

doi:10.15199/48.2016.03.38

## Wpływ temperatury na wartość współczynnika załamania w rdzeniu światłowodu jednomodowego

**Streszczenie.** W artykule omówiono budowę włókna światłowodowego, zdefiniowano profil współczynnika załamania w rdzeniu światłowodu oraz określono wpływ temperatury na wartość współczynnika załamania szkła optycznego. Korzystając z opracowanego w środowisku MathCAD modelu matematycznego światłowodu telekomunikacyjnego, określono wpływ temperatury na wartość współczynnika w jego rdzeniu, w zależności od długości fali świetlnej, stężenia molowego domieszki GeO<sub>2</sub> oraz różnicy termicznej zmiany polaryzowalności i termicznej rozszerzalności objętościowej. Sformułowano wnioski dotyczące wpływu rozpatrywanych czynników na czułość temperaturową szkła optycznego o strukturze SiO<sub>2</sub>-GeO<sub>2</sub> oraz przydatności tychże szkła do realizacji polarymetrycznych czujników natężenia prądu wykorzystujących magnetoopcyjne zjawisko Faradaya oraz rozłożonych czujników temperatury wykorzystujących wymuszone rozproszenie Rayleigha.

**Abstract.** The article discussed the construction of optical fiber, the definition of refractive index profile in the fiber's core and the influence of temperature on the refractive index of optical glass. Using the mathematical model of the single mode fiber, which was realized in an MathCAD application, the effect of temperature on the value of refractive index in their core, depending on the wavelength of the light, the molar concentration of GeO<sub>2</sub> dopant and the difference between the thermal changes of polarizability and the thermal volumetric expansion were determined. Conclusions regarding the impact of the factors considered on the temperature sensitivity of optical glass structure SiO<sub>2</sub>-GeO<sub>2</sub> and of the use of these glasses for the implementation of polarimetric current sensors used Faraday effect and distributed temperature sensors using simulated Rayleigh scattering have been formulated. (**Effect of the temperature on the refractive index of the single mode fiber core**)

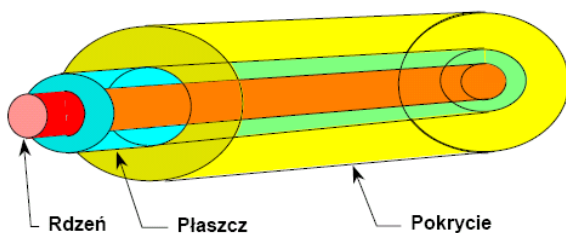
**Słowa kluczowe:** światłowód jednomodowy, szkło optyczne, współczynnik załamania, termiczna zmiana współczynnika załamania, termiczna zmiana polaryzowalności, termiczna rozszerzalność objętościowa, polarymetryczny czujnik natężenia prądu, rozłożony czujnik temperatury

**Keywords:** single mode fiber, optical glass, refractive index, thermal changes of refractive index, thermal changes of polarizability, thermal volumetric expansion, polarimetric current sensor, distributed temperature sensor

### Wstęp

Fizyczny falowód optyczny (falowód włóknisty, światłowód), którego model wykorzystywany do matematycznej analizy transmisji fali świetlnej, jest złożony z dwóch warstw krzemionki – SiO<sub>2</sub>, które charakteryzują się różnymi współczynnikami załamania. Jest to więc cienkie wielowarstwowe włókno dielektryczne [1,2], którego wewnątrz, centralnie położona warstwa szkła zwana jest rdzeniem i pokryta jest ściśle przylegającą warstwą szkła zwaną płaszczem. Rdzeń charakteryzuje się wyższym współczynnikiem załamania –  $n_1$  niż warstwa otaczająca – płaszcz o współczynniku załamania –  $n_2$  [1,3], aby na zasadzie całkowitego wewnętrznego odbicia można realizować w nim transmisję.

We włóknach światłowodowych można dodatkowo wyróżnić trzecią warstwę, która stanowi powłokę ochronną, nazywaną pierwotną warstwą ochronną (pokryciem). Nadaje ona włóknom wytrzymałość mechaniczną i stanowi ochronę przed mikropęknięciami, na które narażona jest powierzchnia włókna, zwłaszcza przy stykaniu się z innymi materiałami. Powłoka ochronna jest nakładana w czasie procesu wyciągania włókna. Włókno posiadające te trzy warstwy (rys. 1.) nazywane jest światłowodem, którego łączna średnica wynosi 250 μm [1,4]. Inne sposoby zabezpieczania włókien światłowodowych przed wpływem sił zewnętrznych i środowiska, w którym przewidywana jest jego eksploatacja, to różnego rodzaju sposoby kablowania.



Rys. 1. Budowa włókna światłowodowego

Podstawowym materiałem, z którego wykonywane są światłowody, jest syntetyczna krzemionka SiO<sub>2</sub> (tzw. szkło kwarcowe), która jest domieszkowana w celu otrzymania odpowiedniego współczynnika załamania. Wyróżnia się domieszki takich pierwiastków jak: bor (B), fluor (F), glin (Al), fosfor (P), german (Ge), tal (Tl), i inne [2,5]. Sam bowiem kwarc, stosowany na rdzeń, charakteryzuje się stosunkowo małą wartością współczynnika załamania i utrudnia dobór szkła na płaszcz. Wchodzą tutaj w grę tylko szkła typu SiO<sub>2</sub>-B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> i SiO<sub>2</sub>-F<sub>2</sub>, które mogą dostarczyć materiał na płaszcz o współczynniku załamania mniejszym prawie o 1% [2,4]. Można też wyróżnić domieszki, które powodują zwiększenie wartości współczynnika załamania ponad 1%, są to: GeO<sub>2</sub>, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, TiO<sub>2</sub> oraz Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> [2,4].

