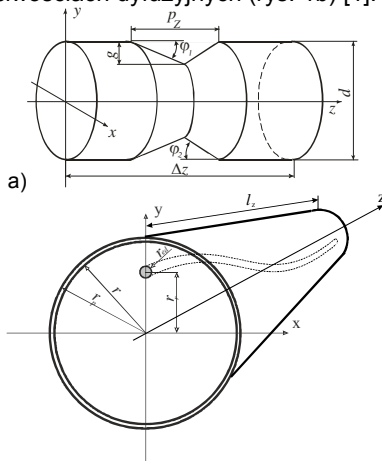
Abstract. This paper presents information about detection of radiation which uses side light optical fibers. Shaped side optical fibers are used in lighting mainly, but their useful properties are in detection. The idea of the sensor of the angular dislocation is based on the utilization of the cylindrical optical fiber with performed prismatic disturbance. (*Side light fibres in linear radiation detection*).

Słowa kluczowe: światłowód, emisja boczna, detekcja.

Keywords: optical fibre, side emission, detection.

Wstęp

Podstawowym zadaniem światłowodów bocznych jest sterowanie rozsyłem przestrzennym strumienia świetlnego. Elementarne powierzchnie rozpraszające umieszczone w obszarze rdzeń-płaszcz światłowodu kształtowanego, powodują rozsył promieniowania zbliżony do lambertowskiego, natomiast użycie elementów o zadanym kształcie może spowodować emisję w określonych kierunkach. Zastosowanie pryzmatycznych elementów pierścieniowych pozwala na sterowanie emisją kierunkową promieniowania. Odpowiedni dobór parametrów geometrycznych takich jak kąty łamiące pryzmatu φ_1 i φ_2 oraz szerokość p_z lub głębokość deformacji g , pozwalają uzyskać zamierzoną ekspansję strumienia poza obszar bocznej powierzchni światłowodu, stosownie do zamierzeń projektowych (rys. 1a). Światłowody wykonane w procesie technologicznego wyciągania włókna, jako element rozpraszający mogą wykorzystać np. spiralny rdzeń ze szkła o właściwościach dyfuzyjnych (rys. 1b) [1].

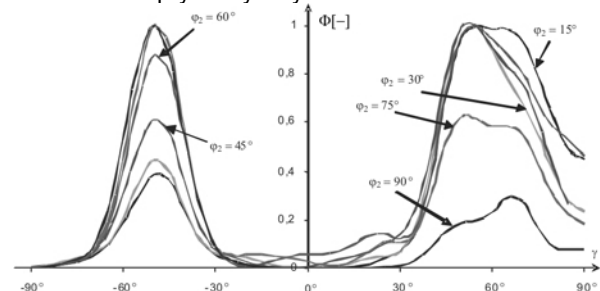


Rys. 1. Parametry geometryczne światłowodu a) kształtowanego, b) technologicznego z jednym spiralnym rdzeniem rozpraszającym [2]

Aby uzyskać stałą emisję strumienia wzdłuż kształtowanego włókna optycznego, można taką realizację oprzeć na wykorzystaniu jednakowych elementów pryzmatycznych wykonanych na bocznej powierzchni światłowodu ale rozmieszczonych względem siebie nierównomiernie lub wykorzystać elementy o zmiennej geometrii przy ich równomiernym rozmieszczeniu na bocznej powierzchni włókna [3]. W światłowodzie o spiralnym rdzeniu, zadany rozsył strumienia uzyskuje się poprzez modyfikację skoku i położenia rdzenia względem osi światłowodu [4].

Na rysunku 2 przedstawiono przykładowy rozsył strumienia świetlnego emitowanego z pojedynczego elementu pryzmatycznego, gdy kąt łamiący pryzmatu $\varphi_1 = 75^\circ$ zaś kąty łamiące φ_2 zmieniają się co 15° w zakresie od 15° do 90° . Dzięki symetrii emisji strumienia świetlnego względem prostej normalnej do osi włókna optycznego istnieje możliwość wykorzystania takiego elementu do wytworzenia na powierzchni oświetlanej równomiernego natężenia oświetlenia.

