

Charakterystyka światłowodów bocznych ze spiralnym rdzeniem

Streszczenie. Konstrukcja światłowodu włóknistego emitującego lub absorbującego promieniowanie powierzchnią boczną, wymaga zastosowania w obszarze propagacji promieniowania, elementów rozpraszających powodujących lokalne zaburzenie w przewodzeniu modów, doprowadzając w efekcie do częściowej ich utraty powierzchnią boczną. W przypadku emisji promieniowania poprzez boczną, walcową powierzchnię światłowodu problem polega na ustaleniu charakteru rozsyłu tego promieniowania. Światłowody o spiralnie rozłożonych warstwach rozpraszających, opracowane i wykonane na Politechnice Białostockiej, pozwalają na konstruowanie specjalnych czujników promieniowania w zakresie UV-VIS-NIR, które mogą być wrażliwe nie tylko naabrany zakres promieniowania ale również mogą być czułe na przestrzenną propagację światła.

Abstract. Construction of optical fiber, which emits or absorbs radiation through the side surface, requires the use of distractions that cause local disturbance propagating. The result is a partial loss of the mods on the fiber lateral surface. It is important to determine the nature of the radiation beam. Fiber layers of helically distributed diffuse, designed and constructed in Białystok University of Technology, allow the construction of special sensors in the UV-VIS-NIR, which can be sensitive not only to the desired range of radiation but can also be sensitive to spatial light propagation.

Optical fibers emitting radiation through the side surface

Słowa kluczowe: światłowody, emisja, detekcja, luminancja, pomiary.

Keywords: optical fibres, emission, detection, luminance, measurements.

Wstęp

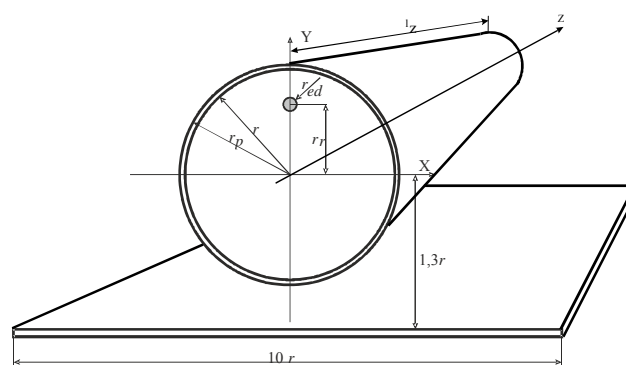
Podstawowym, powszechnie znanym, zadaniem światłowodu jest przeniesienie czytelnego sygnału optycznego przez cały odcinek długości włókna optycznego. Aby to osiągnąć, należy między innymi ograniczyć do minimum straty energii, wynikające z odbić na granicy rdzeń – płaszcz światłowodu. Jednakże, w wybranych przypadkach, celowo dąży się do wyprowadzenia strumienia świetlnego przez powierzchnię boczną światłowodu. Emisję strumienia świetlnego poprzez boczną powierzchnię światłowodu zrealizować można w różny sposób. Możliwe jest lokalna zmiana kształtu pobocznic światłowodu lub rozpraszanie promieniowania padającego na granicę ośrodków optycznych. Światłowody boczne ze spiralnym rdzeniem charakteryzują się odmiennym sposobem emisji bocznej. Jest ona wynikiem kontrolowanego rozpraszania wewnątrz włókna optycznego [1].

Projekt wybranych konstrukcji światłowodów o bocznych rozsyłach strumienia świetlnego

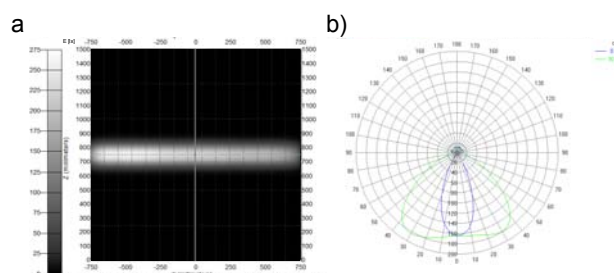
Obliczenia rozsyłu strumienia świetlnego światłowodów o bocznym rozsyłach promieniowania wykonano w oparciu o modyfikowaną metodę strumieniową, wykorzystującą analizę Monte Carlo obliczeń świetlnych [2]. Zaprojektowano kilka charakterystycznych konstrukcji światłowodów cylindrycznych, zawierających w obszarze rdzenia lub w obszarze przyplaszczowym rozpraszające elementy walcowe, wykonane z wytworzonego szkła domieszkowanego fluorem [4]. Rozpatrywane modele matematyczne charakteryzowały się następującymi właściwościami:

- rdzeń światłowodu wykonany jest ze szkła o współczynniku załamania $n_1 = 1,62004$,
- apertura numeryczna $NA = 0,5868$ (w powietrzu),
- współczynnik załamania materiału płaszczu $n_2 = 1,510$,
- współczynnik załamania szkła domieszkowanego fluorem $n_d = 1,503$,
- średnica rdzenia światłowodu jest stała i równa $r = 10$, zaś położenie r_r i rozmiar elementu ze szkła domieszkowanego r_{ed} zależy od średnicy rdzenia,
- źródło światła jest punktowe, i umieszczone względem czołowej powierzchni wejściowej światłowodu tak, aby uzyskać jak najlepsze sprzężenie włókna optycznego ze źródłem światła,
- w bilansie promieniowania uwzględniono odbicia fresnelowskie na powierzchniach czołowych,

- model światłowodu oświetla ekran pomiarowy o rozmiarach odpowiadających długości włókna optycznego oraz szerokości $10r$, umieszczony w odległości $1,3r$ od osi włókna.



Rys. 1. Geometria światłowodu modyfikowanego z jedną powierzchnią rozpraszającą w obszarze rdzenia, oświetlającego ekran pomiarowy

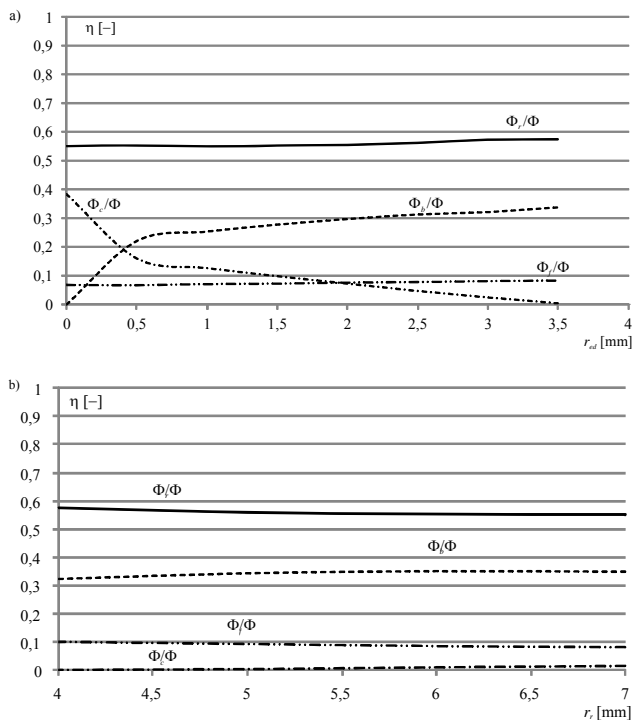


Rys. 2. Boczny światłowód spiralny z jedną powierzchnią rozpraszającą w obszarze przyplaszczowym: a) rozkład natężenia oświetlenia ekranu pomiarowego, b) krzywa światłości

Analiza modelu światłowodu polegała na wykonaniu serii obliczeń, podczas których modyfikowano geometrię włókna optycznego. Modyfikacja polegała na profilowaniu położenia elementu rozpraszającego r_r względem osi światłowodu, oraz na wyborze rozmiaru tego elementu r_{ed} (rys. 1). Charakterystyki rozsyłu strumienia świetlnego przedstawiono na rysunku 2, gdzie zaprezentowano wyniki obliczeń rozkładu natężenia oświetlenia ekranu pomiarowego oraz

rozsyłu światłości konstrukcji optycznej z pojedynczą warstwą rozpraszającą.

W pierwszym etapie należało określić rozmiar promienia pojedynczej warstwy dyfuzyjnej $r_{ed} = 1$, przy którym sprawność emisji bocznej będzie największa. W wyniku przeprowadzonych symulacji obliczeniowych uzyskano największą sprawność emisji bocznej, gdy $r_{ed} = 2$. Drugi krok obliczeń związany był z dobraniem ilości warstw rozpraszających o promieniu jednostkowym, umieszczonych w odległości $0,5r$. Sprawność emisji bocznej jest największa, gdy ilość rozpraszających powierzchni wynosi $k = 3$. Ostatnim krokiem było określenie odległości r_r przy której rozlokowane powierzchnie rozpraszające będą charakteryzować się największą sprawnością emisji strumienia świetlnego powierzchnią boczną ($r_r \approx 0,7r$).



