

Zbigniew Motyka\*, Henryk Passia\*, Tadeusz Smoła\*, Alicja Bramorska\*\*

## ZINTEGROWANY UKŁAD DO OPTYCZNEJ ŚWIATŁOWODOWEJ CHROMATYCZNEJ FILTRACJI PRZESTRZENNEJ

### Streszczenie

Skonstruowano i poddano badaniom uproszczony model układu do optycznej światłowodowej chromatycznej filtracji przestrzennej. Uzyskano wiele pasm optycznych o różnych dominujących składowych barwnych, których rozróżnienie nie wymagało zastosowania skomplikowanych przyrządów do analizy spektralnej. W tym celu w opracowanym modelu wykorzystano naturalne silne szerokopasmowe źródło światła, jakim jest światło słoneczne. Uzyskano powtarzalny efekt wizualizacji skuteczności optycznej światłowodowej chromatycznej filtracji przestrzennej w układzie światłowodów, zintegrowanym mechanicznie z pojedynczą soczewką chromatyczną. Na bazie uzyskanych doświadczeń został zaprojektowany układ docelowego radiometru do automatycznego pomiaru, rejestracji i analizy emisji światła z ustalonych źródeł punktowych, zgodnie z wymaganą charakterystyką spektralną detekcji. Założenia konstrukcyjne takiego radiometru pozwalają na rezygnację ze stosowania tradycyjnych filtrów optycznych i/lub detektorów o ściśle predefiniowanych charakterystykach widmowych.

### The compact system for chromatic fiber optic spatial filtration

#### Abstract

A simplified model was constructed for tests of chromatic spatial filtration with the use of optic fibers. Many optical bands were obtained with different predominant color components. Their distinction did not require any use of apparatus for spectral analysis. To obtain them, the direct sunlight was used as the wideband natural light source. The repeatable effect of visualization was achieved of effectiveness of optical chromatic spatial filtration in a set of optical fibers integrated mechanically with individual chromatic lens. On the model analysis basis, an arrangement of target radiometer was designed, having to make possible the automatic measurement, registration and analysis of light radiation from point source lying in well-defined spatial place, in good accordance with required spectral profile of detection. Constructional foundations of such radiometer enable to resign from the use of traditional optical (interference) filters and/or detectors of precisely predefined spectral profiles in the case of similar applications.

## 1. WPROWADZENIE

W optoelektronicznej praktyce pomiarowej często jest konieczne stosowanie specjalnych filtrów optycznych, siatek dyfrakcyjnych lub pryzmatów do selekcji określonego pasma pomiarowego. W niniejszym artykule przedstawiono alternatywny sposób uzyskiwania wielu optycznych pasm pomiarowych bez użycia innych elementów optycznych niż zwykle soczewki chromatyczne, zapewniające wprowadzenie wiązki światła do światłowodu. Proponowany sposób polega na takim zanurzeniu wejścia światłowodu w obszarze ogniska soczewki, który zapewnia filtrację przestrzenną inte-

\* Główny Instytut Górnictwa

\*\* na stażu naukowym w Głównym Instytucie Górnictwa

resującego nas pasma widma optycznego. W określonych warunkach geometrycznych układ taki umożliwi jednoczesną filtrację wielu pasm widma przez odpowiednią liczbę światłowodów umieszczonych obok siebie w ognisku tej samej soczewki.

W celu ich określenia, po wstępnych analizach fizyczno-matematycznych, został zaprojektowany, wykonany i poddany badaniom uproszczony model do filtracji przestrzennej podzakresów światła widzialnego. Na podstawie tych doświadczeń zaprojektowano układ docelowego radiometru do automatycznego pomiaru, rejestracji i analizy emisji światła z ustalonych źródeł punktowych, zgodnie z wymaganą charakterystyką spektralną detekcji. Charakterystyka ta będzie zadawana dla danego modelu radiometru na etapie produkcji, przez odpowiednie justowanie wzajemnej konfiguracji przestrzennej soczewki i światłowodów w jej ognisku, w celu ścisłego powiązania docelowych obszarów światłowodowej chromatycznej filtracji przestrzennej z określoną z góry przestrzenną konfiguracją źródła i radiometru. Do ustalania konfiguracji radiometr będzie wyposażony we wskaźnik lub dalmierz laserowy, umożliwiający wizualne nastawianie głowicy pomiarowej na oczekiwany punkt emisji światła. Wyposażenie urządzenia w dalmierz ułatwi spełnienie wymogu zachowania ściśle określonej odległości między nimi. Urządzenie umożliwi pomiar zarówno mocy promieniowania przy emisji ciągłej, jak i impulsowej.

Uproszczony model składa się wyłącznie z układu kolimatora chromatycznego (złożonego ze zwykłej soczewki sferycznej charakteryzującej się dużą aberracją chromatyczną), zintegrowanego z nim mechanicznie układu światłowodów do jednoczesnej filtracji przestrzennej wielu różnych pasm optycznych oraz układu dalmierza laserowego.

Model zaprojektowano w celu uzyskania wielu pasm optycznych o różnych dominujących składowych barwnych, których rozróżnienie nie wymaga zastosowania złożonych przyrządów do analizy spektralnej. W tym celu w opracowanym modelu wykorzystano naturalne silne szerokopasmowe źródło światła, jakim jest światło słoneczne. Uzyskano powtarzalny efekt wizualizacji skuteczności optycznej światłowodowej chromatycznej filtracji przestrzennej w układzie światłowodów, zintegrowanym mechanicznie z pojedynczą soczewką chromatyczną.

Ponieważ w wyniku dyspersji współczynnik załamania światła w szkle jest tym większy, im mniejsza jest długość fali świetlnej (największy dla światła niebieskiego, a najmniejszy dla czerwonego), w typowych soczewkach sferycznych występuje zjawisko aberracji chromatycznej podłużnej (światło niebieskie skupia się najbliżej soczewki, a czerwone – najdalej) i poprzecznej (światło padające na soczewkę pod dużym kątem skupia się w płaszczyźnie ogniskowej w różnej odległości od osi optycznej soczewki; światło niebieskie skupia się najbliżej osi optycznej, a czerwone – najdalej).