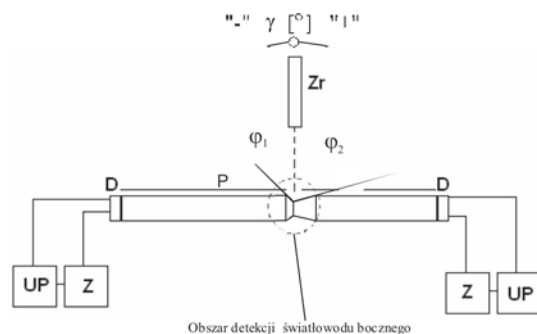
Światłowody kształtowane i technologicznie modyfikowane służą nie tylko do celów oświetleniowych, lecz mogą być również stosowane wszędzie tam, gdzie jest potrzeba detekcji promieniowania pod wskazanymi kątami [5]. Koncepcja czujnika przemieszczenia kąтового opiera się na wykorzystaniu światłowodu walcowego z wykonanym zaburzeniem pryzmatycznym.



Rys. 2. Względna zmiana strumienia świetlnego w funkcji kąta emisji γ na zewnątrz światłowodu, gdy $\varphi_1 = 75^\circ$ dla różnych wartości kąta łamiącego φ_2

Układ pomiarowy

W celu wykonania pomiarów, mających na celu sprawdzenie przydatności światłowodów bocznych do detekcji promieniowania zewnętrznego, wykonano stanowisko pomiarowe którego schemat ideowy przedstawia rysunek 3.

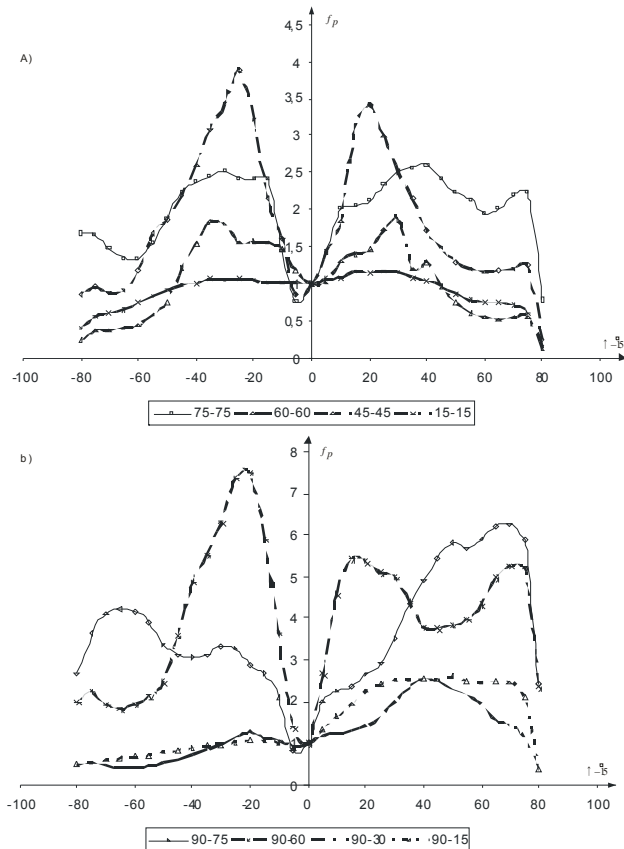


Rys. 3. Schemat ideowy stanowiska pomiarowego: D – detektor, P – przysłona, S – światłowód, Zr – źródło promieniowania [6]

Badaniu poddano światłowody kształtowane, w których zostały wykonane elementy detekcyjne w postaci nacięć pryzmatycznych. Powierzchnię boczną światłowodu zabezpieczono przed promieniowaniem pasożytniczym poprzez zastosowanie czarnej maski pochłaniającej promieniowanie, o rozmiarze otworu wejściowego odpowiadającemu rozmiarowi pryzmatycznego obszaru detekcyjnego. Źródłem promieniowania była dioda laserowa LD-P-650-005-1, o następujących parametrach: $\lambda = 650$ nm, moc $P = 5$ mW, prąd pracy $I_D = 50$ mA, której wiązka światła padała na cały obszar detekcyjny o szerokości p_z (rys. 1). Detektorami D promieniowania były dwa fotorezystory RPP 130, które pracowały w układzie mostka Wheatstone'a. Taki układ pracy pozwalał na wyeliminowanie wpływu zmiany temperatury otoczenia na parametry elektryczne fotorezystorów. Detektory współpracowały ze światłowodem poprzez obszar immersyjny, w celu polepszenia warunków detekcji.