Rys. 3. Względna wartość strumienia świetlnego wybranych modelowych układów świetlno-optycznych: a) w funkcji promienia r_{ed} pojedynczego elementu rozpraszającego znajdującego się w odległości $0,5r$, b) w funkcji położenia r_r warstwy względem osi światłowodu

Wspomniane rozważania doprowadziły do określenia optymalnych parametrów struktury geometrycznej włókna pod względem sprawności wyjścia strumienia świetlnego poprzez boczną powierzchnię walcową światłowodu modyfikowanego.

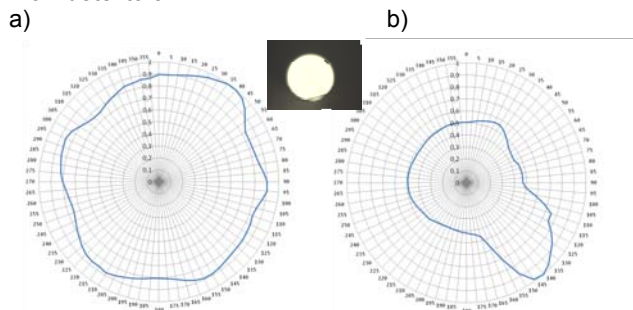
Światłowod o jednej powierzchni rozpraszającej ułożonej w obszarze przyplaszczonym ($r_r \approx r$) emituje strumień świetlny tak, że średnia szybkość zmian rozkładu natężenia oświetlenia wzdłuż włókna wynosi około 30% E_{max} na długości odcinka badanego (rys. 3). Konstrukcja optyczna o sześciu warstwach rozpraszających przy granicy rdzeń-plaszcz powoduje emisję strumienia świetlnego bardziej ekspansywną niż układ z jedną warstwą. Szybkość emisji strumienia świetlnego w tym rozwiązaniu wynosi ponad 70% E_{max} na długości l_z .

Obliczenia modelowych konstrukcji światłowodów bocznych pozwoliły stworzyć rozwiązania, których właściwości zależą ściśle od geometrii i rozmieszczenia warstw technologicznych.

Wyniki pomiarów rozsyłu światłości wybranych modeli światłowodów o bocznej emisji strumienia świetlnego

Pomiary światłości względnej wykonano na stanowisku goniometrycznym, z wykorzystaniem detektora w postaci fotodiody PBYP07, posiadającego korekcję przestrzenną oraz widmową. Pomiarów dokonany w stałej odległości względem czoła wejściowego badanego światłowodu (1m). Miało to na celu uniknięcie wpływu strumienia odbitego od czołowej powierzchni wejściowej włókna optycznego. Z racji na współpracę światłowodu ze źródłem światła w postaci diody LED o mocy 1W, odległość pomiędzy czołem wejściowym i powierzchnią emisyjną diody była niewielka, a światłowod z każdym razem kontrolowano pod względem jakości czołowej powierzchni wejściowej.

Pojedyncza warstwa rozpraszająca umieszczona w obszarze przyplaszczonym powoduje znaczny stopień rozpraszania światła po przeciwnej stronie do jej umieszczenia w przekroju światłowodu (rys. 4). Gdy światłowod poddawany jest modyfikacji poprzez zastosowanie spiralnych warstw rozpraszających, profile krzywych światłości stają się gładkie, a gradienty zmian światłości poprzecznej mniejsze. Wynika stąd, iż poprzez dynamiczną zmianę skoku spiralnego układu warstw rozpraszających możliwe jest modelowanie rozsyłu strumienia świetlnego, zarówno w przekroju wzdłużnym jak też poprzecznym włókna optycznego. Różnice pojawiają się głównie dlatego, iż badania dotyczą układu rzeczywistego, gdzie materiał nie jest idealny i posiada rozpraszanie własne, będące wynikiem technologii wytwarzania i niejednorodności zastosowanego materiału. Dodatkowo należy uwzględnić fakt, iż dokładność pomiarów wynika z zastosowanego, mierzalnego sposobu ustawiania fotodetektora, względem badanego światłowodu. Odległość fotometrowania była za każdym razem zachowana, jednakże pomiar małych sygnałów na fotodiodzie mógł być obciążony dodatkowym błędem wynikającym z istnienia szumów detektora.



