

Dariusz WYSOCZAŃSKI, Grzegorz ŚWIRNIAK, Janusz MROCZKA
KATEDRA METROLOGII ELEKTRONICZNEJ I FOTONICZNEJ, POLITECHNIKA WROCŁAWSKA

Analiza możliwości identyfikacji średnicy włókna cylindrycznego na podstawie cech światła rozproszonego.

dr inż. Dariusz WYSOCZAŃSKI

Dariusz Wysoczański pracuje w Katedrze Metrologii Elektronicznej i Fotonicznej Politechniki Wrocławskiej od 1992r. W 1996r obronił doktorat na Uniwersytecie w Rouen (Francja) dotyczący wykorzystania światła rozproszonego do określania położenia i koncentracji włókien w materiałach kompozytowych. W pracy naukowej zajmuje się wykorzystaniem światła rozproszonego do określania właściwości cząstek.

e-mail: dariusz.wysoczanski@pwr.wroc.pl



prof. dr hab. inż. Janusz MROCZKA

Kierownik Katedry Metrologii Elektronicznej i Fotonicznej Politechniki Wrocławskiej. Zajmuje się metodologią obserwacji i eksperymentu, algorytmizacją problemu odwrotnego, modelowaniem matematycznym pól fizycznych, analizą spektralną i polaryzacyjną promieniowania rozproszonego, reprezentacjami czasowo-częstotliwościowymi w przetwarzaniu danych.

e-mail: janusz.mroczka@pwr.wroc.pl



mgr inż. Grzegorz ŚWIRNIAK

Grzegorz Świrniak jest absolwentem Wydziału Elektroniki Politechniki Wrocławskiej. Obecnie pracuje jako wykładowca w Katedrze Metrologii Elektronicznej i Fotonicznej. Problematyka jego rozprawy doktorskiej koncentruje się wokół zagadnień związanych z pomiarem średnicy włókna optycznego z wykorzystaniem własności światła rozproszonego.

e-mail: grzegorz.swirniak@pwr.wroc.pl



Streszczenie

W pracy przedstawiono analizę możliwości identyfikacji średnicy włókna szklanego na podstawie wybranych cech światła rozproszonego. Analizowano wpływ zmian średnicy włókna szklanego w granicach od kilku do kilkuset mikrometrów na zmiany funkcji fazowej, rozkład przestrzenny natężenia oraz zmiany polaryzacji światła rozproszonego. W analizie wykorzystano aplikację numeryczną modelu Mie rozproszenia fali płaskiej na nieskończenie długim cylindrze, opracowaną w środowisku obliczeniowym MATLAB.

Słowa kluczowe: rozproszenie światła, cylinder homogeniczny, średnica włókna, particle sizing.

Possibilities of diameter identifications of cylindrical fiber on the basis of scattered light.

Abstract

The aim of the paper is to investigate some possibilities of diameter identification of an infinitely long, right circular, homogeneous, glass fiber on the basis of light scattered from the fiber. In this study a special attention has been devoted to the analysis how fiber diameter influences on phase function, spatial distribution, and polarization properties of the scattered light. A numerical implementation of rigorous Mie theory for cylinders written in Matlab has been used.

Keywords: light scattering, glass fibre, diameter of fibre, particle sizing.

1. Wprowadzenie

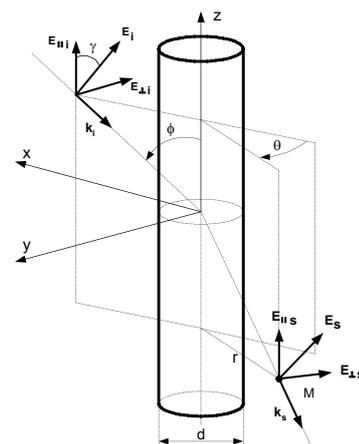
W wielu dziedzinach przemysłu wykorzystywane są włókna szklane lub z tworzyw sztucznych. W telekomunikacji szeroko stosowane są światłowody – włókna szklane lub polimerowe o odpowiednim radialnym rozkładzie współczynnika załamania.