Wyniki badań

Wielkością mierzoną był prąd (fotoprąd), płynący w gałęzi mostka, w której znajdował się fotorezystor. Uniezależnienie wyników pomiaru od miejsca detekcji na badanym światłowodzie polegało na sprowadzeniu do jednakowych wartości sygnałów pomiarowych z obu detektorów, gdy promieniowanie padało prostopadłe do osi światłowodu na obszar elementu pryzmatycznego. Założono również, że zmiana tłumienia jest mniejsza od 1% na odcinku do 20 mm badanego włókna optycznego, które wykonano z materiału oznaczanego jako PMMA oraz jednorodność tego materiału [7].



Rys. 4. Funkcja przetwarzania przykładowych: a) symetrycznych i b) niesymetrycznych elementów detekcyjnych

Aby możliwe było porównanie wyników badań poszczególnych elementów detekcyjnych, dokonano normalizacji wyników pomiarów względem sygnału w

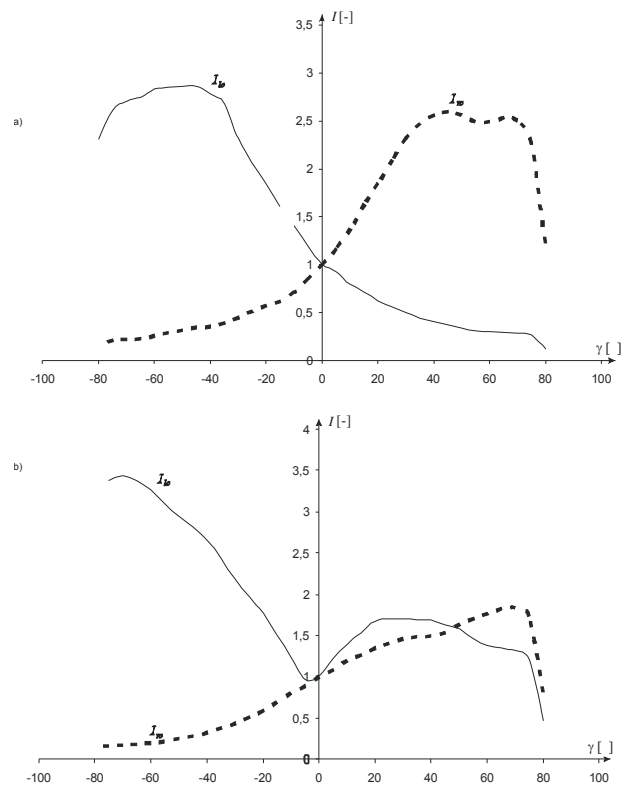
kierunku $\alpha = 0^\circ$ (oś prostopadła do osi włókna), a następnie określono funkcję przetwarzania f_p

$$(1) \quad f_p = I_{lo} \cdot I_{ro}$$

gdzie: I_{lo} – względny sygnał detektora po lewej stronie ('-') pryzmatycznego elementu detekcyjnego, I_{ro} – względny sygnał detektora po prawej stronie ('+') pryzmatycznego elementu detekcyjnego.

Funkcję przetwarzania f_p określano za każdym razem dla różnych wartości kątów łamiących φ_1, φ_2 detekcyjnego elementu pryzmatycznego, przy czym rysunek 4 przedstawia funkcję przetwarzania dla symetrycznych i niesymetrycznych elementów pryzmatycznych. Pomiary dotyczyły tylko wybranych konfiguracji elementów detekcyjnych wykonanych na światłowodzie pomiarowym.

Względne sygnały pomiarowe fotodetektorów przedstawiono na rysunku 5. Charakterystyki zmienności fotoprądu poszczególnych detektorów zależą silnie od kształtu elementu czujnikowego wykonanego na powierzchni rdzenia. Symetria takiego elementu powoduje symetrię sygnałów pomiarowych, zaś asymetria elementu powoduje również zachwianie symetrii sygnałów detektorów. Rozpatrując zatem możliwość detekcji kątowej, należy brać pod uwagę zarówno funkcję przetwarzania, jak również poszczególne tory pomiarowe.