Przez **mod** rozumie się monochromatyczną wiązkę (nie falę płaską) propagującą wzdłuż falowodu z charakterystyczną dla siebie prędkością fazową, o charakterystycznym rozkładzie poprzecznym natężenia, nie zmieniającym się wzdłuż kierunku propagacji. Oznacza to, że mod rozchodzi się w falowodzie bez zmiany kształtu i z charakterystyczną dla siebie prędkością [1]. W światłowodach jednomodowych propaguje tylko jeden mod nazywany modem podstawowym albo zwyrodniałym i oznaczanym LP<sub>01</sub> (HE<sub>11</sub>). W tego typu włóknach transmisja odbywa się nie tylko wewnątrz rdzenia, ale również w części płaszczka.

Światłowody jednomodowe posiadają znormalizowane średnice rdzenia i płaszczka, które wynoszą odpowiednio 5 ÷ 11 μm/125 μm [1]. W typowym standardowym światłowodzie telekomunikacyjnym o profilu skokowym średnica rdzenia wynosi 8 ÷ 9 μm, natomiast światłowody o profilu trójkątnym oraz korony mają rdzenie o średnicach 5 ÷ 7 μm.

Przez **światłowód telekomunikacyjny** rozumie się jednomodowy światłowód włóknisty, w którym długość jest znacznie większa od przekroju [6]. Niniejsze światłowody

przewadzą powyżej pewnej długości fali, zwanej długością fali odcięcia  $\lambda_c$ , tylko hybrydowy mod podstawowy oznaczany jako LP<sub>01</sub> albo HE<sub>11</sub> [7]. Są one wykonane z krzemionki SiO<sub>2</sub>, a najprostsze rozwiązania mają koncentryczny rdzeń i płaszcz o standardowej średnicy 125  $\mu\text{m}$ . Transmisja wiązki świetlnej odbywa się w rdzeniu na zasadzie całkowitego wewnętrznego odbicia. Oznacza to, że rdzeń ma większy współczynnik załamania od płaszczu. Nie są to jednak duże różnice, zwykle rdzeń ma współczynnik załamania większy o około 1% od płaszczu [7]. Światłowody telekomunikacyjne są włóknami o słabym przewodzeniu, ponieważ światło jest skupione nie tylko w ich rdzeniu, ale również w obszarze płaszczu tym więcej, im współczynniki załamania różnią się mniej [1,7]. Są projektowane w taki sposób, aby pozostawały jednomodowe w orientacyjnym przedziale długości fali świetlnej od 1200 nm do 1750 nm [1,6], gdzie tłumienność jednostkowa krzemionki wolnej od jonów wodorotlenkowych OH<sup>-</sup> jest mniejsza od 0,5 dB/km.

### Profil współczynnika załamania oraz zasada wyznaczania jego wartości

Profil współczynnika załamania w światłowodzie jest funkcją długości fali  $n(\lambda)$ , jest to funkcja ciągła. Jej wartość maksymalna w rdzeniu jest większa niż stała wartość w płaszczu. W ogólnym przypadku profil współczynnika załamania światłowodu włóknistego o przekroju kołowym można opisać wyrażeniem [6]:

$$(1) \quad n^2(R) = n_1^2 \cdot [1 - 2 \cdot \Delta \cdot f(R)]$$

gdzie:  $R = \frac{r}{a}$  – znormalizowany promień,  $a$  – promień rdzenia lub wymiar charakterystyczny profilu [ $\mu\text{m}$ ],  $r$  – odległość od środka rdzenia [ $\mu\text{m}$ ],  $n_1$  – wartość współczynnika załamania w rdzeniu dla  $r = 0$  – w środku rdzenia,  $\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2 \cdot n_1^2}$ ,  $n_2$  – wartość współczynnika

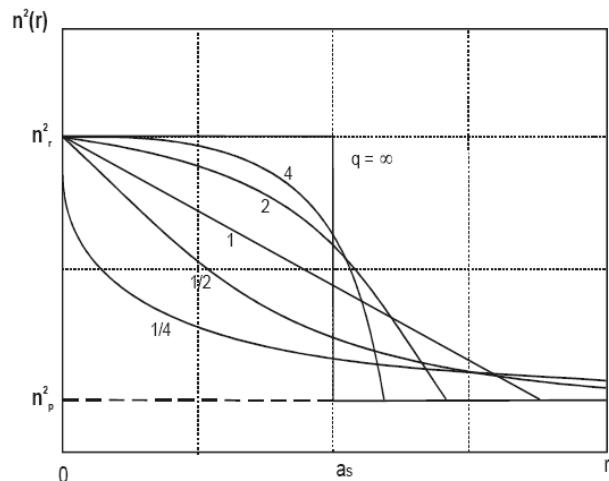
załamania w płaszczu,  $f(R)$  – funkcja zmian współczynnika załamania. Jeżeli światłowód ma stałą wartość współczynnika załamania w płaszczu, to profil jego współczynnika załamania można opisać w następujący sposób [6]:

$$(2) \quad n^2(R) = \begin{cases} n_1^2 + (n_1^2 - n_2^2) \cdot [1 - f(R)] & 0 \leq R < 1 \\ n_2^2 & 1 \leq R < \infty \end{cases}$$