Wiele urządzeń codziennego użytku wykonanych jest z materiałów kompozytowych charakteryzujących się bardzo dobrymi właściwościami mechanicznymi. W skład tych materiałów wchodzi elementy wzmacniające często w postaci włókien szklanych czy polimerowych. Istnieje potrzeba pomiarów parametrów włókien, zarówno w trakcie kontroli jakości, jak i podczas procesu produkcyjnego. W niniejszej pracy przedstawiono analizę możliwości wykorzystania parametrów światła rozproszonego na włóknie do estymacji jego średnicy.

Włókno zostało zamodelowane jednorodnym nieskończenie długim cylindrem. Zjawisko rozproszenia fali płaskiej na takim cylindrze opisane jest przez teorię Mie dla cylindrów [1].

2. Rozproszenie światła na cylindrze

Rozważamy geometrię układu, w której oś symetrii cylindra pokrywa się z osią Oz kartezjańskiego układu współrzędnych (rys. 1).



Rys. 1. Geometria zjawiska rozproszenia światła na nieskończenie długim cylindrze.

Fig. 1. Light scattering phenomenon geometry on the infinite long cylinder.

Model matematyczny zjawiska rozproszenia fali płaskiej na nieskończenie długim jednorodnym cylindrze opracowano w oparciu o rozszerzoną na cylindry teorię Mie. Model uwzględnia parametry takie jak średnica cylindra d , zespolony współczynnik załamania m materiału cylindra względem otaczającego medium, parametry fali padającej i rozproszonej, jak długość fali λ , kąt polaryzacji γ , kierunek padania w stosunku do osi cylindra ϕ . Zespolony współczynnik załamania materiału cylindra umożliwia uwzględnienie zjawisk absorpcyjnych (część urojona

współczynnika). Model pozwala na analizę składowych polaryzacyjnych: równoległej i prostopadłej do płaszczyzny padania xz pod dowolnym kątem rozproszenia θ . Składowe polaryzacyjne pola rozproszonego są związane ze składowymi polami padającego poprzez czteroelementową macierz amplitudową T . Elementy T macierzy amplitudowej określone są przez współczynniki rozproszeniowe a_{n1} , b_{n1} (dla składowej polaryzacyjnej równoległej) oraz a_{n2} i b_{n2} (dla składowej polaryzacyjnej prostopadłej). Współczynniki te są złożonymi funkcjami parametrów fali padającej i cylindra (funkcje Bessela i Hankela oraz ich pochodne) [1]:

$$T_1 = b_{01} + 2 \sum_{n=1}^{\infty} b_{n1} \cos(n\theta) \quad (1)$$

$$T_2 = a_{02} + 2 \sum_{n=1}^{\infty} a_{n2} \cos(n\theta) \quad (2)$$

$$T_3 = -2i \sum_{n=1}^{\infty} a_{n1} \sin(n\theta) \quad (3)$$

$$T_4 = -2i \sum_{n=1}^{\infty} b_{n2} \sin(n\theta) = -T_3 \quad (4)$$

W celu analizy polaryzacyjnej w modelu wprowadzono parametry Stokesa dla fali padającej (I_s, Q_s, U_s, V_s), i rozproszonej (I_s, Q_s, U_s, V_s), które są funkcjami szesnastoelementowej macierzy rozproszenia S [2]:

$$\begin{bmatrix} I_s \\ Q_s \\ U_s \\ V_s \end{bmatrix} = \frac{2}{\pi k r \sin(\phi)} \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & S_{24} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & S_{34} \\ S_{41} & S_{42} & S_{43} & S_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_i \\ Q_i \\ U_i \\ V_i \end{bmatrix} \quad (5)$$

gdzie k jest liczbą falową (dla próżni $k = 2\pi/\lambda$), a r odległością punktu obserwacji od osi cylindra.