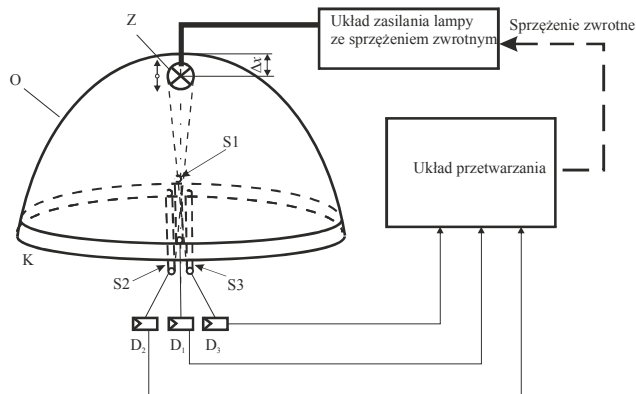


Rys. 5. Względne sygnały pomiarowe detektorów dla przykładowych a) symetrycznych i b) niesymetrycznych elementów detekcyjnych

Zastosowanie światłowodu bocznego jako czujnika parametrów optycznych lampy

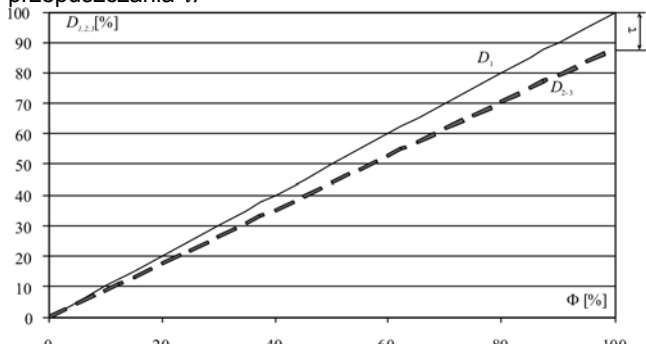
Czujniki położenia stanowią ważną grupę systemów detekcji, które poprzez analizę usytuowania obiektu dają informację o przestrzennym jego usytuowaniu względem punktu odniesienia. Czujniki mogą analizować przemieszczenie poprzez wykorzystanie metody stykowej lub bezstykowej. Najpowszechniej stosowana metoda bezstykowa, wykorzystująca zwykle barierę optyczną,

polega na analizowaniu stanu wiązki świetlnej padającej na detektor lub zespół detektorów (linijka lub matryca) i weryfikowaniu położenia obiektu względem takiego systemu detekcji [8]. Zaproponowane rozwiązanie jest odmienne pod względem zapotrzebowania układu czujnikowego na znaczną liczbę detektorów przy określonej dokładności pomiaru i polega na analizie przemieszczającego się obiektu poprzez pomiar zmian sygnału propagującego się w zmodyfikowanej strukturze światłowodowej [2, 9].



Rys. 6. Koncepcja oprawy oświetleniowej z autokalibracją strumienia świetlnego (Z – źródło światła, O – odbłyśnik, K – klosz, D – zespół detektorów, S – światłowody boczne 1, 2, 3) [9]

Na rysunku 6 przedstawiono koncepcyjny układ pomiarowy, służący do sterowania oprawy oświetleniowej, poprzez wykorzystanie światłowodów bocznych. Celem działania takiego rozwiązania jest samoregulacja źródła światła w konstrukcji świetlnooptycznej, będąca wynikiem analizy strumienia świetlnego źródła światła, mierzonego włóknom 1, oraz analizy strumienia przechodzącego przez klosz oprawy, mierzonego włóknomi 2 i 3. Dodatkowo, synchronizując częstotliwość zasilania źródła światła z częstotliwością detekcji zespołu detektorów D, możliwe jest również analizowanie stanu oświetlenia panującego w otoczeniu lampy. Innymi słowy, przedstawiony układ pomiarowy stanowi autonomiczny system samoregulacji oprawy oświetleniowej, w zależności od poziomu natężenia oświetlenia na płaszczyźnie oświetlanej. Zależność zmiany strumienia świetlnego w funkcji średniej wartości sygnałów detektorów współpracujących ze światłowodami bocznymi 1, 2 i 3 jest liniowa (rys. 7), przy czym różnica, pomiędzy średnią wartością sygnału detektorów 2 i 3 oraz detektora 1, wynika z pochłaniania klosza oprawy o współczynniku przepuszczalności τ .