Uproszczony model układu został zbudowany właśnie w celu przebadania efektywności chromatycznej filtracji przestrzennej kombinacji obu tych efektów, z uwzględnieniem efektów aberracji sferycznej i astygmatyzmu soczewek oraz dystorsji pola. Dlatego w jego konstrukcji przewidziano zarówno konieczność mechanicznej modyfikacji nachylenia osi optycznej soczewki w stosunku do źródła światła, jak i przesunięcia poprzecznego i podłużnego elementu czołowego poszczególnych światłowodów wykorzystywanej wiązki.

Zaletą proponowanego rozwiązania, w porównaniu z tradycyjnymi układami na bazie pryzmatu lub siatki dyfrakcyjnej, jest jego prostota i wysoka efektywność optyczna (możliwie maksymalny strumień światła ze stosunkowo wąskiego pasma optycznego jest skupiany na wejściu jednego ze światłowodów, bez konieczności stosowania dodatkowych soczewek, na przykład cylindrycznych ani dodatkowych filtrów optycznych). Rozwiązanie takie może znaleźć szerokie zastosowanie zarówno w dziedzinie radiometrii optycznej (umożliwiając – przez swobodny wybór i kształtowanie zakresu pasm mierzonego promieniowania optycznego – stworzenie całej serii radiometrów o określonym przeznaczeniu), jak i – po odpowiedniej miniaturyzacji – w urządzeniach do multipleksacji i demultipleksacji oraz w przełącznikach MEMS optycznych sieci światłowodowych.

## **2. WSTĘPNE OMÓWIENIE ROZWIĄZANIA NA TLE BADAŃ POPRZEDZAJĄCYCH**

Proponowane rozwiązanie jest bardzo zbliżone do wcześniejszych opracowań analogicznych urządzeń światłowodowych, opracowanych w Laboratorium Techniki Laserowej GIG.

W 1989 r. zaproponowano, nowatorski w owym czasie, system automatycznego określania odległości plamki laserowej z zależności kątowych, z wykorzystaniem linijki światłowodowej. Powstał projekt światłowodowego laserowego dalmierza paralaktycznego (Lipowczan i in. 1990; Passia i in. 1991). Analogicznie jak w obecnym rozwiązaniu, w światłowodowym laserowym dalmierzu paralaktycznym wykorzystywano soczewkę (obiektyw) i ustawione liniowo światłowody do automatycznej detekcji odległości do plamki laserowej na mierzonym obiekcie, na podstawie paralaksy optycznej.

Wykorzystywana do testów linijka światłowodów składała się z 31 włókien optycznych, wklejonych jedno za drugim na odcinku 1 cm. Linijka ta została wykonana na zamówienie GIG w Oddziale Badawczo-Produkcyjnym Światłowodów Huty Szkła „Białystok”. Rozdzielczość kątowa układu wynosiła 0,002 rad, co umożliwiało pomiar odległości z dokładnością 1 mm w zakresie 1–20 m, przy bazie paralaksy wynoszącej 1 m (odległość nadajnika laserowego od głowicy pomiarowej) i 3 mm średnicy plamki.

Różnica w konstrukcji obecnego urządzenia sprowadza się do wykorzystania wiązki laserowej jedynie w pierwszym etapie przygotowywania pomiaru, przez naprowadzenie zintegrowanej głowicy urządzenia na punkt pomiarowy (w celu ustawienia ściśle określonej odległości i paralaksy pomiaru).

Wykorzystywana w dalmierzu paralaktycznym linijka światłowodów została zredukowana do kilku pojedynczych (od 2 do 5). Poszczególne światłowody są mocowane niezależnie w specjalnie zaprojektowanym gnieździe, co umożliwia justowanie układu optycznego przed zablokowaniem ich, każdego w stałej, ściśle określonej pozycji pomiarowej w stosunku do ogniska soczewki. Położenie to odpowiada zakresowi widma światła widzialnego, docierającego do urządzenia z punktu pomiarowego (fot. 1), określonego w pierwszym etapie przygotowania pomiaru.



**Fot. 1.** Przykład punktowego źródła promieniowania optycznego na stanowisku pracy

**Phot. 1.** Example of point source of optical radiation on a working place stand

Przewiduje się, że natężenie światła docierające do światłowodu ma być docelowo mierzone odpowiednio wykalibrowanym zestawem identycznych fotodetektorów. W ten sposób selektywność widmową zapewnia sama geometria układu pomiarowego. Wszelkie dodatkowe właściwości selektywne poszczególnych elementów układu (soczewki, materiału światłowodów, detektorów) są traktowane jako zaburzenia dodatkowe, wymagające dodatkowej (jednorazowej) kalibracji całego toru, już po zjustowaniu układu optycznego. Przewiduje się, że podobna kalibracja urządzenia będzie wymagana w serwisie producenta, w regularnych odstępach czasu (przynajmniej rocznych).

Po raz pierwszy ideę takiej filtracji zgłoszono w GIG w 2006 r. w postaci projektu wynalazczego (Bochenek i in. 2006). Przedmiotem wynalazku był radiometr do zdalnego pomiaru natężenia i dawki promieniowania UV na stanowiskach pracy, opracowany tak, aby była możliwość wykorzystywania światłowodowej filtracji przestrzennej do wyboru przewidzianych normami obszarów widma UV, przy pomiarach szkodliwych dawek tego promieniowania.

Rozwiązanie to było wielokrotnie nagradzane i uzyskało:

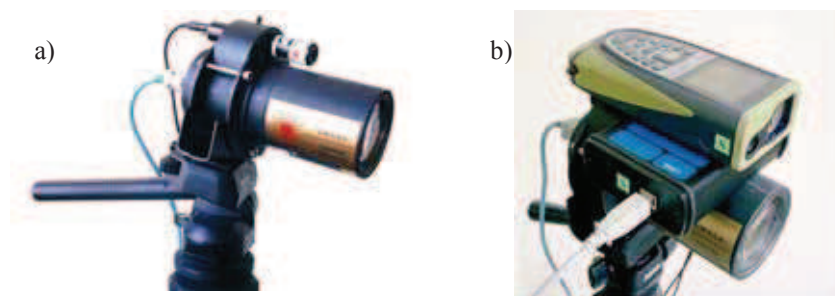
- Złoty Medal Europejski na 55. World Exhibition of Innovation, Research and New Technologies „Brussels Eureka” w 2006 r.,
- Złoty Medal na Międzynarodowej Wystawie Wynalazków w Suzhou w 2008 r.,
- Złoty Medal IFIA na tej samej wystawie w 2008 r.

i co znamienne:

- Brązowy Medal na wystawie IWIS w Warszawie w 2007 r.