Elementy S_{xy} macierzy rozproszenia są funkcjami elementów macierzy amplitudowej T . Dla fali padającej niespolaryzowanej parametry Stokesa przyjmują wartość $[1 \ 0 \ 0 \ 0]$, a dla fali spolaryzowanej liniowo pod kątem γ $[1 \ \cos(2\gamma) \ \sin(2\gamma) \ 0]$. Gdy wektor polaryzacji jest równoległy do płaszczyzny padania, kąt γ przyjmuje wartość 0 (rys. 1).

Natężenia światła rozproszonego jako fali niespolaryzowanej I oraz składowej polaryzacyjnej równoległej I_1 i prostopadłej I_2 zdefiniowane są następująco:

$$I = I_s \quad (6)$$

$$I_1 = 0,5 \cdot (I_s + Q_s) \quad (7)$$

$$I_2 = 0,5 \cdot (I_s - Q_s) \quad (8)$$

3. Wyniki symulacji

Badania symulacyjne przeprowadzono w środowisku programistycznym Matlab. Opracowano i przetestowano odpowiednie procedury numeryczne.

Rozpatrywano nieskończenie długi, jednorodny, izotropowy, nieabsorbujący szklany cylinder o względnym współczynniku załamania $m=1,55+0*i$ i średnicy d z rozpatrywanych zakresów oświetlony prostopadle do jego osi ($\phi=90^\circ$) falą płaską o długości $\lambda=632,8\text{nm}$ niespolaryzowaną lub spolaryzowaną liniowo, umieszczony w próżni (powietrzu).

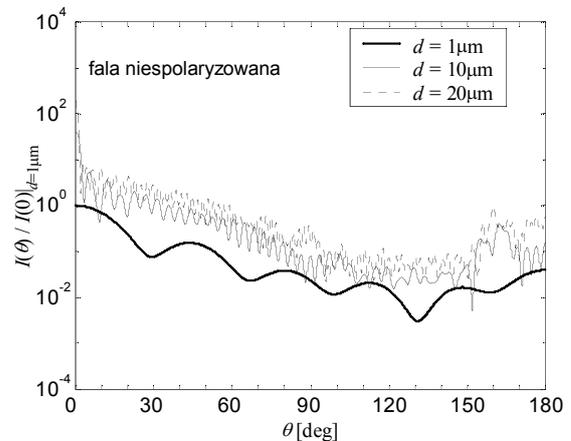
Przeprowadzono badania symulacyjne dla trzech przedziałów wielkości włókien: $1\mu\text{m} - 20\mu\text{m}$, $50\mu\text{m} - 70\mu\text{m}$ oraz $120\mu\text{m} - 130\mu\text{m}$. Pierwszy przedział obejmuje wielkości włókien

wykorzystywanych jako rdzenie w światłowodach jednomodowych oraz jako wzmocnienia w materiałach kompozytowych. Wielkości włókien z drugiego rozpatrywanego przedziału odpowiadają wielkościom rdzeni światłowodów wielomodowych. Trzeci przedział obejmuje włókna o średnicy odpowiadającej średnicom płaszcza typowego włókna światłowodowego.

Przedmiotem analizy były parametry amplitudowe, polaryzacyjne i interferencyjne światła rozproszonego. Badano względne zmiany natężenia światła rozproszonego w różnych zakresach kąta rozproszenia dla fali niespolaryzowanej i składowych polaryzacyjnych. Analizowano również efekty liczby prążków interferencyjnych w poszczególnych przedziałach kąta rozproszenia.