Rys. 7. Średni sygnał użyteczny światłowodów 1, 2 i 3 w funkcji zmiany strumienia świetlnego

W badanym układzie modelowym analizowano przydatność pomiarowego systemu optycznego, opartego na bocznych światłowodach modyfikowanych o średnicy

250 μ m i długości 500mm z trzema spiralnymi warstwami rozpraszającymi w obszarze przyplaszczowym [2, 4]. Parametrem wejściowym było przesunięcie źródła światła (źródło LED) względem ogniska odbłyśnika parabolicznego, zaś detekcja odbywała się poprzez analizę średniej wartości sygnału uzyskiwanego na końcach włókien detekcyjnych. Światłowody pomiarowe były przed pomiarem kalibrowane w taki sposób, aby niezmienny rozsył strumienia świetlnego od źródła światła powodował w każdej linii detekcyjnej ze światłowodem identyczny poziom średniej wartości sygnału. Światłowody współpracowały z fotodiodami PIN BPW34, które umieszczone były przy powierzchniach czołowych światłowodów poprzez imersję optyczną. Skontrolowano również możliwość sterowania źródłem LED poprzez liniową zmianę strumienia świetlnego i analizowano średni sygnał kanałów detekcyjnych, który okazał się również liniowy. Potwierdza to przypuszczenie, iż światłowodowy system detekcji nadaje się do analizy zmian promieniowania optycznego, którego zakres widmowy ograniczony jest wyłącznie rodzajem zastosowanego detektora oraz charakterystyki absorpcji światłowodu [10, 11, 12, 13].

W konstrukcji modelowej (rys. 6), źródło LED w postaci 3 diod CREE XP-E podlegało przemieszczeniom Δx wzdłuż osi symetrii obrotowej oprawy oświetleniowej. Zerowe położenie źródła LED dotyczyło jego umieszczenia w ognisku odbłyśnika parabolicznego o ogniskowej 5mm i średnicy otworu wyjściowego 250 mm, natomiast kierunek dodatni dotyczył wysunięcia źródła w kierunku otworu wyjściowego odbłyśnika. Średni sygnał torów detekcyjnych D_1 , D_2 i D_3 w funkcji przesunięcia źródła światła przedstawiono na rysunku 10, a odpowiadającą zmianom Δx światłość osiową względną oprawy oświetleniowej pokazano na rysunku 8. Funkcjonalność układu pomiarowego można dodatkowo rozszerzyć poprzez analizę strumienia świetlnego wychodzącego otworem wyjściowym oprawy i związać tę zależność z układem regulacji źródła światła. Charakterystyka sprawności optycznej (rys. 9) oraz zmian światłości względnej (rys. 8) pokazuje możliwości regulacji wzajemnego położenia źródła światła i odbłyśnika obrotowo-symetrycznego. Z drugiej strony, synchronizacja czasu detekcji z modulacją źródła światła (np. w systemach PWM zasilania źródła LED), pozwala na określenie stopnia zabrudzenia klosza oprawy i analizy w czasie rzeczywistym parametrów świetlnych powierzchni oświetlanej oprawą oraz samej oprawy. Korektę strumienia świetlnego, wynikającą ze zmian współczynnika przepuszczalności klosza, należy przeprowadzić, gdy źródło światła jest wyjustowane względem odbłyśnika w taki sposób, że jego światłość osiowa jest największa.