Profile współczynnika załamania można uogólnić do potęgowego [4,6,7], który w zależności od wartości parametru  $q$  może przechodzić w skokowy ( $q \rightarrow \infty$ ), gradientowy ( $q > 1$ ), trójkątny ( $q = 1$ ), co przedstawia rys. 2. Profil potęgowy opisany jest równością [6]:

$$(3) \quad n^2(R) = \begin{cases} n_1^2 \cdot (1 - 2 \cdot \Delta \cdot R^q) & 0 \leq R < 1 \\ n_2^2 = n_1^2 \cdot (1 - 2 \cdot \Delta) & 1 \leq R < \infty \end{cases}$$

O jednomodowości bądź wielomodowości włókna światłowodowego decyduje długość propagowanej fali. W związku z tym, dla projektowanego włókna światłowodowego, należy określić **długość fali odcięcia**, którą dla światłowódów jednomodowych opisuje się wzorem [4,6]:



Rys. 2. Zmiany współczynnika załamania dla profili potęgowych w zależności od współczynnika  $q$  przy założeniu równej efektywnej objętości [6]

$$(4) \quad \lambda_c = \frac{2 \cdot \pi \cdot a}{V_c} \cdot NA$$

gdzie:  $a$  – promień rdzenia światłowodu lub wymiar charakterystyczny profilu [ $\mu\text{m}$ ],  $NA \approx n_1 \cdot \sqrt{2 \cdot \frac{n_1 - n_2}{n_1}}$  –

apertura numeryczna,  $V_c = V_{c\infty} \cdot \sqrt{\frac{q+2}{q}}$  – częstotliwość

znormalizowana dla profilu potęgowego o współczynniku  $q$ ,  $V_{c\infty} = 2,405$  – częstotliwość znormalizowana dla profilu skokowego (przy  $q \rightarrow \infty$ ). Wyróżnia się następujące przypadki [4,6]:

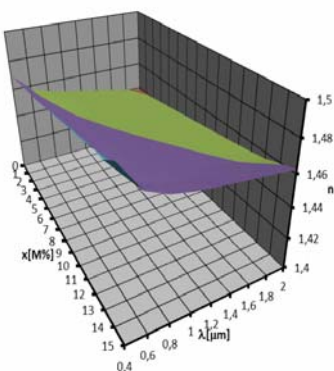
- **propagowana fala świetlna w światłowodzie jest dłuższa od fali odcięcia** ( $\lambda > \lambda_c$ ) – znaczna część płaszczu uczestniczy w transmisji, ponieważ średnica plamki świetlnej (średnica pola modu) jest większa od średnicy rdzenia światłowodu. To zjawisko jest charakterystyczne dla transmisji jednomodowej, w rdzeniu transmitowany jest tylko jeden mod, mod podstawowy (zwyrodniały) – LP<sub>01</sub>;
- **propagowana fala świetlna w światłowodzie jest równa fali odcięcia** ( $\lambda = \lambda_c$ ) – niewielka część płaszczu uczestniczy w transmisji (około 90% mocy modu podstawowego jest prowadzone w rdzeniu), średnica plamki świetlnej w przybliżeniu pokrywa się ze średnicą rdzenia światłowodu;
- **propagowana fala świetlna w światłowodzie jest krótsza od fali odcięcia** ( $\lambda < \lambda_c$ ) – płaszcz nie uczestniczy w transmisji, ponieważ średnica plamki świetlnej modu podstawowego jest mniejsza od średnicy rdzenia światłowodu. To zjawisko jest charakterystyczne dla transmisji wielomodowej.

Wartość współczynnika załamania, w zależności od stężenia molowego domieszki w rdzeniu światłowodu oraz długości fali świetlnej, można wyznaczyć korzystając z równania Sellmeiera [7]:

$$(5) \quad n^2 = 1 + \sum_{i=1}^3 \frac{a_i \cdot \lambda^2}{\lambda^2 - b_i^2} = 1 + \frac{a_1 \cdot \lambda^2}{\lambda^2 - b_1^2} + \frac{a_2 \cdot \lambda^2}{\lambda^2 - b_2^2} + \frac{a_3 \cdot \lambda^2}{\lambda^2 - b_3^2}$$

gdzie:  $a_i, b_i$  [ $\mu\text{m}$ ] – stałe, które dla konkretnego rodzaju szkła określa się doświadczalnie. W przypadku domieszkowania  $\text{GeO}_2$  procent stężenia molowego (ułamek molowy) domieszki powoduje zwiększenie współczynnika załamania w stosunku do współczynnika załamania czystego szkła, dlatego domieszkuje się nim rdzeń. Wzory pozwalające wyznaczyć wartości współczynników  $a_i$  i  $b_i$ , w zależności od stężenia molowego domieszki  $\text{GeO}_2$  w rdzeniu światłowodu, zostały wyprowadzone i przedstawione w pracy [9].

Z powyższych rozważań wynika, że współczynnik załamania  $n = f(x, \lambda)$  jest funkcją dwóch zmiennych: stężenia molowego domieszki  $\text{GeO}_2$  w rdzeniu światłowodu  $x$  [M%] oraz długości fali świetlnej propagowanej w rdzeniu światłowodu  $\lambda$  [ $\mu\text{m}$ ]. Wykorzystując wzory zamieszczone w pracy [9] oraz równanie Sellmeiera (5) wyznaczono wartości współczynnika załamania dla różnych stężeń molowych domieszki  $\text{GeO}_2$  w rdzeniu światłowodu oraz różnych długości fali świetlnej, co przedstawia rys. 3.



