

Projektowanie jednomodowych światłowodów telekomunikacyjnych dla czujników wykorzystujących magnetoptyczne zjawisko Faradaya

Streszczenie. W pracy krótko scharakteryzowano jednomodowe światłowody telekomunikacyjne, które mogą być stosowane do budowy czujników wykorzystujących magnetoptyczne zjawisko Faradaya. Zaprezentowano wyniki badań symulacyjnych dotyczących projektowania światłowodów jednomodowych oraz sformułowano wnioski dla projektantów światłowodów, które wynikają z właściwości materiałowych rozpatrywanych szkieł tlenkowych – domieszkowania rdzenia GeO_2 oraz właściwości propagacyjnych i geometrycznych – długości fali odcięcia i geometrii rdzenia.

Abstract. In this article are briefly characterized telecommunication single mode optical fibers, which may be used in the construction of the sensors using magneto-optical Faraday effect. In this paper are presented the results of simulation studies, which focused on designing of single mode optical fibers. In this study, the general conclusions regarding the material properties of oxide glass, the geometrical and propagation properties of optical fibers are formulated. (*Designing of telecommunication single mode optical fibers for the sensors using magneto-optical Faraday effect*)

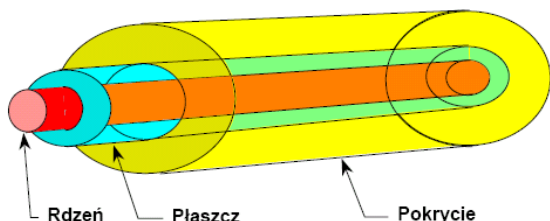
Słowa kluczowe: efekt Faradaya, jednomodowy światłowod telekomunikacyjny, długość fali odcięcia, profil współczynnika załamania, stała Verdet, szkło tlenkowe

Keywords: Faraday effect, telecommunication single mode optical fiber, cut-off wavelength, refractive index profile, Verdet constant, oxide glass

Wybrane informacje dotyczące jednomodowych światłowodów telekomunikacyjnych

Fizyczny falowód optyczny (falowód włóknisty, światłowod), którego model wykorzystywany do matematycznej analizy transmisji fali świetlnej, jest złożony z dwóch warstw krzemionki – SiO_2 , które charakteryzują się różnymi współczynnikami załamania. Jest to więc cienkie wielowarstwowe włókno dielektryczne [1,2], którego wewnętrzna, 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 możemy 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 telekomunikacyjnym, którego łączna średnica wynosi $250\ \mu\text{m}$ [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 telekomunikacyjnego włókna światłowodowego

Podstawowym materiałem, z którego wykonywane są światłowody, jest syntetyczna krzemionka SiO_2 (tzw. szkło kwarcowe), która jest domieszkowana w celu otrzymania

odpowiedniego współczynnika załamania. Mamy zatem 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, charakteryzując się stosunkowo małą wartością współczynnika załamania i utrudnia dobór szkieł na płaszcz. Wchodzi tutaj w grę tylko szkła typu $\text{SiO}_2\text{-B}_2\text{O}_3$ i $\text{SiO}_2\text{-F}_2$, które mogą dostarczyć materiał na płaszcz o współczynniku załamania mniejszym prawie o 1% [2,4]. Możemy też wyróżnić domieszki, które powodują zwiększenie współczynnika załamania ponad 1%. Są to: GeO_2 , P_2O_5 , TlO_2 oraz Al_2O_3 [2,4].

Światłowody jednomodowe posiadają znormalizowane średnice rdzenia i płaszcz, które wynoszą odpowiednio $5 \div 11\ \mu\text{m}/125\ \mu\text{m}$ [1]. W typowym standardowym światłowodzie telekomunikacyjnym o profilu skokowym średnica rdzenia wynosi $8 \div 9\ \mu\text{m}$, natomiast światłowody o profilu trójkątnym oraz korony mają rdzenie o średnicach $5 \div 7\ \mu\text{m}$.