Podobny radiometr do zdalnego pomiaru pełnego strumienia promieniowania UV został przedstawiony na fotografii 2. W celu opracowania jego selektywnej wersji, zgodnej z projektem (Bochenek i in. 2006), konieczne okazało się uprzednie szczegó-

łowe przebadanie proponowanego rozwiązania w dogodniejszym do badań obszarze widmowym, jaki stanowi zakres światła widzialnego. Uproszczony model, zbudowany i poddany badaniom w 2010 r., poprzedza zatem wykonanie docelowego radiometru optycznego, pracującego na tej zasadzie, a także – wykonanie i przebadanie analogicznego do niego radiometru UV lub ich kombinacji w jednym urządzeniu.



**Fot. 2.** Radiometr UV do zdalnego pomiaru pełnego strumienia promieniowania UV, w wersji z celownikiem laserowym (a) i dalmierzem (b); opracowany w GIG (2006 i 2008)

**Phot. 2.** The UV radiometer for remote measurement of full stream of UV radiation in the version with laser pointer (a) and with the laser distance meter (b); GIG study (2006 and 2008)

W niniejszym artykule przedstawiono zatem wynik pierwszego etapu badań. W następnym, rozwiązanie to będzie rozszerzane przez zaimplementowanie, przewidywanej w nim docelowo, metody filtracji przestrzennej, i to nie tylko w obszarze światła widzialnego, ale także UV oraz – w dalszej perspektywie – dla podczerwieni.

W ramach pierwszego etapu uzyskano jakościowe wyniki filtracji przestrzennej, z wykorzystaniem pojedynczej chromatycznej soczewki sprzężonej z układem trzech światłowodów. Jako szerokopasmowe źródło światła było wykorzystywane naturalne światło słoneczne. Do justowania układu optycznego opracowano specjalne rozwiązanie mechaniczne z zastosowaniem układu V-rowków (po jednym dla każdego włókna światłowodowego), nachylonych do siebie pod kątem mniejszym od kąta akceptacji światłowodu. Docelowo dwa z nich będą wykorzystane do uzyskania odfiltrowanego sygnału, a dodatkowy – do potwierdzenia poprawności warunków geometrycznych wstępnego ustawienia przyrządu przed dokonaniem pomiaru. Trzeci kanał pozwoli też na wykorzystanie systemu z celownikiem laserowym jako układu paralaktycznej kontroli bez konieczności stosowania dalmierza laserowego.

W pierwszym etapie rozwiązano problem mechanicznego justowania światłowodów w zintegrowanym układzie pomiarowym, za pomocą przyrządu do justowania lub separacji światłowodów, którego rozwiązanie zostało zgłoszone do opatentowania (Motyka, Smoła 2010).

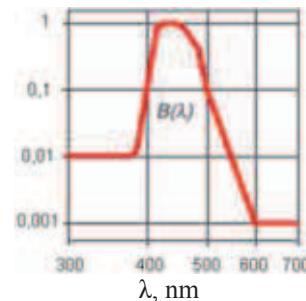
W wersji zgłoszonej jako projekt wynalazczy, stanowi on zarazem zasadniczy element mechaniczny całej konstrukcji, ułatwiający przeprowadzanie optycznego justowania chromatycznego. Justowanie umożliwia jednak dopiero podłączenie do wyjść światłowodów przyrządu do kontroli, w czasie rzeczywistym, przebiegu tego justowania w aspekcie ilościowym. Docelowo będzie go stanowić minispektrometr, którego wejście światłowodowe będzie podłączane kolejno do wyjść światłowodów

pomiarowych w celu dopasowania wybieranego przez nie fragmentu widma optycznego. Urządzenia takie są oferowane przez wielu producentów sprzętu optycznego (na przykład: Avantes BV w Holandii, Hamamatsu w Japonii i VM-TIM w Niemczech).

Przykłady takich minispektrometrów, ze światłowodem i oprogramowaniem, dla zakresu światła widzialnego 340–780 nm stanowią minispektrometry Hamamatsu, typu C9407MA lub model OEM typu C9409MA, na bazie liniowego czujnika obrazowego CMOS, minispektrometr AvaSpec 3648 firmy Avantes BV, z siatką dyfrakcyjną VD na zakres 350–750 nm lub z siatką dyfrakcyjną VE na zakres 350–640 nm, na bazie liniiki CCD zawierającej 3648 pikseli, a także minispektrometry firmy VM-TIM w Jenie, model S41-II na zakres 390–780 nm, na bazie liniowego sensora obrazowego S8378-512Q, zawierającego 512 pikseli.

### 3. NORMY EMISJI DLA WIDZIALNEGO PROMIENIOWANIA OPTYCZNEGO

Promieniowanie optyczne o dużym natężeniu może być szkodliwe dla siatkówki oka. W PN-T-06704:2003 są wskazane wymagania pozwalające na określenie względnej skuteczności widmowej zagrożenia fotochemicznego ( $B_\lambda$ ) siatkówki (rys. 1).



Rys. 1. Względna skuteczność widmowa zagrożenia fotochemicznego ( $B_\lambda$ ) siatkówki (PN-T-06704:2003)

Fig. 1. The relative spectral effectiveness of photochemical threat of the retina ( $B_\lambda$ ) (PN-T-06704:2003)

Promieniowanie optyczne zostało podzielone na grupy barwne o szerokości  $\Delta$  od 23 do 60 nm (tab. 1). Średnio oznacza to pasmo szerokości 37,5 nm, a z wyłączeniem pasm skrajnych – nieco ponad 30 nm.