Rys. 3. Wartość współczynnika załamania w zależności od stężenia molowego domieszki  $\text{GeO}_2$  oraz długości propagowanej fali świetlnej [wyniki własne]

Na podstawie obliczeń matematycznych, rozpatrując profile współczynnika załamania charakterystyczne dla światłowodów telekomunikacyjnych, uzyskano wartości długości fali odcięcia (tabela 1.).

Tabela 1. Wartość długości fali odcięcia jednomodowych światłowodów telekomunikacyjnych o różnych profilach współczynnika załamania w rdzeniu [wyniki własne]

Profil współczynnika załamania w rdzeniu	Wartości współczynników załamania w rdzeniu i płaszczu		Długość fali odcięcia $\lambda_c$ [nm]	
	II okno optyczne	III okno optyczne	II okno optyczne	III okno optyczne
profil skokowy G.652 $q \rightarrow \infty$ $2a = 8,5 \mu\text{m}$	$n_1=1,4515$ $n_2=1,4468$	$n_1=1,4487$ $n_2=1,4440$	1296	1293
profil skokowy G.657A $q \rightarrow \infty$ $2a = 8,5 \mu\text{m}$	$n_1=1,4523$ $n_2=1,4468$	$n_1=1,4495$ $n_2=1,4440$	1397	1395
profil skokowy G.657B $q \rightarrow \infty$ $2a = 8,5 \mu\text{m}$	$n_1=1,4513$ $n_2=1,4468$	$n_1=1,4485$ $n_2=1,4440$	1266	1265
profil trójkątny G.653 $q = 1$ $2a = 6,0 \mu\text{m}$	$n_1=1,4590$ $n_2=1,4468$	$n_1=1,4562$ $n_2=1,4440$	855	854

### Wpływ temperatury na wartość współczynnika załamania w rdzeniu światłowodu

Przez **termorefrakcję** rozumie się modyfikację współczynnika załamania metodami termicznymi [5]. Wpływ temperatury na zmiany współczynnika załamania szkła można określić na podstawie wzorów Lorentza-Lorenza [5]:

$$(6) \quad \frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} = \frac{R_M}{V_M}$$

$$(7) \quad \frac{dn}{dT} = \frac{(n^2 - 1) \cdot (n^2 + 2)}{6 \cdot n} \cdot \left( \frac{dR_M}{R_M} \cdot \frac{1}{dT} - \frac{dV_M}{V_M} \cdot \frac{1}{dT} \right)$$

gdzie:  $R_M$  – zmiana refrakcji [ $\text{cm}^3$ ],  $V_M$  – zmiana objętości [ $\text{cm}^3$ ].

Przyjmuje się, że zmiana refrakcji jest równoważna polaryzowalności elektronowej objętościowej ( $R_M \sim \alpha$ ), natomiast zmiany objętości reprezentują współczynnik cieplnej rozszerzalności objętościowej [5].

Według Prod'hume'a we wzorze (7) można przyjąć pewne założenia, które pozwalają określić wpływ temperatury na wartość współczynnika załamania. Są one następujące [10]:

$$(8) \quad \frac{dR_M}{R_M} \cdot \frac{1}{dT} = \frac{d\alpha}{\alpha} \cdot \frac{1}{dT} = \varphi \quad \frac{dV_M}{V_M} \cdot \frac{1}{dT} = \beta$$

gdzie:  $\alpha$  – polaryzowalność elektronowa objętościowa [ $\text{cm}^3$ ],  $\varphi$  – termiczna zmiana polaryzowalności [ $\frac{1}{\text{K}}$ ],  $\beta$

– termiczna rozszerzalność objętościowa [ $\frac{1}{\text{K}}$ ]. Dokonując

stosownych podstawień wzorów (8) do równania (7) uzyskuje się wyrażenie określające zmiany współczynnika załamania wywołane temperaturą:

$$(9) \quad \frac{dn}{dT} = \frac{(n^2 - 1) \cdot (n^2 + 2)}{6 \cdot n} \cdot (\varphi - \beta)$$

Analizując wzór (9) można wyciągnąć wnioski dotyczące wpływu temperatury na wartość współczynnika załamania, które brzmią następująco:

- wzrost polaryzowalności, który został wywołany wzrostem temperatury skutkuje zwiększeniem wartości współczynnika załamania;
- wzrost objętości właściwej, który został wywołany wzrostem temperatury skutkuje zmniejszeniem wartości współczynnika załamania.

Jeżeli przyjmie się jako stałą wartość w równaniu (9) czynnik zawierający wyrażenia ze współczynnikiem załamania  $n$ , to uzyskuje się zmianę współczynnika wywołaną temperaturą, która zależy jedynie od różnicy  $\varphi - \beta$ . Takie ujęcie zagadnienia, przy założeniu, że  $\beta$  jest znane, pozwala określić  $\varphi$  ilościowo [5]:

- $\beta > \varphi$  – współczynnik załamania maleje wraz ze wzrostem temperatury. Taka sytuacja ma miejsce dla szkła z tlenku boru ( $\text{B}_2\text{O}_3$ ), niektórych szkieł borowo-krzemionkowych ( $\text{B}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ ), niektórych szkieł fosforowych ( $\text{P}_2\text{O}_5$ ), a także szkieł organicznych;

- $\beta \sim \varphi$  – współczynnik  $\frac{dn}{dT}$  może przyjmować wartości dodatnie bądź ujemne. Ze zmianą temperatury wpływ kationów na jony tlenowe  $\text{O}^{2-}$  staje się mniejszy, powoduje to lekki wzrost polaryzowalności, a co za tym

idzie wartość wyrażenia  $\frac{dn}{dT}$  jest dodatnia. Dla szkieł

typowych współczynnik załamania zwykle słabo rośnie w początkowej fazie przyrostu temperatury, potem silnie maleje w obszarze transformacji;

- $\beta < \varphi$  – współczynnik załamania rośnie wraz ze wzrostem temperatury, także w obszarze transformacji. Taka sytuacja ma miejsce w szkle kwarcowym ( $\text{SiO}_2$ ), gdzie wzrost objętości właściwej wywołany wzrostem temperatury jest bardzo mały, a dominują wtedy efekty polaryzacyjne.