Przez światłowod telekomunikacyjny rozumie się jednomodowy światłowod włóknisty, w którym długość jest znacznie większa od przekroju [6]. Niniejsze światłowody prowadzą powyżej pewnej długości fali, zwanej długością fali odcięcia λ_c , tylko hybrydowy mod podstawowy oznaczany jako LP_{01} albo HE_{11} [7]. Są one wykonane z krzemionki SiO_2 , 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 płaszcz. Nie są to jednak duże różnice, zwykle rdzeń ma współczynnik załamania większy o około 1% od płaszcz [7]. Światłowody telekomunikacyjne są włóknami o słabym przewodzeniu, ponieważ światło jest skupione nie tylko w ich rdzeniu, ale również w obszarze płaszcz 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 $1200\ \text{nm}$ do $1750\ \text{nm}$ [1,6], gdzie tłumienność jednostkowa krzemionki wolnej od jonów wodorotlenkowych OH^- jest mniejsza od $0,5\ \text{dB/km}$.

Jak już wcześniej wspomniano światłowody telekomunikacyjne mogą mieć różne profile współczynnika załamania w rdzeniu – skokowy, gradientowy, trójkątny oraz

korony. Ogólnie rzecz biorąc 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]:

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

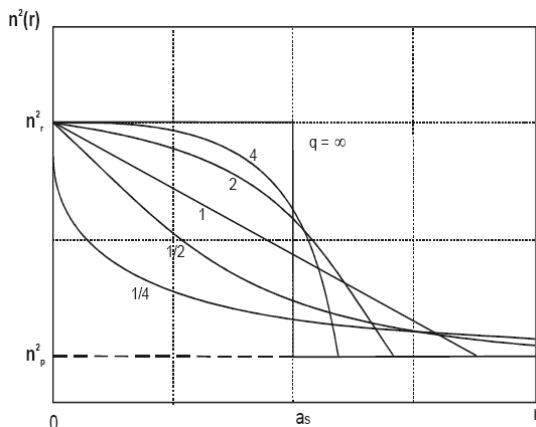
gdzie: $R = \frac{r}{a}$ – znormalizowany promień, a – promień rdzenia lub wymiar charakterystyczny profilu, r – odległość od środka rdzenia, n_1 – wartość współczynnika załamania w rdzeniu dla $r = 0$ – w środku rdzenia, $\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2 \cdot n_1^2}$,

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]:

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

Profile współczynnika załamania można uogólnić do potęgowego [4,6], 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 następującą równością [6]:

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



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

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 światłowodów jednomodowych opisuje się wzorem [4,6]:

$$(4) \quad \lambda_C = \frac{2 \cdot \pi \cdot a}{V_C} \cdot NA$$

gdzie: a – promień rdzenia światłowodu lub wymiar charakterystyczny profilu [μm],

$$NA = n_1 \cdot \sqrt{2 \cdot \Delta} \approx n_1 \cdot \sqrt{2 \cdot \frac{n_1 - n_2}{n_1}} \quad \text{– apertura numeryczna,}$$

$$V_C = V_{C\infty} \cdot \sqrt{\frac{q+2}{q}} \quad \text{– częstotliwość znormalizowana dla}$$

profilu potęgowym 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) – LP₀₁;

- **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.

Właściwości materiałowe projektowanych światłowodów

Parametrem charakterystycznym światłowodów projektowanych dla czujników wykorzystujących magneto-optyczne zjawisko Faradaya jest stała Verdet – stała materiałowa bądź stała proporcjonalności, którą opisuje równość Becquerela [8]:

$$(5) \quad V = \frac{1}{2} \cdot \frac{e}{m_e} \cdot \frac{\lambda}{c} \cdot \left| \frac{\partial n}{\partial \lambda} \right| \left[\frac{\text{rad}}{\text{T} \cdot \text{m}} \right]$$

gdzie: $\frac{e}{m_e}$ – ładunek właściwy elektronu

($1,75881962 \cdot 10^{11} \frac{\text{C}}{\text{kg}}$), λ – długość fali [μm], c – prędkość

światła w próżni ($c \approx 3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$), $\left| \frac{\partial n}{\partial \lambda} \right|$ wartość bezwzględna

zmiany współczynnika załamania względem długości fali $\left[\frac{1}{\mu\text{m}} \right]$.