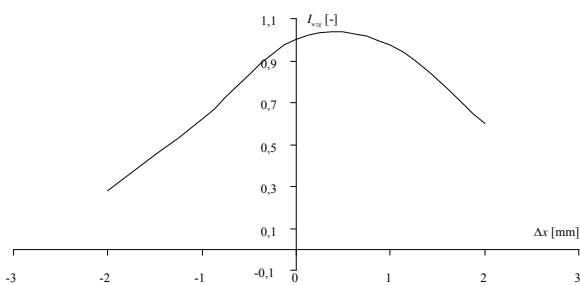
Opracowany model oprawy oświetleniowej ze sterowaniem opartym na mikroprocesorze Atmega16, w poprawny sposób dokonywał samoregulacji emisji strumienia świetlnego ze źródła LED, w oparciu o prosty algorytm liniowej zależności strumienia wychodzącego z oprawy, w zależności od strumienia świetlnego odbitego od powierzchni oświetlanej. Sygnał uzyskiwany z poszczególnych światłowodów detekcyjnych (rys. 10), w rozpatrywanym układzie, charakteryzuje się tym, że możliwe jest przybliżenie przebiegów średnich sygnałów gałęzi pomiarowych następującymi wielomianami 3-go stopnia:

$$(2) D_1(\Delta x) = 0,0039(\Delta x)^3 + 0,0167(\Delta x)^2 + 0,0968(\Delta x + 0,06625)$$

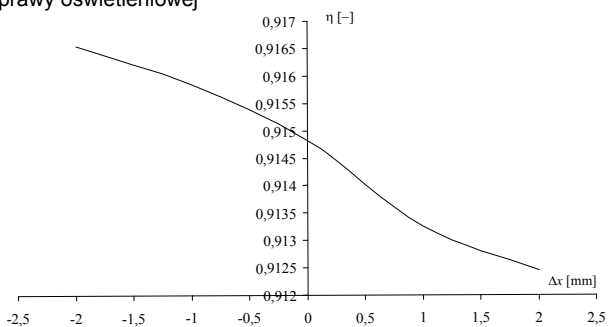
$$(3) D_2(\Delta x) = -0,0016(\Delta x)^3 - 0,0019(\Delta x)^2 + 0,0518(\Delta x + 0,55)$$

$$(4) D_3(\Delta x) = -0,0024(\Delta x)^3 - 0,024(\Delta x)^2 + 0,0619(\Delta x + 0,5358)$$

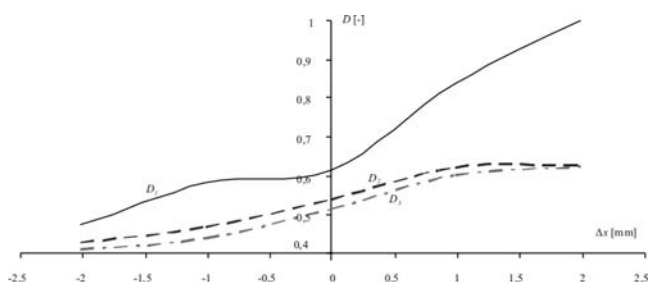
Charakterystyki zmian sygnału opisanego zależnościami (2, 3, 4), mierzonego odpowiednimi światłowodami 1, 2 i 3, mogą być zapisane w pamięci procesora i w sposób automatyczny sterować prądem zasilania źródła LED w lampie.



Rys. 8. Charakterystyka światłości osiowej względnej modelowej oprawy oświetleniowej