Analizując przedstawione powyżej warianty można stwierdzić, że w światłowodach, których rdzeń wykonany jest z czystej krzemionki ( $\text{SiO}_2$ ) bądź z krzemionki domieszkowanej germanem ( $\text{GeO}_2\text{-SiO}_2$ ) wzrost temperatury będzie wywoływał wzrost wartości współczynnika załamania ( $\beta < \varphi$ ). Wynika to z cechy domieszki  $\text{GeO}_2$ , która zwiększa wartość współczynnika załamania w porównaniu do czystej krzemionki [1,5,6], poprawia przepuszczalność podczerwieni (IR) i odporność chemiczną [5].

### Wyniki badań symulacyjnych

Zgodnie z zaleceniami Międzynarodowej Unii Telekomunikacyjnej (ITU-T) dotyczącymi jednomodowych światłowodów telekomunikacyjnych (G.652, G.653, G.655 i G.657) odchylenie średnicy rdzenia światłowodu od wartości nominalnej nie powinno przekraczać  $\pm 10\%$ , zarówno dla tzw. II jak i dla tzw. III okna optycznego [11,12,13,14,15]. Wobec powyższego, dla celów symulacyjnych przyjęto, że owo odchylenie może być wywołane zmianami temperatury światłowodu, a co za tym idzie, w zależności od kształtu profilu współczynnika załamania w rdzeniu – standardu jednomodowego światłowodu telekomunikacyjnego, wartość odchylenia średnicy rdzenia od wartości nominalnej może przyjmować wartości zawarte w tabeli 2.

Tabela 2. Wartość odchylenia średnicy rdzenia światłowodu od wartości nominalnej w zależności od profilu współczynnika załamania jednomodowego światłowodu telekomunikacyjnego dla tzw. II i III okna optycznego [wyniki własne]

Profil współczynnika załamania w rdzeniu światłowodu	Nominalna średnica rdzenia [ $\mu\text{m}$ ]	Odchylenie od wartości nominalnej [ $\mu\text{m}$ ]
profil skokowy G.652	8,5	$\pm 0,85$
profil skokowy G.657A	8,5	$\pm 0,85$
profil skokowy G.657B	5,5	$\pm 0,55$
profil trójkątny G.653	6,0	$\pm 0,60$
profil korony G.655	6,0	$\pm 0,60$

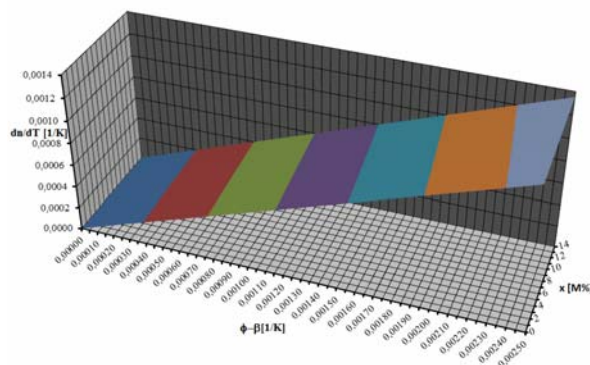
W temperaturze 293 K wartość współczynnika załamania dla dowolnego stężenia molowego domieszki  $\text{GeO}_2$  w rdzeniu światłowodu oraz dowolnej długości propagowanej fali świetlnej jest wyznaczana na podstawie równania Sellmeiera (5). Dodatkowo w tej temperaturze wyrażenie (9) przyjmuje wartość 0. Oznacza to, że termiczna zmiana polaryzowalności jest wtedy równa termicznej rozszerzalności objętościowej [5].

W przypadku światłowodów, których rdzeń wykonany jest z krzemionki domieszkowanej germanem ( $\text{SiO} - \text{GeO}_2$ ) spełniona jest zależność  $\beta < \varphi$  [5]. Oznacza to, że wzrost

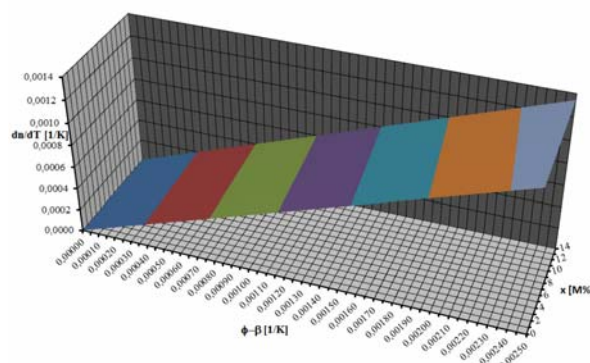
temperatury powoduje, że różnica  $\varphi - \beta$  występująca we wzorze (9) jest większa od zera.