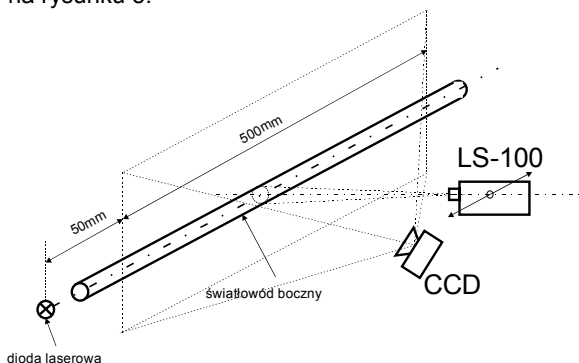
Rys. 4. Krzywe światłości w przekroju poprzecznym światłowodu: a) z jedną warstwą rozpraszającą spiralną w obszarze przyplaszczonym ($s = 12$ mm), b) z jedną warstwą liniową rozpraszającą w obszarze przyplaszczonym

Wyniki pomiarów rozkładu luminancji wybranych modeli światłowodów o bocznej emisji strumienia świetlnego

Badanie rozkładu luminancji powierzchni bocznej światłowodów, istotne w zastosowaniach iluminacyjnych, wykonano na stanowisku z miernikiem luminancji i detektorem matrycowym CCD [5]. Miernik luminancji Minolta LS-100 o kącie fotometrowania 1° służył do oceny średniej wartości luminancji włókna optycznego emitującego promieniowanie poprzez walcową powierzchnię boczną. Za pomocą matrycowego miernika CCD o rozmiarze 5MPx i formacie $1/2,5''$ i rozdzielczości 2816×2112 punktów dokonano pomiaru rozkładu luminancji światłowodu badanego na odcinku 500mm, począwszy od 50mm od źródła światła, którym była dioda laserowa o mocy <50 mW i długości fali ok. 650nm przy maksymalnej emisji promieniowania o szerokości półwoko-

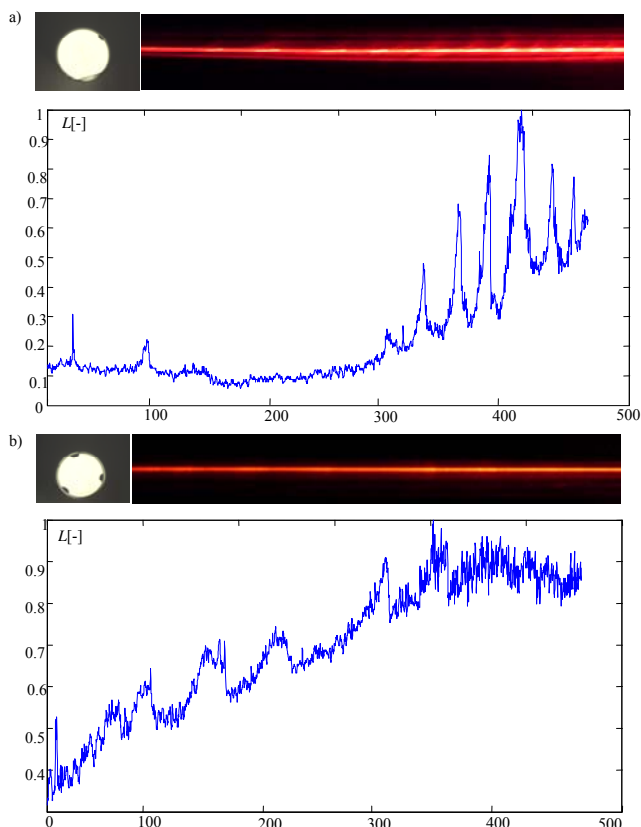
wej ok. 6nm. Źródło zostało wybrane tak, aby mogło współpracować w układach zarówno iluminacyjnych, jak również pomiarowych (czujnikowych).

Stanowisko pomiarowe do wyznaczania luminancji światłowodu zbudowane było w oparciu o schemat przedstawiony na rysunku 5.



Rys. 5. Schemat stanowiska pomiarowego do wyznaczania rozkładu luminancji światłowodu bocznego

Rozkład luminancji bocznej powierzchni światłowodu zależy od właściwości emisyjnych źródła światła, natomiast nie jest zależny od mocy promieniowania wprowadzonego do światłowodu. Zatem w dalszej analizie nie uwzględnia się informacji o mocy lub strumieniu świetlnym źródła światła tylko o jego właściwościach spektralnych. Wystarczające jest, aby znana była względna zmiana wartości wielkości mierzonej.