Rys. 9. Charakterystyka sprawności modelowej oprawy oświetleniowej

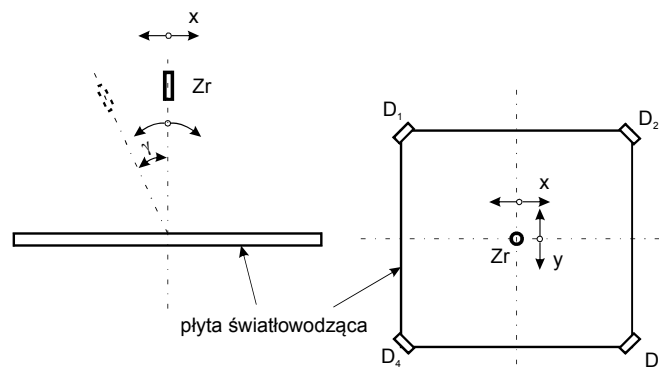


Rys. 10. Średni sygnał detektorów, współpracujących ze światłowodami 1, 2 i 3

Planarne światłowody kształtowane i o wytworzonej technologicznie warstwie rozpraszającej mogą również być wykorzystywane w czujnikach przemieszczenia, dotyku czy siły nacisku. Popularne rozwiązania typu "multitouch" bazują głównie na zmianach pojemności lub rezystancji warstwy ekranu, będących wynikiem nacisku i zaburzenia rozkładu potencjałów elektrycznych na powierzchni wyświetlacza [14]. Wadą tych rozwiązań jest konieczność fizycznego kontaktu powierzchni detekcyjnej i powierzchni wymuszającej. Zastosowanie układu detekcyjnego z bezstykowym wymuszeniem, pozwala na zdalną kontrolę i analizę wzajemnych przemieszczeń badanych powierzchni. System pomiarowy może być oparty na rozwiązaniu pokazanym na rysunku 11, który umożliwia pomiar zarówno przesunięcia w płaszczyźnie x-y, jak również kąta γ padania promieniowania na powierzchni detekcyjną.

Propagacja promieniowania w strukturze planarnej jest bardziej kłopotliwa pod względem analizy rozchodzącego się promieniowania, w stosunku do światłowodów cylindrycznych, ale zarazem łatwiejsza pod względem syntezy w układzie pomiarowym. Przedstawiona koncepcja jest bazą do konstruowania wyrafinowanych rozwiązań pomiarowych i prezentacyjnych. Tego typu układ ze światłowodem planarnym może być wykorzystany jako aplikacja "multitouch", jak np. w rozwiązaniach

prezentowanych przez firmę Microsoft, jako wielkoformatowe system wizualizacji "SURFACE" [15]



Rys. 11. Światłowod planarny w układzie do pomiaru przemieszczenia oraz pomiaru kąta

Podsumowanie i wnioski

Analiza zaprezentowanych modelowych układów światłowodów kształtowanych o bocznej detekcji promieniowania prowadzi do następujących wniosków:

- funkcja przetwarzania określa wyłącznie zmienność sygnału w funkcji kątowej zmiany promieniowania padającego na obszar detekcji,
- identyfikacja kąta padania jest możliwa wówczas, gdy znane są poszczególne składowe sygnałów detekcyjnych (wektory wartości sygnału z poszczególnych detektorów),
- symetryczna charakterystyka przetwarzania występuje wówczas, gdy element pryzmatyczny jest również symetryczny,
- charakterystyka symetrycznego elementu pryzmatycznego staje się bardziej płaska, gdy kąty φ_1, φ_2 zmniejszają się,
- detekcja kątowa może być przeprowadzana za pomocą jednego detektora tylko w zakresie kątów $0^\circ \div 80^\circ$ lub $0^\circ \div -80^\circ$,
- pełna identyfikacja detekcji kątowej promieniowania z wykorzystaniem światłowodu bocznego może być zrealizowana wówczas, gdy znana jest funkcja przetwarzania oraz sygnały z poszczególnych detektorów.

Detekcja kątowa promieniowania jest istotna w wielu układach pomiarowych [16,17]. Wykorzystanie światłowodu kształtowanego, zarówno cylindrycznego jak też planarnego, jest korzystne ze względu na bezstykową detekcję oraz zastosowanie elementu dielektrycznego jako czujnika. Użycie dowolnego źródła światła zdeterminowane jest wyłącznie czułością widmową zastosowanego fotodetektora oraz rodzajem materiału, z którego wykonano rdzeń światłowodu. Dodatkowo, pomiar taki może odbywać się zdalnie, o ile sygnał pomiarowy zostanie doprowadzony typowym torem optycznym (światłowody wielomodowe) do układu fotodetektorów. Ukształtowanie bocznej powierzchni światłowodów stwarza możliwości wykorzystania ich do identyfikacji zmian promieniowania padającego i wytwarzania np. liniowych lub powierzchniowych czujników przemieszczenia, kształtu, nacisku [8] itp. Światłowody boczne o technologicznej strukturze rozpraszającej np. z rdzeniem spiralnym, mogą służyć jako głowice pomiarowe w luksomierzach do pomiaru cylindrycznego i półcylindrycznego natężenia oświetlenia oraz w np. medycynie, do pomiarów wielkości nieelektrycznych i dodatkowo oświetlenia analizowanych powierzchni.