Dla celów niniejszego opracowania skorzystano z autorskiego modelu matematycznego rdzenia światłowodu telekomunikacyjnego, w którym jako zmienne można przyjmować następujące parametry:

- stężenie molowe domieszki  $\text{GeO}_2$ , na podstawie którego, korzystając z równań zamieszczonych w pracy [9], wyznaczane są wartości współczynników równania Sellmeiera (5);
- długość fali świetlnej, na podstawie której oraz współczynników równania Sellmeiera (9), można określić wartości współczynnika załamania, które przedstawia rys. 3.;
- termiczną zmianę polaryzowalności oraz termiczną rozszerzalność objętościową, na podstawie których oraz współczynnika załamania można określić wpływ temperatury na zmiany współczynnika załamania szkła (9), które przedstawia rys. 4.;
- temperaturę rdzenia, na podstawie której oraz wpływ temperatury na zmiany współczynnika załamania szkła (9), można określić wartość współczynnika załamania w konkretnej temperaturze, które przedstawia rys. 5.



a)



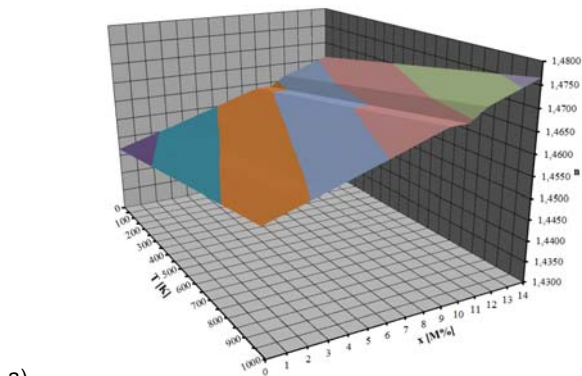
b)

Rys. 4. Wpływ temperatury na wartość współczynnika załamania w rdzeniu światłowodu – czułość temperaturowa współczynnika załamania – w zależności od stężenia molowego domieszki  $\text{GeO}_2$ , długości propagowanej fali świetlnej oraz termicznej zmiany polaryzowalności i termicznej rozszerzalności objętościowej: a) dla tzw. II okna optycznego, b) dla tzw. III okna optycznego [wyniki własne]

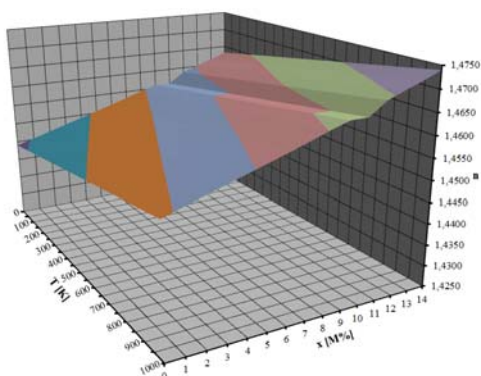
### Wnioski

Analizując wyniki obliczeń, dotyczących długości fali odcięcia, zawarte w tabeli 1., można stwierdzić, że jednomodowe światłowody telekomunikacyjne, oznaczane wg ITU-T jako G.652, G.653 i G.657B są jednomodowe w tzw. II ( $\lambda = 1310 \text{ nm}$ ) oraz III ( $\lambda = 1550 \text{ nm}$ ) oknie optycznym. Wyjątek stanowi odporny na zginanie światłowodów jednomodowy G.657A, który wykazuje jednomodowość w tzw. III ( $\lambda = 1550 \text{ nm}$ ) oknie optycznym oraz jednomodowy światłowod telekomunikacyjny

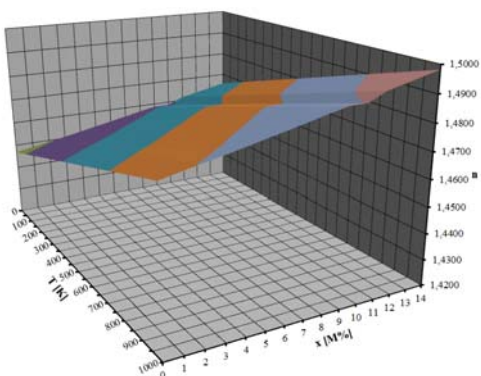
o trójkątnym profilu współczynnika załamania G.653, który wykazuje jednomodowość również w tzw. I ( $\lambda = 850$  nm) oknie optycznym. Jeżeli chodzi o jednomodowe światłowody telekomunikacyjne G.655, to wykazują one jednomodowość zarówno w II jak i III oknie optycznym [6].



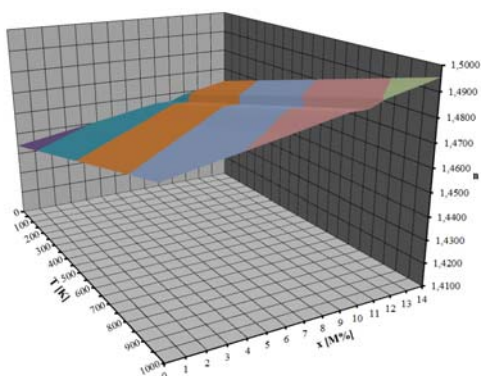
a)



b)



c)



d)

Rys. 5. Wartość współczynnika załamania w rdzeniu światłowodu w zależności od stężenia molowego domieszki  $\text{GeO}_2$ , długości propagowanej fali świetlnej oraz temperatury: a) dla tzw. II okna optycznego i  $\varphi - \beta = 0,00002$ , b) dla tzw. III okna optycznego i  $\varphi - \beta = 0,00002$ , c) dla tzw. II okna optycznego i  $\varphi - \beta = 0,00006$ , d) dla tzw. III okna optycznego i  $\varphi - \beta = 0,00006$  [wyniki własne]

Rozpatrywane w pracy jednomodowe światłowody telekomunikacyjne charakteryzują się różnym stężeniem molowym domieszki  $\text{GeO}_2$  w rdzeniu, a mianowicie: G.652 – 3,1 M%, G.653 – 7,9 M%, G.655 – 5,8 M%, G.657A – 3,6 M% oraz G.657B – 3,0 M% [9,16].