Tabela 1. Zakresy długości fal promieniowania widzialnego odpowiadające różnym grupom barwnym (PN-T-06704:2003)

Barwa światła	Zakres długości fal, nm	Szerokość pasma, nm
fioletowa	380–436	56
niebieska	436–470	34
niebieskozielona	470–500	30
zielona	500–530	30
zielonożółta	530–566	36
żółta	566–589	23
pomarańczowa	589–620	31
czerwona	620–780	60

#### 4. TŁO TEORETYCZNE I WYNIKI OBLICZEŃ SZACUNKOWYCH DLA UKŁADU OPTYCZNEGO

Podstawowe elementy układu optycznego do światłowodowej filtracji przestrzennej stanowią światłowody kwarcowe i soczewka chromatyczna, wykonana ze szkła optycznego typu BK7. Rzeczywiste soczewki mogą być traktowane jako cienkie, gdy ich grubość  $d \ll f$ , gdzie  $f$  oznacza ogniskową soczewki. W celu oszacowania wpływu dyspersji tego materiału na szerokość pasma wprowadzanego do światłowodu za soczewką można wykorzystać przybliżenie dla soczewek cienkich

$$1/f = (n - 1) [(1/r_1) + (1/r_2)]$$

gdzie:

$f$  – ogniskowa soczewki,

$n$  – współczynnik refrakcji soczewki,

$r_1$  i  $r_2$  – długość promieni krzywizny obu powierzchni soczewki.

Przyjmując ponadto, że  $r_1 = r_2 = r$ , otrzymuje się

$$f = r/[2(n - 1)]$$

Dla  $r = 10$  cm

$$f = 5/(n - 1)$$

Podobnie

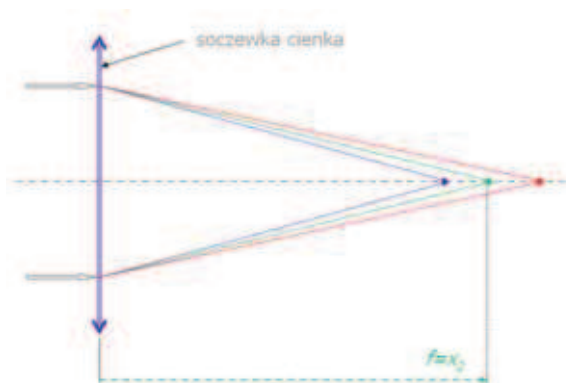
$$1/f = (1/x_1) + (1/x_2)$$

gdzie:

$f$  – ogniskowa soczewki,

$x_1$  i  $x_2$  – odległość przedmiotu i obrazu od soczewki.

Dla źródła światła leżącego w nieskończoności ( $x_1 = \infty$ )  $f = x_2$  (rys. 2).



Rys. 2. Aberracja chromaticzna soczewki cienkiej

Fig. 2. Chromatic aberration of thin lens

Wielkość ta jest zależna od długości fali świetlnej (tab. 2, rys. 3). Oznacza to, że jeżeli na soczewkę pada światło białe, ognisko zostanie rozszczepione na kontinuum barw-

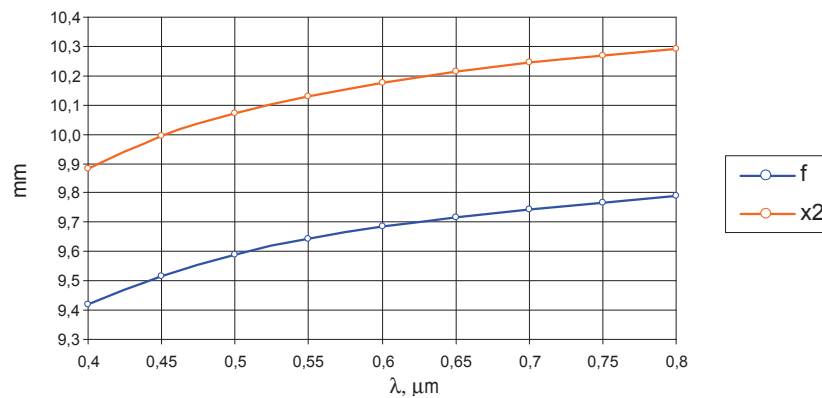
ne. Zjawisko to jest znane pod nazwą aberracji chromatycznej podłużnej. Wartości podane w tabeli 2 zostały wyznaczone z empirycznego równania Sellmeiera

$$n^2(\lambda) = 1 + B_1 \lambda^2/(\lambda^2 - C_1) + B_2 \lambda^2/(\lambda^2 - C_2) + B_3 \lambda^2/(\lambda^2 - C_3)$$

gdzie wartości współczynników  $B_1 = 1,03961212$ ,  $B_2 = 0,231792344$ ,  $B_3 = 1,01046945$ ,  $C_1 = 0,00600069867 \mu\text{m}^2$ ,  $C_2 = 0,0200179144 \mu\text{m}^2$ ,  $C_3 = 103,560653 \mu\text{m}^2$  zaczerpnięto z tablic materiałowych dla szkła firmy Schott (N-BK7).

**Tablica 2.** Długość ogniskowej  $f$  i odległość obrazu  $x_2$  przedmiotu leżącego w odległości 200 cm, w zależności od długości fali  $\lambda$  dla soczewki cienkiej ze szkła typu BK7 o długościach promieni krzywizny obu jej powierzchni wynoszących 10 cm

$\lambda, \mu\text{m}$	$n$	$f = 5(n - 1), \text{cm}$	$x_2, \text{cm}$
0,4	1,53085	9,42	9,88
0,5	1,52141	9,59	10,07
0,6	1,51629	9,68	10,18
0,7	1,51306	9,75	10,24
0,8	1,51078	9,79	10,29



**Rys. 3.** Zależność długości ogniskowej  $f$  i odległości obrazu  $x_2$  od długości fali  $\lambda$

**Fig. 3.** Focal length  $f$  and image distance  $x_2$  spectral characteristics

Z tabeli 2 i rysunku 3 wynika, że długość ogniskowej  $f$  oraz odległość obrazu  $x_2$  zmienia się maksymalnie o około 2 mm przy zmianie współczynnika załamania o 0,01.

Oznacza to, że szerokość zakresu spektralnego, odfiltrowana przez światłowod o średnicy rdzenia 400  $\mu\text{m}$  (pięciokrotnie mniejszej od przedziału zmian długości ogniskowej, wynoszącego 2 mm), waha się od około 20 nm (dla zakresu długości fali światła 0,4–0,5  $\mu\text{m}$ ) do około 60 nm (dla zakresu długości fali światła 0,5–0,8  $\mu\text{m}$ ). Zwiększenie średnicy rdzenia światłowodu do 600  $\mu\text{m}$  powoduje proporcjonalny wzrost zakresu filtracji (od 30 do 90 nm).