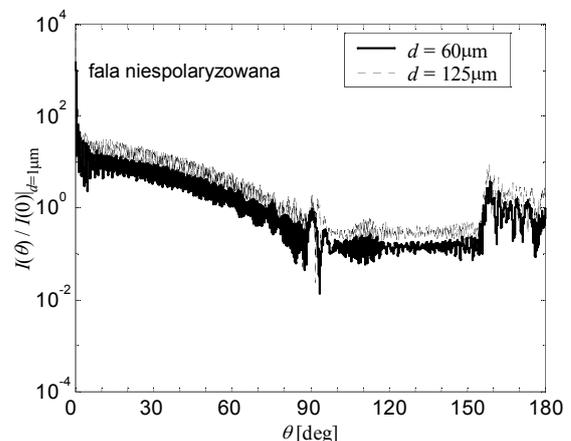
3.1. Funkcje fazowe

Cylinder oświetlony prostopadle falą płaską rozprasza światło na płaszczyźnie prostopadłej do osi cylindra. Rysunek 2 przedstawia normalizowane (względem wartości funkcji fazowej dla $d=1\mu\text{m}$, $\theta=0^\circ$) funkcje fazowe dla cylindra o różnej średnicy z pierwszego rozpatrywanego przedziału wielkości oświetlonego falą płaską niespolaryzowaną. Normalizowane funkcje fazowe dla cylindrów z drugiego i trzeciego przedziału wielkości są przedstawione na rysunku 3. Funkcje fazowe nie są monotoniczne, ale światło rozpraszane jest głównie „w przód”. Wraz ze wzrostem średnicy rośnie ilość światła rozproszonego „w przód” oraz liczba maksimów (prążków) - funkcje fazowe są zależnościami skomplikowanymi, nie poddającymi się prostej analizie w zależności od wielkości cylindra.



Rys. 2. Funkcje fazowe dla cylindra o różnej średnicy.

Fig. 2. Phase functions for different cylinder diameter.



Rys. 3. Funkcje fazowe dla cylindra o średnicy $60\mu\text{m}$ i $125\mu\text{m}$.

Fig. 3. Phase functions for cylinder of diameter $d=60\mu\text{m}$ and $125\mu\text{m}$.

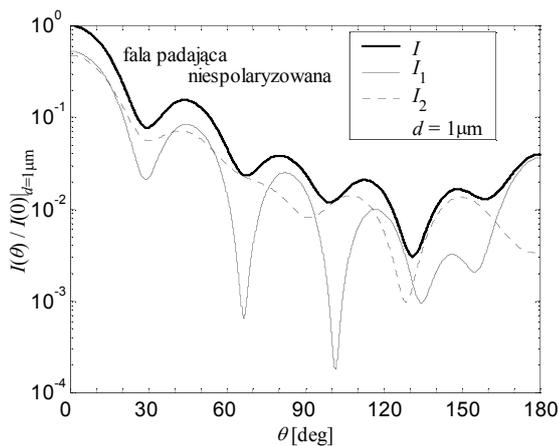
3.2. Składowe polaryzacyjne

Oświetlając cylinder prostopadłe niespolaryzowaną falą płaską można analizować składowe polaryzacyjne światła rozproszonego. Należy tutaj przypomnieć, że przy oświetleniu w ten sposób cylindra falą całkowicie spolaryzowaną prostopadłe lub równoległe, w świetle rozproszonym występować będzie jedynie składowa, która występowała w świetle padającym. Rysunek 4 przedstawia funkcję fazową oraz składowe polaryzacyjne światła rozproszonego na cylindrze o średnicy $1\mu\text{m}$. Wyraźnie widać, że składowa równoległa (I_1) ma większy wpływ na kształt funkcji fazowej. Dla cylindrów o większej średnicy kształt składowych polaryzacyjnych komplikuje się podobnie jak kształt funkcji fazowych (rys. 3).

Ważnym parametrem charakteryzującym światło rozproszone, który może być tu rozpatrywany, jest stosunek polaryzacyjny definiowany jako:

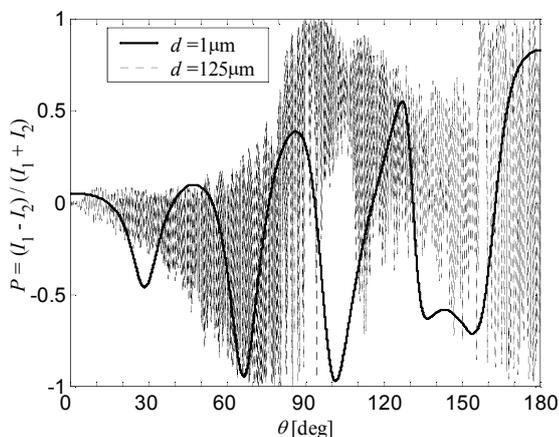
$$P = \frac{I_1 - I_2}{I_1 + I_2} \quad (9)$$