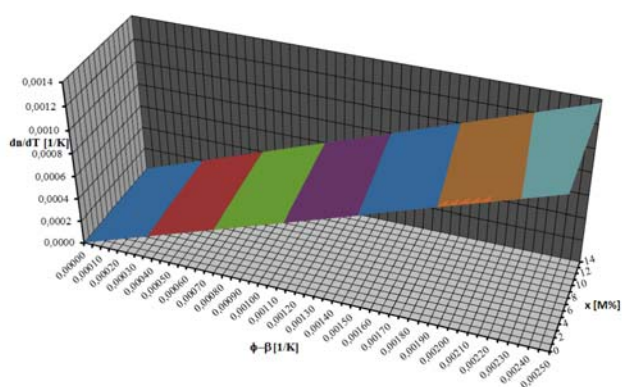
Warto w tym miejscu zaznaczyć, że wyznaczone na podstawie równania Sellmeiera (5) wartości współczynnika załamania, które zamieszczono w tabelicy 1., obowiązują dla temperatury 293 K [5,16]. Włókna światłowodowe, stosowane do budowy polarymetrycznych czujników natężenia prądu oraz pola magnetycznego – czujników Faradaya [17,18,19], nie zawsze pracują w tej temperaturze. Oznacza to, że koniecznym jest uwzględnienie czynnika temperaturowego na etapie projektowania czujnika, aby zmierzona wartość kąta skręcenia płaszczyzny polaryzacji światła, która zależna jest od stałej Verdet, nie była obciążona błędem temperaturowym. Warto również podać przykład rozłożonego czujnika temperatury, stosowanego w ciepłociągach do detekcji pozycji uszkodzenia. Wykorzystuje on w swym działaniu wymuszone rozproszenie Rayleigha [18,19]. Uzyskane wyniki badań pozwalają, podczas projektowania czujnika, na uzależnienie tłumienia światłowodu, wywołanego wymuszonym rozproszeniem Rayleigha, od temperatury – określenie teoretycznej charakterystyki przetwarzania czujnika.

Uzyskane wyniki badań, przedstawione na rys. 5., pozwalają na sformułowanie następujących wniosków dotyczących wpływu temperatury na wartość współczynnika załamania w rdzeniu światłowodu jednomodowego:

- dla ustalonej wartości długości fali świetlnej, różnicy  $\varphi - \beta$  oraz temperatury, wzrost stężenia molowego domieszki  $\text{GeO}_2$  w rdzeniu światłowodu, powoduje wzrost wartości współczynnika załamania w stosunku do czystej krzemionki  $\text{SiO}_2$ . Warto jednak zwrócić uwagę na stężenie molowe rozpatrywanej domieszki, które mieści się w przedziale od 10 M% do 12 M%, ponieważ dla niego właściwość ta nie jest spełniona, gdyż obserwuje się zachowanie anormalne – zmniejszenie oraz wzrost wartości współczynnika załamania;
  - dla ustalonej wartości długości fali świetlnej, różnicy  $\varphi - \beta$  oraz stężenia molowego domieszki  $\text{GeO}_2$  w rdzeniu światłowodu, wzrost temperatury powoduje wzrost wartości współczynnika załamania;
  - dla ustalonej wartości długości fali świetlnej, stężenia molowego domieszki  $\text{GeO}_2$  w rdzeniu światłowodu oraz temperatury, wzrost różnicy  $\varphi - \beta$  powoduje wzrost wartości współczynnika załamania;
  - dla ustalonej wartości stężenia molowego domieszki  $\text{GeO}_2$  w rdzeniu światłowodu, temperatury oraz różnicy  $\varphi - \beta$ , wzrost długości fali świetlnej powoduje niewielkie zmniejszenie wartości współczynnika załamania. Oznacza to, że światłowody czujnik temperatury, pracujący w tzw. III oknie optycznym, będzie charakteryzował się mniejszą czułością temperaturową w porównaniu do czujnika o tych samych parametrach, pracującego w tzw. II oknie optycznym.
- Dodatkowo można stwierdzić, że światłowody charakteryzujące się małą wartością różnicy  $\varphi - \beta$  mają również małą różnicę wartości współczynników załamania określaną dla wskazanych wartości temperatur. Również stężenie molowe domieszki  $\text{GeO}_2$  w rdzeniu światłowodu nie wpływa na wartość różnicy współczynników załamania w rozpatrywanych temperaturach. Są to bardzo ważne cechy, którymi powinni kierować się projektanci czujników światłowodowych:
- rozłożony czujnik temperatury powinien być wykonywany ze światłowodu, dla którego różnica  $\varphi - \beta$

przyjmuje duże wartości, gdyż uzyskuje się wtedy dużą zmianę współczynnika załamania wywołaną zmianą temperatury, a co za tym idzie obserwuje się silniejszy wpływ wymuszonego rozproszenia Rayleigha na tłumienie, a więc poprawę rozdzielczości temperaturowej czujnika;

- czujniki Faradaya należy wykonywać ze światłowodu o małej wartości różnicy  $\varphi - \beta$ , wtedy stała Verdet będzie mało czuła na temperaturę, a co za tym idzie zostanie wyeliminowana składowa temperaturowa błędu pomiaru kąta skręcenia płaszczyzny polaryzacji światła. Jednomodowe światłowody telekomunikacyjne charakteryzują się małą wartością różnicy  $\varphi - \beta$ . Oznacza to, że świetnie nadają się do realizacji czujników Faradaya [17], a nie powinny być stosowane jako rozłożone czujniki temperatury, pracujące w oparciu o wymuszone rozproszenie Rayleigha. Dla tej grupy czujników zalecane są włókna światłowodowe, których rdzeń domieszkowany jest pierwiastkami ziem rzadkich – neodymem (Nd) bądź holmem (Ho) [18,19].