We wzorze (5) najbardziej interesującym czynnikiem jest $\left| \frac{\partial n}{\partial \lambda} \right|$, ponieważ określa zmiany współczynnika

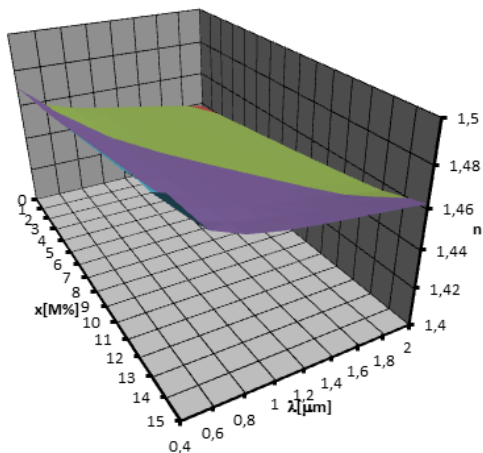
załamania w rdzeniu konkretnego typu światłowodu w zależności od długości fali świetlnej. Owe zmiany można wyznaczyć korzystając z równania Sellmeiera [7]:

$$(6) \quad n^2 = 1 + \sum_{i=1}^3 \frac{a_i \cdot \lambda^2}{\lambda^2 - b_i^2} = 1 + \frac{a_1 \cdot \lambda^2}{\lambda^2 - b_1^2} + \frac{a_2 \cdot \lambda^2}{\lambda^2 - b_2^2} + \frac{a_3 \cdot \lambda^2}{\lambda^2 - b_3^2}$$

gdzie: a_i , b_i [μm] – stałe, które dla konkretnego rodzaju szkła określa się doświadczalnie. W przypadku domieszkowania GeO₂ 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 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 GeO_2 w rdzeniu światłowodu x [M%] oraz długości fali świetlnej propagowanej w rdzeniu światłowodu λ [μm]. Na podstawie wzorów zamieszczonych w pracy [9] oraz równania Sellmeiera (6) wyznaczono wartości współczynnika załamania dla różnych stężeń molowych domieszki GeO_2 w rdzeniu światłowodu oraz różnych długości fali świetlnej. Graficzna reprezentacja wartości współczynnika załamania w rdzeniu światłowodu została przedstawiona na rys. 3.

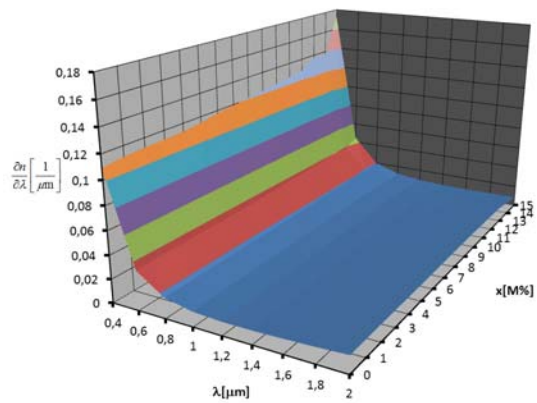


Rys. 3. Wartość współczynnika załamania w rdzeniu światłowodu w zależności od stężenia molowego domieszki GeO_2 w jego rdzeniu x [M%] oraz długości propagowanej fali świetlnej λ [μm] [wyniki własne]

Postać analityczna pochodnej współczynnika załamania (6) względem długości fali świetlnej, po zastosowaniu uogólnienia sumy mnogościowej przyjmuje postać:

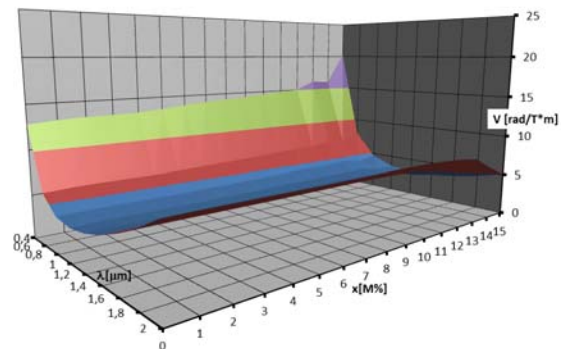
$$(7) \quad \frac{\partial n}{\partial \lambda} = - \frac{\sum_{i=1}^3 \frac{a_i \cdot b_i^2 \cdot \lambda}{(\lambda^2 - b_i^2)^2}}{\sqrt{1 + \sum_{i=1}^3 \frac{a_i \cdot \lambda^2}{\lambda^2 - b_i^2}}} \left[\frac{1}{\mu\text{m}} \right]$$