Zależność stosunku polaryzacyjnego w funkcji kąta rozproszenia dla cylindra o średnicy $1\mu\text{m}$ i $125\mu\text{m}$ przedstawiona została na rysunku 5. Analiza tego parametru w funkcji średnicy cylindra, nawet dla niewielkiego kąta rozproszenia nie dała pozytywnych rezultatów (rys. 6). Podobna zależność występuje dla średnic z pozostałych rozpatrywanych przedziałów.



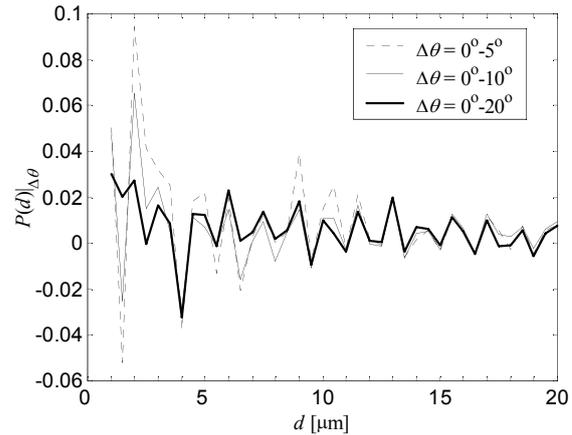
Rys. 4. Funkcja fazowa oraz składowe polaryzacyjne światła rozproszonego dla cylindra o średnicy $1\mu\text{m}$.

Fig. 4. Phase function and polarization components for cylinder of diameter $d=1\mu\text{m}$.



Rys. 5. Stosunek polaryzacyjny dla cylindra o średnicy $1\mu\text{m}$ i $125\mu\text{m}$.

Fig. 5. Polarization ratio for cylinder of diameter $d=1\mu\text{m}$ and $125\mu\text{m}$.

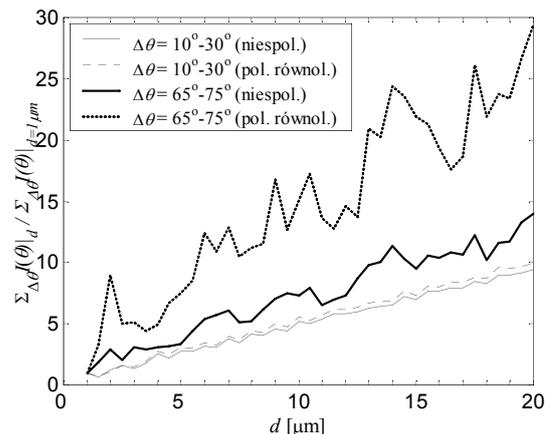


Rys. 6. Stosunek polaryzacyjny w funkcji średnicy cylindra dla kilku zakresów kąta rozproszenia.

Fig. 6. Polarization ratio versus cylinder diameter for different ranges of scattering angle.

3.3. Względne zmiany natężenia

W praktyce pomiary bezwzględnych wartości natężenia są mało przydatne. Analizowano względne zmiany natężenia światła rozproszonego koncentrując się na składowej równoległej światła rozproszonego. Zwykle detektor rejestruje światło w pewnym relatywnie niewielkim kącie, dlatego analizowano względne zmiany natężenia światła w wybranych zakresach kątów. Zakres rozproszenia „w przód” jest bardziej korzystny ze względu na łatwiejszą realizację układu pomiarowego. Z rysunku 7 wynika, że w zakresie małych średnic dwudziestokrotna zmiana średnicy (od $1\mu\text{m}$ do $20\mu\text{m}$) wywołuje ok. ośmiokrotną zmianę natężenia światła w kącie $10^\circ - 30^\circ$. Zmiana natężenia w przypadku większych średnic ($120\mu\text{m}$ do $130\mu\text{m}$) nie przekracza 8%. W obu przypadkach charakter zależności zapewnia rozdzielczość pomiaru na poziomie $1\mu\text{m} - 2\mu\text{m}$. Wykorzystanie takiego podejścia wymaga przeprowadzenia kalibracji.