Pozwala to na uzyskanie filtracji dowolnej grupy barwnej z tabeli 1. W praktyce są potrzebne jednak szersze zakresy filtracji, rzędu 150 nm (rys. 1). Wartości takie można uzyskać, zmniejszając długość ogniskowej soczewki o połowę. Wówczas długość ogniskowej  $f$  oraz odległość obrazu  $x_2$  będzie się zmieniać maksymalnie o około



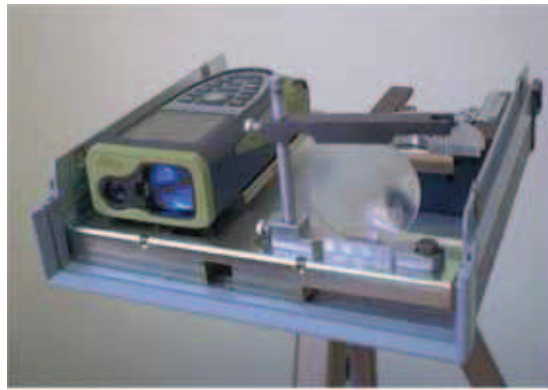
1 mm przy zmianie współczynnika załamania o 0,01. To pozwoli na uzyskanie zakresów filtracji w pasmach o szerokości od 40 do 180 nm, a zwiększenie średnicy światłowodu do 800  $\mu\text{m}$  – zakresów od 80 nm do 240 nm. Dlatego, przykładowo, złożenie dwóch takich zakresów, dla soczewki o ogniskowej 5 cm i rdzeniu światłowodu o średnicy 600  $\mu\text{m}$ , powinno (w odpowiednim zgraniu z charakterystyką detektorów) zapewnić wpisanie się w charakterystykę względnej skuteczności widmowej zagrożenia fotochemicznego siatkówki (rys. 1).

## 5. OPIS UKŁADU

Zintegrowany układ do optycznej światłowodowej chromatycznej filtracji przestrzennej jest przeznaczony do zdalnego pomiaru natężenia i dawki promieniowania widzialnego i (opcjonalnie) ultrafioletowego na stanowisku pracy, emitowanego z krótkotrwałych źródeł punktowych wskutek prowadzenia pewnych operacji technologicznych (spawanie, nitowanie na gorąco). Składa się on z:

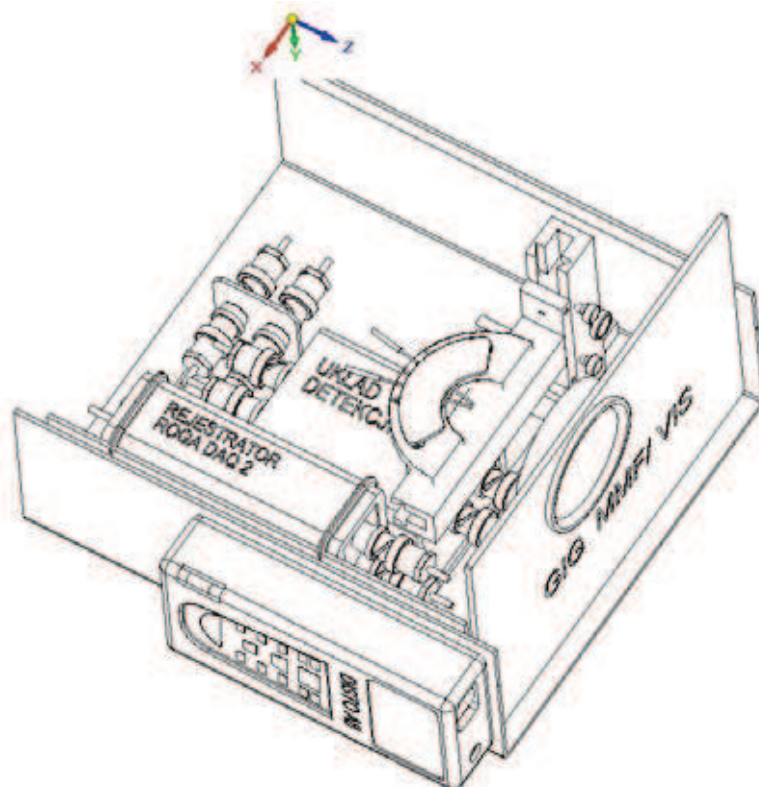
- 1) optycznego układu kolimacyjnego, utworzonego przez soczewkę, najkorzystniej chromatyczną, skupiającą sygnał optyczny w ognisku,
- 2) optycznego układu separacji przestrzennej różnych pasm skolimowanego sygnału optycznego w postaci układu światłowodów roboczych,
- 3) gniazda światłowodów roboczych, które stanowi płytka stalowa z nachylonymi do siebie V-rowkami; światłowody docelowo powinny być zaopatrzone w złącza światłowodowe do wymiennego podpinania przyrządu do justowania optycznego oraz układu detektorów,
- 4) układu detekcji z zasilaczem, zaopatrzonego w przynajmniej dwa detektory światła widzialnego, najkorzystniej o szerokopasmowych charakterystykach spektralnych oraz (opcjonalnie) dodatkowy detektor światła widzialnego (dla światła czerwonego), sterujący jasnością pracy wskaźnikowej diody LED (detektor sygnału kontrolno-nastawczego); docelowo detektory powinny być zaopatrzone w pigtaile światłowodowe zakończone złączami zgodnymi ze złączami światłowodów roboczych,
- 5) układu dalmierza laserowego do nakierowywania osi optycznej głowicy pomiarowej na punktowe źródło analizowanego promieniowania,
- 6) wielokanałowego (przynajmniej dwukanałowego) zespołu analogowo-cyfrowej rejestracji sygnału,
- 7) oprogramowania do analizy zarejestrowanych sygnałów na przenośnym komputerze współpracującym z układem rejestratora wielokanałowego (4) przez złącze USB, docelowo w czasie rzeczywistym.

Elementy (1), (2), (3) i (5) zostały przetestowane w układzie modelowym przedstawionym na zdjęciu 3. Pozostałe elementy zostały przedstawione w postaci projektu układu docelowego na rysunku zestawieniowym (rys. 4) oraz omówione w poniższych punktach. Były one wielokrotnie testowane w innych, analogicznych urządzeniach optoelektronicznych w Laboratorium Techniki Laserowej GIG..