Ze wzoru (7) wynika, że pochodna współczynnika załamania $\frac{\partial n}{\partial \lambda} = f(x, \lambda)$ jest funkcją dwóch zmiennych: stężenia molowego domieszki GeO_2 w rdzeniu światłowodu x [M%] oraz długości fali świetlnej propagowanej w rdzeniu światłowodu λ [μm]. Na podstawie wzorów zamieszczonych w pracy [9] oraz wzoru (7) wyznaczono wartości pochodnej współczynnika załamania w rdzeniu światłowodu względem długości fali świetlnej, dla różnych stężeń molowych domieszki GeO_2 w rdzeniu światłowodu oraz różnych długości fali świetlnej. Graficzna reprezentacja pochodnej współczynnika załamania w rdzeniu światłowodu względem długości fali świetlnej została przedstawiona na rys. 4.



Rys. 4. Wartość pochodnej współczynnika załamania w rdzeniu światłowodu względem długości fali świetlnej w zależności od stężenia molowego domieszki GeO_2 w jego rdzeniu x [M%] oraz długości propagowanej fali świetlnej λ [μm] [wyniki własne]

Korzystając ze wzoru (5) oraz wyników obliczeń, których graficzne reprezentacje zostały przedstawione na rys. 4, można określić stałą Verdetą $V = f(x, \lambda)$ w zależności od stężenia molowego domieszki GeO_2 w rdzeniu światłowodu oraz długości fali świetlnej (rys. 5.).



Rys. 5. Wartość stałej Verdetą światłowodu w zależności od stężenia molowego domieszki GeO_2 w jego rdzeniu x [M%] oraz długości propagowanej fali świetlnej λ [μm] [wyniki własne]

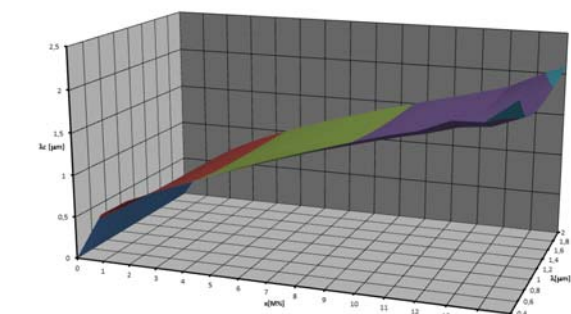
Właściwości propagacyjne i geometryczne projektowanych światłowodów

Jak wspomniano na początku, światłowody mogą się charakteryzować różnymi profilami współczynnika załamania w rdzeniu, których kształt wynika z równości (3) oraz różnymi wartościami długości fali odcięcia, które można określić na podstawie wzoru (4).

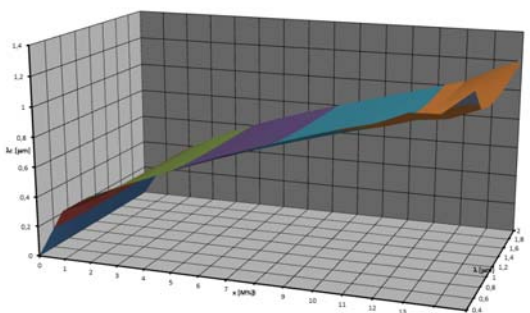
Kolejnym więc etapem badań było określenie wpływu kształtu profilu współczynnika załamania w rdzeniu projektowanego światłowodu oraz jego geometrii – promienia rdzenia, na wartość długości fali odcięcia. Na tej podstawie można stwierdzić w jakich warunkach projektowany światłowod będzie jednodomowy, a w jakich wielomodowy.