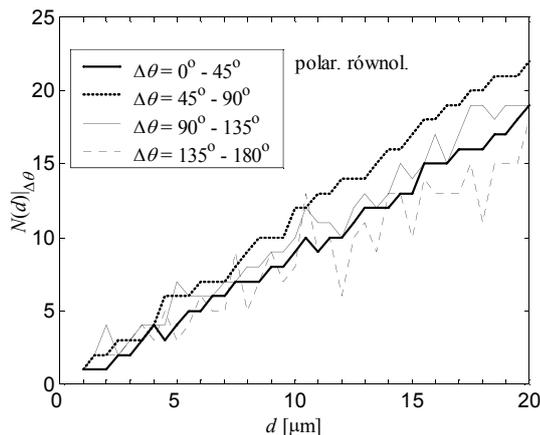


Rys. 7. Względne zmiany natężenia światła w wybranym kącie rozproszenia w funkcji średnicy cylindra.

Fig. 7. Relative scattered light intensity versus cylinder diameter.

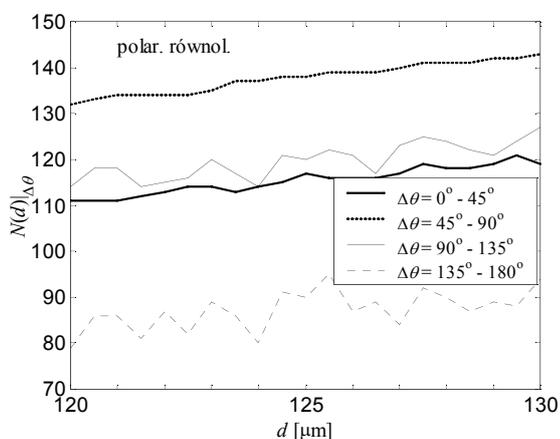
3.4. Prążki interferencyjne

Metody interferencyjne są popularne w pomiarach wielkości małych obiektów. Podczas analizy rozpatrywaliśmy liczbę prążków N w przedziałach kąta rozproszenia θ . Wyraźnie widać (rys. 8), że najlepszą zależność uzyskuje się dla rozproszenia „w przód”, zarówno dla małych, jak i większych średnic (rys. 9).



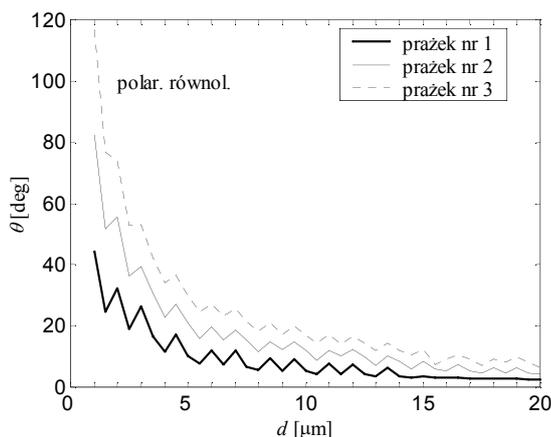
Rys. 8. Liczba prążków w funkcji średnicy cylindra dla kilku przedziałów kąta rozproszenia.

Fig. 8. Number of lobes versus cylinder diameter for different ranges of scattering angle.



Rys. 9. Liczba prążków w funkcji średnicy cylindra dla kilku przedziałów kąta rozproszenia.