Rys. 6. Rozkład luminancji bocznej powierzchni wybranych konstrukcji światłowodowych: a) światłowód z jedną spiralną warstwą rozpraszającą b) światłowód z trzema warstwami rozpraszającymi w obszarze przyplaszczowym

Rozpatrując przebieg sygnału proporcjonalnego do luminancji powierzchni bocznej światłowodu (rys. 6) nasuwają się następujące wnioski:

- charakter spadku strumienia świetlnego rejestrowanego przez miernik luminancji zależy od liniowego współczynnika pochłaniania a [mm^{-1}] materiału rdzenia,
- sposób rozlokowania warstw rozpraszających daje możliwość regulacji szybkości emisji bocznej wzdłuż światłowodu,
- ilość warstw rozpraszających oraz ich położenie determinuje charakter rozsyłu wzdłużnego strumienia świetlnego,
- światłowód o pojedynczej warstwie rozpraszającej rozłożonej spiralnie w obszarze rdzenia światłowodu emituje strumień świetlny proporcjonalnie do skoku spirali, przy czym stały skok spirali będzie powodować lokalne maksima luminancji wzdłużnej rozlokowane równomiernie (rys. 5 b), zaś gdy skok jest zmienny, wówczas luminancja wzrasta w obszarach o krótkim skoku, rośnie gdy skok linii spiralnej zwiększa się (rys. 5 a)

Podsumowanie

Wiedza na temat światłowodu wskazuje na to, że dotychczas wykorzystywano wyłącznie światłowody emitujące strumień świetlny poprzez powierzchnię czołową tj. prostopadłą do kierunku propagacji fali. Uzyskany w ten sposób element świecący charakteryzuje się małą powierzchnią oraz bardzo dużą luminancją. Konieczność kontroli przeszerzeni o specjalnym charakterze, np.: zagrożonych wybuchem, o podwyższonym ryzyku porażenia prądem (środowisko wodne), oświetlenia ewakuacyjnego a także konstrukcji czujników światłowodowych o rozłożonej detekcji jest inspiracją do poszukiwań nowych konstrukcji światłowodu.

Rozważania przedstawione w artykule dotyczą spiralnych światłowodu cylindrycznych, wykonanych ze szkła wieloskładnikowych, niezbędnych do wytworzenia włókien optycznych w technologii pręt-rura na wyciągarce światłowodowej. Dzięki wykonanym badaniom wyselekcjonowano i wykonano gotowe światłowody o bocznej emisji i absorpcji promieniowania, posiadające kontrolowane cechy fotometryczne.

W opracowanej konstrukcji światłowodowej wykorzystano szkło krzemianowe domieszkowane Na_3AlF_6 [3], specjalnie opracowane na potrzeby prowadzonych badań. Rdzeń włókna optycznego poddano modyfikacjom poprzez wytworzenie w strukturze szkła F2 (Schott) liniowych lub spiralnych wtrąceń opracowanego szkła rozpraszającego wokół osi światłowodu.

Artykuł zrealizowany w ramach pracy statutowej S/WE/4/2013 w Politechnice Białostockiej w Katedrze Elektroenergetyki, Fotoniki i Techniki Świetlnej.

LITERATURA

- [1] 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
- [2] Zajkowski M.: Cylindryczne światłowody boczne, Oficyna Wydawnicza Politechniki Białostockiej, 2012
- [3] Dorosz D., Zajkowski M.: Optical properties of glasses for sight light emission waveguides, *Strasbourg*, 2007
- [4] Dorosz D., Kochanowicz M., Żmojda J., Dorosz J.: Helical core optical fibre made of $\text{Nd}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ -doped oxyfluoride silicate glass, *Proc. of SPIE*, vol.7721 B1
- [5] Błaszczak U.: Application of pinhole digital camera in size and spatial arrangement of glare sources measurements in an exemplary didactic room, *Przegląd Elektrotechniczny*, R.84, nr 8 (2008), s. 122-124

Autorzy: dr hab. inż. **Maciej Zajkowski**, E-mail: m.zajkowski@pb.edu.pl; dr inż. **Urszula J. Błaszczak**, E-mail: u.blaszczak@pb.edu.pl; dr inż. **Jacek**, E-mail: j.kusznier@pb.edu.pl, mgr inż. **Łukasz Budzyński**, E-mail: l.budzyński@pb.edu.pl
Politechnika Białostocka, Wydział Elektryczny, ul. Wiejska 45D, 15-351 Białystok