Skupiono się na dwóch typach profilu współczynnika załamania – skokowym i trójkątnym, dla których rozpatrzono promień rdzenia – a z przedziału od 3 μm do 11 μm , z krokiem wynoszącym 1 μm . Dla takich założeń uzyskano długość fali odcięcia $\lambda_c = f(x, \lambda)$ będącą funkcją dwóch zmiennych: stężenia molowego domieszki GeO_2 w rdzeniu światłowodu x [M%] oraz długości fali świetlnej propagowanej w rdzeniu światłowodu λ [μm]. Na podstawie wzoru (4) wyznaczono wartości długości fali odcięcia dla różnych stężeń molowych domieszki GeO_2 w rdzeniu światłowodu oraz różnych długości fali świetlnej.

Graficzna reprezentacja długości fali odcięcia została przedstawiona na rys. 6 ÷ 8.

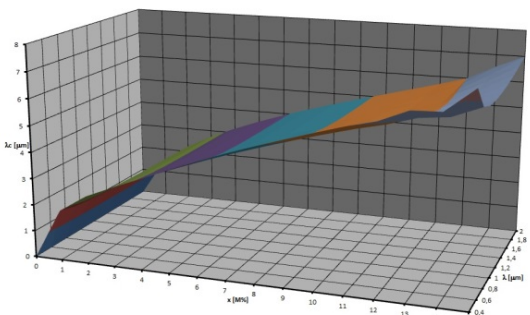


a)

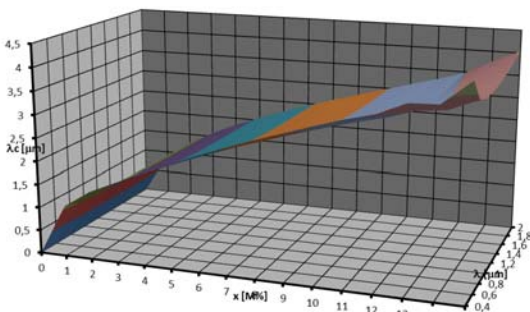


b)

Rys. 6. Wartość długości fali odcięcia w zależności od stężenia molowego domieszki GeO₂ w jego rdzeniu x [M%] oraz długości propagowanej fali świetlnej λ [μm] oraz promienia rdzenia światłowodu a = 3 μm: a) profil skokowy, b) profil trójkątny [wyniki własne]

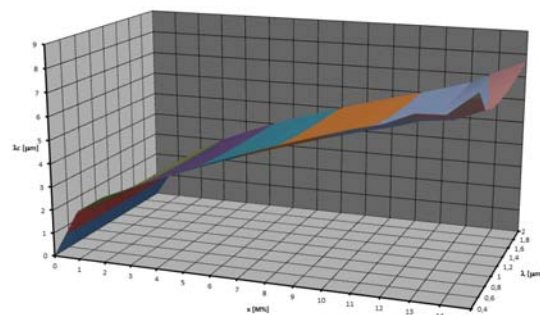


a)

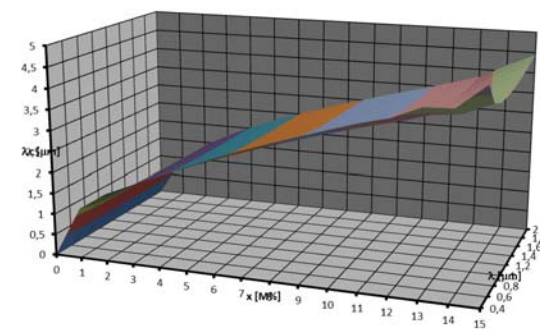


b)

Rys. 7. Wartość długości fali odcięcia w zależności od stężenia molowego domieszki GeO₂ w jego rdzeniu x [M%] oraz długości propagowanej fali świetlnej λ [μm] oraz promienia rdzenia światłowodu a = 10 μm: a) profil skokowy, b) profil trójkątny [wyniki własne]



a)



b)

Rys. 8. Wartość długości fali odcięcia w zależności od stężenia molowego domieszki GeO₂ w jego rdzeniu x [M%] oraz długości propagowanej fali świetlnej λ [μm] oraz promienia rdzenia światłowodu a = 11 μm: a) profil skokowy, b) profil trójkątny [wyniki własne]