**Fot. 3.** Model zintegrowanego układu do testów optycznej światłowodowej chromatycznej filtracji przestrzennej

**Phot. 3.** Compact model for tests of chromatic spatial filtration with the use of optic fibers



**Rys. 4.** Projekt docelowego, zintegrowanego urządzenia MMF/VIS do optycznej światłowodowej chromatycznej filtracji przestrzennej

**Fig. 4.** The targeted project of integrated device MMF/VIS designed for optical chromatic spatial filtration

Światło zbierane przez soczewkę chromatyczną jest skupiane w jej ognisku. Ognisko, z uwagi na aberrację chromatyczną jest rozmyte i tworzy barwne prążki odpowiadające pasmom o różnych zakresach długości fali. Odpowiednio umieszczone w nich detektory o niewielkiej powierzchni, a najkorzystniej końcówki światłowodowych pigtaili takich detektorów, będą zbierały światło tylko ze stosunkowo wąskiego pasma widma. Dodatkowo umieszczenie źródła światła poza osią optyczną soczewki powoduje liniowe rozciągnięcie ogniska w kierunku poprzecznym do osi optycznej soczewki kolimującej, co ułatwia dostęp do wybranych pasm promieniowania. W przypadku wykorzystania pigtaili, umożliwia to wybranie z widma takiej charakterystyki, która będzie miała kształt zbliżony (w wymaganym normami stopniu) do krzywych pozwalających na określenie dawki biologicznej promieniowania (rys. 1) bez konieczności dodatkowego zastosowania jakichkolwiek tradycyjnych filtrów optycznych.

### 5.1. Optyczny układ kolimacyjny

Układ ten stanowi pojedyncza soczewka chromatyczna ze szkła typu BK7 o średnicy 57 mm i ogniskowej 50 mm, zamocowana (wymienne do celów eksperymentalnych z soczewką o ogniskowej 100 mm i średnicy 48 mm) w prostokątnym uchwycie mechanicznym z dwóch ramion dociskających, osadzanych na wspólnym trzpieniu (model) lub w płycie czołowej obudowy urządzenia (docelowo).

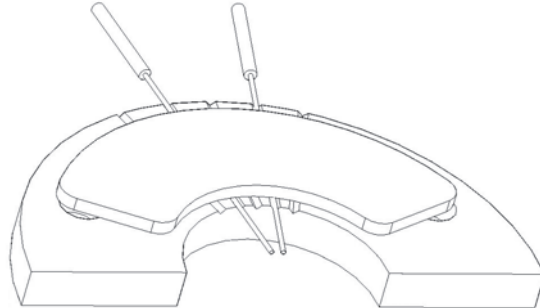
### 5.2. Układ światłowodów do filtracji przestrzennej

Do testów wykorzystano wielomodowe światłowody kwarcowe, produkcji OTO (Ośrodka Techniki Optotelekomunikacyjnej w Lublinie), o średnicy 400  $\mu\text{m}$  i parametrach porównywalnych z docelowymi. Docelowo mogą być także wykorzystywane dowolne wielomodowe światłowody o małej zawartości jonów OH i średnicy około 400  $\mu\text{m}$ . Na przykład światłowody typu BFH22-365 firmy Thorlabs o następujących parametrach:

- apertura numeryczna:  $0,22 \pm 0,02$  (dostępne też 0,1; 0,38 i 0,48);  
oznacza to, że wszystkie trzy światłowody powinny być rozmieszczone najkorzystniej w obrębie kąta 0,44 rad (ok. 25°),
- tłumienność: od 5 dB/km (dla 800 nm) do 40 dB/km (dla 400 nm);  
oznacza to transmisję powyżej 99% dla odcinka światłowodu długości 1 m, w paśmie 400–800 nm,
- rdzeń/płaszcz: *pure silica/fluorine silica*,
- profil współczynnika załamania: skokowy,
- średnica rdzenia:  $365 \mu\text{m} \pm 2\%$ ,
- średnica płaszcza:  $400 \mu\text{m} \pm 2\%$ ,
- średnica bufora:  $425 \mu\text{m} \pm 3\%$ ,
- średnica osłony:  $730 \mu\text{m} \pm 5\%$ ,
- minimalny promień zgięcia: 12 cm (długookresowy), 4 cm (chwilowy).

### 5.3. Gniazdo światłowodów

Gniazdo światłowodów stanowi płytka z pięcioma V-rowkami na światłowody, rozmieszczonymi co około 10 stopni kątowych. Światłowody, po zjustowaniu układu są dociskane w nich płytką namagnesowaną. Rozwiązanie to zostało zgłoszone w Urzędzie Patentowym RP jako projekt wynalazczy i stanowi zasadniczy element mechaniczny całej konstrukcji. Przyjętą do wykonania wersję przedstawiono na rysunku 5.

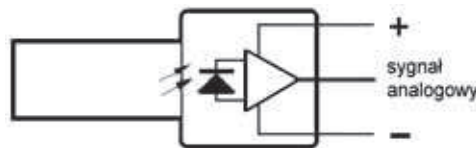


**Rys. 5.** Gniazdo do mechanicznego justowania światłowodów w ognisku soczewki

**Fig. 5.** Mechanical element for alignment of optical fibers within the focus of a lens

### 5.4. Detektory światła widzialnego

Docelowo przewiduje się wykorzystanie dwóch detektorów na światło widzialne o możliwie płaskiej charakterystyce, zaopatrzonych w światłowody ze złączami zgodnymi ze złączami przewidywanymi docelowo na jednym końcu światłowodów roboczych lub w gniazda umożliwiające bezpośrednie podłączenie światłowodów roboczych (rys. 6).



**Rys. 6.** Schemat detektora z wbudowanym układem przedwzmacniacza

**Fig. 6.** Diagram of fiber optic receiver incorporating a photodetector and DC preamplifier circuit

Przyjmując, że w przybliżeniu charakterystyka fotodetektora (np. według tab. 3) oraz tłumienność światłowodu pozostają z grubsza liniowe w interesującym nas obszarze widma, dokonano na przykładzie normatywnej charakterystyki względnej skuteczności widmowej  $B_\lambda$  siatkówki, oszacowania koniecznych do uwzględnienia poprawek, niezbędnych do uzyskania właściwej charakterystyki spektralnej  $F_\lambda$ , do której należy dopasować układ światłowodowej chromatycznej filtracji optycznej.