Badania zrealizowano na Politechnice Białostockiej w ramach pracy statutowej S/WE/4/2013.

LITERATURA

- [1] Dorosz D., Zajkowski M.: Optical properties of glasses for sight light emission waveguides, *Strasbourg*, 2007
- [2] Dorosz D., Kochanowicz M., Żmojda J., Dorosz J.: Helical core optical fibre made of Nd³⁺/Yb³⁺-doped oxyfluoride silicate glass, *Proc. of SPIE*, vol.7721 B1
- [3] Zajkowski M. Boczne światłowody oświetleniowe. *XI Krajowa Konferencja Oświetleniowa „Technika Świetlna 2002”*, Warszawa 6 – 8 listopad 2002
- [4] Zajkowski M.: Cylindryczne światłowody boczne, Oficyna Wydawnicza Politechniki Białostockiej, 2012
- [5] Dorosz J.: Technologia światłowodów włóknistych. *Prace Komisji Nauk Ceramicznych / Polska Akademia Nauk. Oddział Kraków. Ceramika Vol.86*, 2005, Kraków 2005
- [6] Zajkowski M.: Światłowody boczne w liniowej detekcji promieniowania, *Przeгляд Elektrotechniczny*, nr 11,2010, s. 327-328
- [7] Szwedowski A.: Materiałoznawstwo optyczne i optoelektroniczne. *Wydawnictwo Naukowo–Techniczne*, Warszawa 1996
- [8] Kuszniar J.: Wielopunktowe czujniki światłowodowe do wykrywania nacisku, *Przeгляд Elektrotechniczny*, nr 9, 2009, s. 54-57
- [9] Dorosz J., Dorosz D., Dybczyński W., Błaszczak U., Zajkowski M.: Analysis of the luminous flux diffusion on the optical fiber lateral surface, *Optica Applicata*, vol. 39, 2009, s. 63-76
- [10] Gilewski M.: Programowalny sterownik diod laserowych oraz LED-ów, *Przeгляд Elektrotechniczny*, R. 88, No. 3a (2012), s. 78-81
- [11] Gilewski M.: Wielokanałowy, stałoprądowy układ zasilania zespołów LED dużej mocy, *Przeгляд Elektrotechniczny*, R. 86, No. 10 (2010), s. 193-196
- [12] Gilewski M.: Różniocwy układ pracy fotodetektora promieniowania optycznego, *Przeгляд Elektrotechniczny*, R. 85, No. 11 (2009), s. 249-252
- [13] Gilewska G., Gilewski M.: Digital control methods of LED and LED lamps, *Przeгляд Elektrotechniczny*, R. 84, No. 8 (2008), p. 140-142
- [14] Zajkowski M.: LCD, DLP planar lighting fitting, *Przeгляд Elektrotechniczny*, nr 8, 2008, s. 105-107
- [15] Izadi S., Hodges S., Taylor S., Rosenfeld D., Villar N., Butler A., Westhues J.: Going Beyond the Display: A Surface Technology with an Electronically Switchable Diffuser, *UIST'08*, 2008, s. 269-278
- [16] Błaszczak U.J.: Application of pinhole digital camera in size and spatial arrangement of glare sources measurements in an exemplary didactic room, *Przeгляд Elektrotechniczny*, R.84, nr 8 (2008)
- [17] Błaszczak U.J.: Discomfort glare measurement, *Proc. of SPIE*, vol.7502, 2009

Autor:

dr inż. Jacek Kuszniar, Politechnika Białostocka, Wydział Elektryczny, Katedra Elektroenergetyki Fotoniki i Techniki Świetlnej, ul. Wiejska 45D, 15-351 Białystok, E-mail: j.kuszniar@pb.edu.pl
dr hab. inż. Maciej Zajkowski, Politechnika Białostocka, Wydział Elektryczny, Katedra Elektroenergetyki Fotoniki i Techniki Świetlnej, ul. Wiejska 45D, 15-351 Białystok, E-mail: m.zajkowski@pb.edu.pl