Podsumowanie i wnioski

W czujnikach wykorzystujących magnetoptyczne zjawisko Faradaya światło propagowane w światłowodzie ma **polaryzację liniową**, która ma miejsce wtedy, gdy drgania wektora natężenia pola elektrycznego zachodzą tylko w jednej płaszczyźnie, która nie zmienia w czasie swej orientacji w przestrzeni. Aby uzyskać liniową polaryzację światła stosuje się: polaryzatory dwójłonne, polaryzatory odbiciowe albo polaroidy (błony polaryzujące). Polaryzacja wprowadzonego do włókna światłowodowego – elementu czujnika – światła ulega zmianie pod wpływem wewnętrzne pole magnetyczne.

Ciała, które nie są aktywne optycznie, gdy nie działa na nie zewnętrzne pole magnetyczne, stają się aktywne w momencie jego wystąpienia – następuje skręcenie płaszczyzny polaryzacji o pewien kąt. Jest to **magnetoptyczne zjawisko Faradaya** znane obecnie jako **efekt Faradaya**. Odkrył je w 1845 roku Michael Faraday i jako pierwszy w sposób eksperymentalny pokazał związek światła z magnetyzmem. Dodatkowo opisał je wzorem [8,10]:

$$(8) \quad \alpha = V \cdot L \cdot B \text{ [rad]}$$

gdzie: α – kąt skręcenia płaszczyzny polaryzacji [rad],

V – stała Verdet (współczynnik proporcjonalności) $\left[\frac{\text{rad}}{\text{T} \cdot \text{m}} \right]$,

L – droga, na której światło oddziaływa z polem magnetycznym [m], B – indukcja pola magnetycznego [T].

Efekt Faradaya występuje wówczas, gdy składowa pola magnetycznego jest skierowana równolegle do kierunku rozchodzenia się fali świetlnej. Kąt skręcenia płaszczyzny polaryzacji opisany wzorem (8), to jest kąt skręcenia azymutu stanu polaryzacji [5], jest zależny od indukcji

magnetycznej B , długości drogi L oraz współczynnika materiałowego, jakim jest stała Verdet V .

Jak już wcześniej wspomniano, występująca we wzorze (8) stała Verdet jest wielkością empiryczną, charakteryzuje ona materiał ośrodka jako współczynnik proporcjonalności pomiędzy wymuszeniem magnetycznym i reakcją materiału (szkła). Rozpatrując typowe szkła tlenkowe – diamagnetyki tworzące strukturę $\text{SiO}_2 - \text{GeO}_2$, które były obiektem badań, można stwierdzić, że w ich przypadku stała Verdet jest dodatnia i niewielka (rys. 5.). Jednakże przy stałej długości światłowodu oraz stałej wartości indukcji magnetycznej, wpływa ona na czułość projektowanego czujnika.

Na podstawie przeprowadzonych badań można wyprowadzić następujące wnioski dotyczące wartości stałej Verdet:

- wraz ze wzrostem długości fali świetlnej, przy stałej wartości stężenia domieszki GeO_2 w rdzeniu światłowodu, maleje wartość stałej Verdet, z wyjątkiem obszarów absorpcji, tj. powyżej długości fali $1,2 \mu\text{m}$, którym towarzyszy anormalna dyspersja, a wartość stałej Verdet wraz ze wzrostem długości fali rośnie. Zależność wartości stałej Verdet od długości fali świetlnej i stężenia molowego domieszki GeO_2 w rdzeniu światłowodu przedstawia rys. 5.;
- wraz ze wzrostem stężenia molowego domieszki GeO_2 do około 10 M% w rdzeniu światłowodu, przy stałej wartości długości fali świetlnej, wartość stałej Verdet nie ulega zmianie, natomiast po przekroczeniu wartości 10 M% stężenia molowego domieszki GeO_2 w rdzeniu światłowodu, obserwuje się zmniejszenie wartości stałej Verdet.