Na rysunku 7 oraz w tabeli 3 przedstawiono charakterystykę spektralną kalibrowanego fotodetektora krzemowego FSD100-CAL. Z rysunku wynika, że pozostaje ona w przybliżeniu liniowa w zakresie 400–700 nm światła widzialnego. W celu uzys-

kania właściwej charakterystyki spektralnej  $F_\lambda$ , do której należy dopasować układ światłowodowej filtracji optycznej zagrożenia fotochemicznego, należy zatem przemnożyć względną skuteczność widmową  $B_\lambda$  siatkówki (rys. 3) przez tę prostą oraz przez współczynnik transmisji  $T_\lambda$  odcinka światłowodu długości 1 m. Współczynnik  $T_\lambda$  można oszacować jako

$$T_\lambda = (0,009/620)(\lambda - 380) + 0,99,$$

otrzymując w efekcie dla zakresu 400–600 nm

$$F_\lambda = [(0,23/200)(\lambda - 400) + 0,05] T_\lambda B_\lambda.$$

Ponadto, wartości skrajne można znaleźć w tabeli 3:

$$F_{380} = 0,0358 T_{380} B_{380},$$

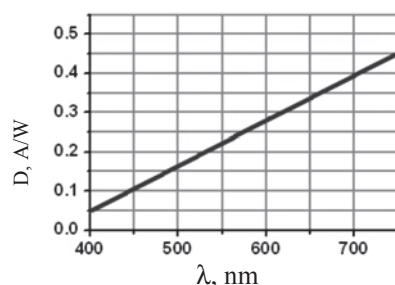
$$F_{390} = 0,0415 T_{390} B_{390}.$$

Dla zakresu 600–700 nm natomiast, w którym  $B_\lambda = 0,001$ , otrzymuje się

$$F_\lambda = 0,001 [(0,117/100)(\lambda - 600) + 0,279] T_\lambda.$$

**Tabela 3.** Charakterystyka fotodetektora krzemowego typu FSD100-CAL firmy Hamamatsu

Długość fali, nm	Czułość, A/W
380	0,03580452
390	0,04150065
400	0,04971302
500	0,1640494
600	0,2792291
700	0,3960289
750	0,4504927



**Rys. 7.** Charakterystyka spektralna przykładowego, kalibrowanego fotodetektora typu FSD100-CAL produkcji Hamamatsu:  $\lambda$  – długość fali,  $D$  – czułość

**Fig. 7.** The spectral response of calibrated Hamamatsu receiver FSD100-CAL:  $\lambda$  – wavelength,  $D$  – sensitivity

Charakterystyka tłumienności światłowodu i charakterystyka detektora kwantowego nie są dokładnie liniowe w analizowanym obszarze światła widzialnego. Dlatego w ostatecznych obliczeniach należy docelowo wykorzystać dokładną charakterystykę konkretnego fotodetektora (np. według tab. 3) oraz konkretnego odcinka światłowodu.

### 5.5. Układ dalmierza laserowego

Przewiduje się zintegrowanie układu pomiarowego w jednej obudowie ze szwajcarskim, obsługiwanym niezależnie, ręcznym dalmierzem laserowym Leica DISTO™ A8, z czerwoną wiązką laserową długości fali 635 nm, wyposażonym w podgląd pola pomiaru za pomocą zintegrowanej kamery optycznej z wyświetlaczem. Dokładność pomiarowa tego urządzenia wynosi  $\pm 1,5$  mm. Zasięg od 0,05 do 200 m. Średnica plamki w odległości 5 m wynosi 3 mm. Model jest zaopatrzony w gwint do statywu, ułatwiający montaż urządzenia w zintegrowanym układzie pomiarowym. Ma wymiary  $148 \times 64 \times 36$  mm (fot. 4).



**Fot. 4.** Dalmierz laserowy Leica DISTO™ A8 z czerwoną wiązką laserową, wyposażony w podgląd pola pomiaru za pomocą zintegrowanej z urządzeniem kamery optycznej z wyświetlaczem, składających się na cyfrowy celownik z trzykrotnym powiększeniem celu

**Phot. 4.** The laser distance meter Leica DISTO™ A8 with a red laser beam, with integrated camera for monitoring the measurement field on an integrated display, forming together digital viewfinder with a triple digital zoom

### 5.6. Dwukanałowy układ analogowo-cyfrowej rejestracji sygnału

Sygnały z dwóch detektorów układu detekcji są kierowane do dwukanałowego układu analogowo-cyfrowej rejestracji sygnału RogaDAQ2 (fot. 5), pozwalającego na uzyskanie (w laptopie z oprogramowaniem tego układu podłączonego do niego kablem USB) plików danych 24-bitowych, dla każdego z sygnałów docierających z poszczególnych detektorów.

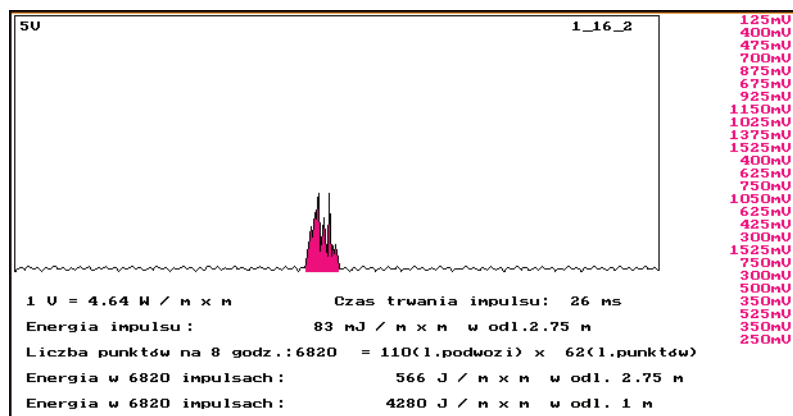


**Fot. 5.** Dwukanałowy rejestrator analogowo-cyfrowy RogaDAQ2

**Fig. 5.** 2-channel AD recorder RogaDAQ2

## 5.7. Oprogramowanie do analizy zarejestrowanych sygnałów na komputerze przenośnym

Do analizy pojedynczego impulsu promieniowania, zapisanego w jednym z kanałów dwukanałowego rejestratora RogaDAQ2, posłuży (po niewielkich modyfikacjach) własna aplikacja oprogramowania na komputer osobisty, opracowana wstępnie do analizy impulsów promieniowania optycznego. Przykładowy ekran analizy pojedynczego impulsu promieniowania zapisywanego w jednym z kanałów dwukanałowego rejestratora RogaDAQ2 przedstawiono na rysunku 8.