Rys. 6. Wpływ temperatury na wartość współczynnika załamania w rdzeniu światłowodu – czułość temperaturowa współczynnika załamania – w zależności od stężenia molowego domieszki  $\text{GeO}_2$  oraz termicznej zmiany polaryzowalności i termicznej rozszerzalności objętościowej dla tzw. I okna optycznego, w którym światłowód oznaczony wg ITU-T jako G.653 wykazuje jednomodowość [wyniki własne]

Jak już wcześniej wspomniano, zgodnie z danymi zamieszczonymi w tablicy 1., jednomodowy światłowód telekomunikacyjny oznaczony wg ITU-T jako G.653 wykazuje jednomodowość również w tzw. I ( $\lambda = 850 \text{ nm}$ ) oknie optycznym. W tym celu przeprowadzono badania umożliwiające określenie czułości temperaturowej współczynnika załamania dla tzw. I okna optycznego. Dokonując porównania wyników przedstawionych na rys. 6., z wynikami z rys. 4., można stwierdzić, że niezależnie od wartości długości fali świetlnej oraz różnicy  $\varphi - \beta$ , czułość temperaturowa współczynnika załamania w rdzeniu tego światłowodu nie ulega zmianie – a długość fali świetlnej nie wpływa na nią. Jest ona zależna jedynie od stężenia molowego domieszki  $\text{GeO}_2$  w rdzeniu światłowodu – wraz ze wzrostem stężenia molowego rozpatrywanej domieszki, wzrasta wartość czułości temperaturowej współczynnika załamania.

**Autorzy:** dr inż. Sławomir Andrzej Torbus, Uniwersytet Technologiczno – Przyrodniczy, Wydział Telekomunikacji, Informatyki i Elektrotechniki, Al. Prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz, Politechnika Warszawska Filia w Płocku, Wydział Budownictwa, Mechaniki i Petrochemii, ul. I. Łukasiewicza 17, 09-400 Płock  
E-mail: [slator@utp.edu.pl](mailto:slator@utp.edu.pl);

## LITERATURA

- [1] Marciniak M., Łączność światłowodowa, WKŁ, Warszawa (1998)
- [2] Perlicki K., Pomiary w optycznych systemach telekomunikacyjnych, WKŁ, Warszawa (2002)
- [3] Siuzdak J., Wstęp do współczesnej telekomunikacji światłowodowej, WKŁ, Warszawa (1999)
- [4] Zalewski J., Telekomunikacja światłowodowa – materiały szkoleniowe dla uczestników kursów organizowanych przez WTiE ATR Bydgoszcz, Bydgoszcz (1997)
- [5] Szwedowski A., Romaniuk R., Szkło optyczne i fotoniczne. Właściwości techniczne, WNT, Warszawa (2009)
- [6] Ratuszek M., Termiczne połączenia jednomodowych światłowódów telekomunikacyjnych, *Rozprawa nr 133*, Uniwersytet Technologiczno – Przyrodniczy im. Jana i Jędrzeja Śniadeckich w Bydgoszczy (2008)
- [7] Majewski A., Teoria i projektowanie światłowódów, WNT, Warszawa (1991)
- [8] Romaniuk R., Szkło nieliniowe dla fotoniki. Część 5. Szkła Verdet – Faradaya, *Elektronika nr 10* (2008)
- [9] Torbus S. A., Ratuszek M., Zastosowanie jednomodowych światłowódów telekomunikacyjnych odpornych na zginanie G.657 do realizacji cewki pomiarowej polarymetrycznego czujnika natężenia prądu, *Przegląd Elektrotechniczny Nr 4a* (2012)
- [10] Fanderlik I., Optical properties of glass, *Elsevier*, Amsterdam (1983)
- [11] Zalecenie ITU – T G.652, Characteristics of a single – mode optical fibre and cable (2003)
- [12] Zalecenie ITU – T G.653, Characteristics of a dispersion – shifted single – mode optical fibre and cable (2003)
- [13] Zalecenie ITU – T G.655, Characteristics of a non – zero dispersion – shifted single – mode optical fibre and cable (2003)
- [14] Zalecenie ITU-T G.657, Characteristics of a bending loss insensitive single mode optical fibre and the cable for the access network (2006)
- [15] Zalecenie ITU-T G.657, Characteristics of a bending loss insensitive single mode optical fibre and the cable for the access network (2009)
- [16] Torbus S. A., Badanie i analiza właściwości metrologicznych polarymetrycznych czujników natężenia prądu ze światłowodową cewką pomiarową, *Wydawnictwa Uczelniane UTP w Bydgoszczy*, Bydgoszcz (2012)
- [17] Torbus S. A., Projektowanie światłowódów jednomodowych dla celów metrologicznych i ich zastosowanie w czujnikach Faradaya, *Wydawnictwa Uczelniane UTP w Bydgoszczy*, Bydgoszcz (2014)
- [18] Kaczmarek Z., Światłowodowe czujniki i przetworniki pomiarowe, *Agenda Wydawnicza PAK*, Warszawa (2006)
- [19] Yu F. T. S., Yin S., Fiber optic sensors, *Marcel Dekker Inc.*, New York (2002)