Projektując światłowód dla celów metrologicznych należy również uwzględnić jego właściwości propagacyjne i geometryczne. Obecnie na rynku optoelektronicznym powszechnie stosowanym i tanim rozwiązaniem są lasery telekomunikacyjne, które pracują w tzw. II oknie optycznym (długość fali świetlnej $1,33 \mu\text{m}$) lub tzw. III oknie optycznym (długość fali świetlnej $1,55 \mu\text{m}$). Wobec powyższego należy rozpatrywać projektowane światłowody pod względem długość fali odcięcia, aby długość wykorzystywanej w pomiarach fali świetlnej przekraczała długość fali odcięcia. Zostanie wtedy spełniony warunek propagacji jednomodowej.

Na podstawie przeprowadzonych badań można wyprowadzić następujące wnioski dotyczące wartości długości fali odcięcia projektowanych światłowodów:

- wraz ze wzrostem długości fali świetlnej, przy stałej wartości stężenia domieszki GeO_2 w rdzeniu światłowodu oraz stałej wartości długości promienia rdzenia światłowodu, zarówno dla profilu skokowego jak i trójkątnego, wartość długości fali odcięcia nie ulega zmianie;
- wraz ze wzrostem stężenia molowego domieszki GeO_2 w rdzeniu światłowodu, przy stałej wartości długości fali świetlnej oraz stałej wartości długości promienia rdzenia światłowodu, zarówno dla profilu skokowego jak i trójkątnego, długość fali odcięcia rośnie;

- wraz ze wzrostem długości promienia rdzenia światłowodu, przy stałej wartości stężenia molowego domieszki GeO_2 w rdzeniu światłowodu oraz stałej wartości długości fali świetlnej, zarówno dla profilu skokowego jak i trójkątnego, długość fali odcięcia rośnie;

- dodatkowo kształt profilu współczynnika załamania na wpływ na długość fali odcięcia. Przy stałej wartości stężenia molowego domieszki GeO_2 w rdzeniu światłowodu, stałej wartości długości fali świetlnej oraz stałej długości promienia rdzenia światłowodu obserwuje się dla profilu skokowego większą wartość długości fali odcięcia niż w przypadku profilu trójkątnego.

Z powyższego wynika, że stosując lasery telekomunikacyjne, należy w taki sposób dobierać geometrię rdzenia światłowodu, profil współczynnika załamania oraz stężenia molowe domieszki GeO_2 w rdzeniu światłowodu, aby zagwarantować jego jednomodowość. Warto w tym miejscu zaznaczyć, że światłowody, których promień rdzenia przekracza $10 \mu\text{m}$ nigdy nie będą jednomodowe dla tzw. II i III okna optycznego, niezależnie od kształtu profilu współczynnika załamania w ich rdzeniu (rys. 7. i rys. 8.).

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*. ATR, Bydgoszcz 1997
- [5] Szwedowski A., Romaniuk R.: *Szkło optyczne i fotoniczne. Właściwości techniczne*. WNT, Warszawa 2009
- [6] Ratuszek M.: *Termiczne połączenia jednomodowych światłowodów telekomunikacyjnych*. Wydawnictwo UTP w Bydgoszczy, Bydgoszcz 2008
- [7] Majewski A.: *Teoria i projektowanie światłowodów*. 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 światłowodów telekomunikacyjnych odpornych na zginanie G.657 do realizacji cewki pomiarowej polarymetrycznego czujnika natężenia prądu*. Przegląd Elektrotechniczny Nr 4a, Kwiecień 2012
- [10] Ginter M.: *Światłowodowy czujnik polarymetryczny do pomiaru prądu*. Pomiary Automatyka Kontrola, Marzec 2011

Autorzy: dr inż. Sławomir Andrzej Torbus, Uniwersytet Technologiczno – Przyrodniczy, Wydział Telekomunikacji, Informatyki i Elektrotechniki, Al. Prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz, E-mail: slator@utp.edu.pl; Patryk Dutkiewicz - student, Uniwersytet Technologiczno – Przyrodniczy, Wydział Telekomunikacji, Informatyki i Elektrotechniki, Al. Prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz, E-mail: directx91@o2.pl;