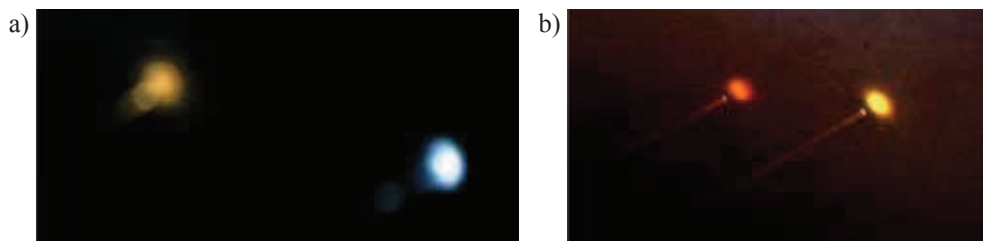


Rys. 8. Przykładowy ekran analizy pojedynczego impulsu promieniowania rejestrowanego w jednym z kanałów dwukanałowego rejestratora RogaDAQ2

Fig. 8. Example screen of individual impulse radiation analysis, recorded in one channels of the 2-channel recorder RogaDAQ2

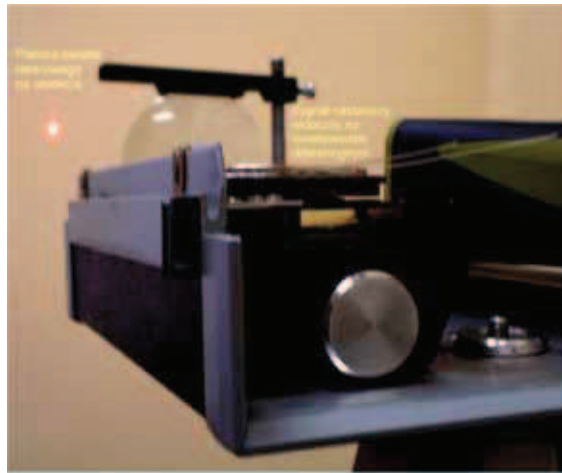
## 6. WYNIKI BADAŃ UKŁADU

Na poniższych zdjęciach przedstawiono przykładowe jakościowe rezultaty uzyskane z zastosowaniem modelu zintegrowanego układu do optycznej światłowodowej chromatycznej filtracji przestrzennej (fot. 6 i 7).



Fot. 6. Przykłady światłowodowej chromatycznej filtracji przestrzennej; na oddzielnych światłowodach uzyskano sygnały świetlne z wyraźną dominacją pomarańczową i niebieską (a) oraz czerwoną i żółtą (b)

Phot. 6. Examples of optical chromatic spatial filtration; light signals on separate optical fibers were obtained with clear orange and blue (a) as well as red and yellow (b) dominants



**Fot. 7.** Sygnał kontrolno-nastawczy z czerwonego lasera dalmierza typu Disto A8 odbierany przez jeden ze światłowodów układu światłowodowej chromatycznej filtracji przestrzennej

**Phot. 7.** Control-aligning signal from red laser of laser distance meter Disto A8 received by one of optical fibers of a set for optical chromatic spatial filtration

Jako źródła szerokopasmowego światła białego używano światła słonecznego. Na wyjściach poszczególnych światłowodów modelu zintegrowanego układu do optycznej światłowodowej chromatycznej filtracji przestrzennej uzyskano sygnały świetlne o widocznych różnych dominantach barwnych (fot. 6). Oddzielnie przetestowano także światłowodowy kanał sygnału kontrolno-nastawczego. Jako źródła użyto czerwonego światła laserowego z dalmierza typu Disto A8 (fot. 7).

## 7. PODSUMOWANIE

Skonstruowany i poddany badaniom model układu do optycznej światłowodowej chromatycznej filtracji przestrzennej pozwolił na uzyskanie wielu pasm optycznych o różnych dominujących składowych barwnych, których rozróżnienie nie wymagało zastosowania złożonych przyrządów do analizy spektralnej. W tym celu w opracowanym modelu wykorzystano naturalne, silne, szerokopasmowe źródło światła, jakim jest światło słoneczne. Uzyskano powtarzalny efekt wizualizacji skuteczności optycznej światłowodowej chromatycznej filtracji przestrzennej w układzie światłowodów zintegrowanym mechanicznie z pojedynczą soczewką chromatyczną.

Uzyskane jakościowe wyniki filtracji przestrzennej potwierdziły możliwość wykorzystania do tego celu pojedynczej chromatycznej soczewki sprzężonej z układem trzech światłowodów. Stało się to możliwe dzięki, specjalnie opracowanemu do justowania układu optycznego, rozwiązaniu mechanicznemu, z wykorzystaniem układu nachylonych do siebie V-rowków (po jednym dla każdego włókna światłowodowego), które okazało się przydatne do precyzyjnego wprowadzania końców poszczególnych światłowodów, niezależnie od siebie, do różnych obszarów rozciągniętego (m.in. w efekcie aberracji chromatycznej) ogniska soczewki.



**Literatura**

1. Bochenek W., Lipowczan A., Motyka Z., Passia H., Smoła T., Szade A. (2006): Radiometr do zdalnego pomiaru natężenia i dawki promieniowania UV na stanowiskach pracy. Zgłoszenie projektu wynalazczego nr 19/2006 z 14.11.2006.
2. Lipowczan A., Motyka Z., Passia H. (1990): Automatyczny laserowy dalmierz paralaktyczny na bazie linijki światłowodów. Materiały II Konf. nt. Zastosowania Światłowodów, Białowieża, PAN.
3. Motyka Z., Smoła T. (2010): Przyrząd do justowania lub separacji światłowodów. P-393165, 21.12.2010.
4. Passia H., Aloszko S., Bartodziej H., Dorosz J., Lipowczan A., Małota Z., Motyka Z., Osiński T., Smoła T., Szade A. (1991): Automatyczny laserowy dalmierz paralaktyczny. Patent nr 152470. Urząd Patentowy RP. Opis patentowy z 18.09.1991.
5. PN-T-06704:2003 Zestawienie maksymalnych dopuszczalnych ekspozycji dla niekoherentnego (nielaserowego) promieniowania optycznego.

**Recenzent:** dr hab. Adam Smoliński, prof. GIG