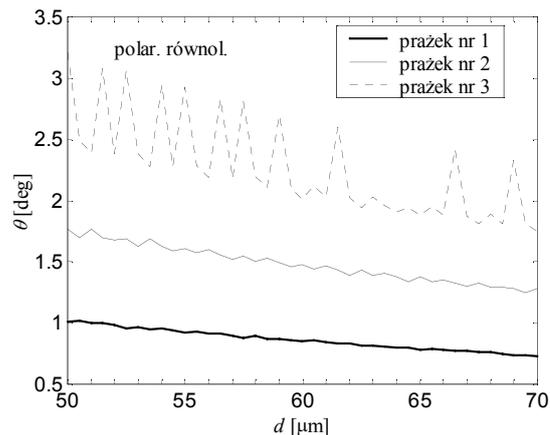
Fig. 9. Number of lobes versus cylinder diameter for different ranges of scattering angle.



Rys. 10. Położenie prążków nr 1, 2 i 3 w zależności od średnicy cylindra.

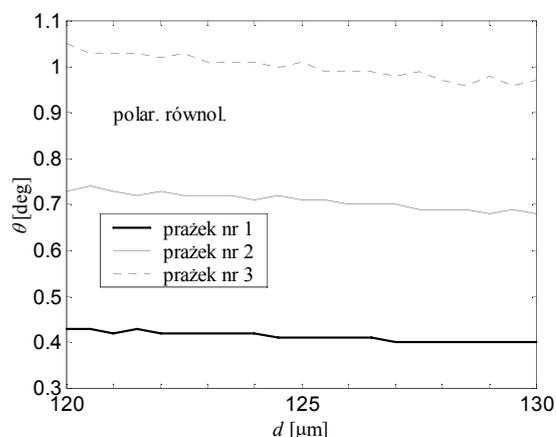
Fig. 10. Lobe no. 1, 2 and 3 location versus cylinder diameter.

Analizując prążki w zakresie małych kątów rozproszenia można wziąć pod uwagę położenie prążków w funkcji średnicy cylindra (rys. 10). Dla prążka nr 1 (położenie prążka zerowego określa kąt rozproszenia $\theta = 0$) zależność jego położenia od średnicy cylindra jest interesująca dla większych średnic (rys. 11). Mogą pojawić się jednak problemy techniczne polegające na pomiarach bardzo małych kątów (poniżej 0.1°) – rys. 12.



Rys. 11. Położenie prążków nr 1, 2 i 3 w zależności od średnicy cylindra.

Fig. 11. Lobe no. 1, 2 and 3 location versus cylinder diameter.



Rys. 12. Położenie prążków nr 1, 2 i 3 w zależności od średnicy cylindra.

Fig. 12. Lobe no. 1, 2 and 3 location versus cylinder diameter.

Ta zgrubna analiza graficzna potwierdza możliwość osiągnięcia rozdzielczości szacowania średnicy w ten prosty sposób na poziomie 1-2 μm .

4. Podsumowanie

W artykule omówiono wybrane parametry światła rozproszonego na włóknie modelowanym nieskończenie długim cylindrem, które mogą być wykorzystane przy wyznaczaniu średnicy włókna. Najkorzystniejsze zależności uzyskano podczas analizy ilości i położenia maksimum funkcji fazowej. Również analiza względnych zmian natężenia światła rozproszonego wydaje się być obiecująca. Znalezienie zależności względnych bazujących na zmianach kształtu rozkładu natężenia światła z uwzględnieniem polaryzacji, pozwoliło by na uniknięcie procesu kalibracji i uprościło by układ pomiarowy (w stosunku do metod interferencyjnych). Złożoność funkcji fazowych wymaga jednak dalszej analizy, co jest przedmiotem prowadzonych prac. Pracę wykonano w ramach projektu badawczego KBN 3 T10C 01730.

5. Literatura

- [1] Bohren, C. F., D. R. Huffman: Absorption and Scattering of Light by Small Particles. Wiley, New York, 1983.
- [2] Van de Hulst, H.C.: Light Scattering by Small Particles. Dover Publications, Inc., New York, 1981.