

doi:10.15199/48.2019.03.34

## Wpływ stężenia molowego domieszki GeO<sub>2</sub> w rdzeniu światłowodu wielomodowego na rozdzielczość temperaturową rozłożonego czujnika temperatury z wymuszonym rozproszeniem Ramana

**Streszczenie.** W pracy krótko scharakteryzowano wielomodowe włókna światłowodowe, które można wykorzystywać do budowy rozłożonych czujników temperatury z wymuszonym rozproszeniem Ramana (SRS). Scharakteryzowano wymuszone rozproszenie Ramana oraz budowę, zasadę działania i podstawowe parametry rozłożonych czujników temperatury działających na bazie niniejszego rozproszenia. Przedstawiono wyniki badań dotyczących wpływu stężenia molowego domieszki GeO<sub>2</sub> w rdzeniu światłowodu wielomodowego na rozdzielczość temperaturową rozpatrywanego czujnika. Sformułowano wnioski dotyczące doboru włókna światłowodowego i długości fali świetlnej (sondującej) w celu uzyskania optymalnej rozdzielczości temperaturowej rozłożonego czujnika temperatury z wymuszonym rozproszeniem Ramana.

**Abstract.** In this paper multimode optical fibers, which can be used to build distributed temperature sensors with stimulated Raman scattering (SRS) are briefly characterized. Stimulated Raman scattering and construction, principle of operation and parameters of distributed temperature sensors with this scattering have been characterized. The results of researches on the influence of the molar concentration of the GeO<sub>2</sub> dopant in the multimode optical fiber core on the temperature resolution of the considered sensor are presented. Conclusions regarding the selection of optical fiber and light wavelength (probing) in order to obtain the optimal temperature resolution of the distributed temperature sensor with stimulated Raman scattering were formulated. (The influence of the molar concentration of GeO<sub>2</sub> dopant in the multimode optical fiber core on the temperature resolution of the distributed temperature sensor with stimulated Raman scattering)

**Słowa kluczowe:** światłowód wielomodowy, wymuszone rozproszenie Ramana, termometr światłowodowy, rozłożony czujnik temperatury, rozdzielczość przestrzenna, rozdzielczość temperaturowa

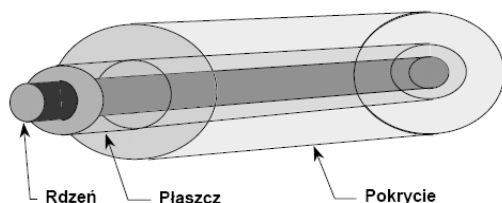
**Keywords:** multimode optical fiber, stimulated Raman scattering, fiber optic thermometer, distributed temperature sensor, spatial resolution, temperature resolution

### Charakterystyka światłowodów wielomodowych

Wielomodowy światłowód włóknisty (rys. 1.) jest cienkowarstwowym włóknem dielektrycznym złożonym z dwóch warstw krzemionki SiO<sub>2</sub>, które charakteryzują się różnymi współczynnikami załamania [1,2]. Jego wewnętrzną, centralnie położoną warstwę nazywana jest rdzeniem i pokryta jest ściśle przylegającą warstwą nazywaną płaszczem. Rdzeń charakteryzuje się wyższym współczynnikiem załamania –  $n_1$  niż płaszcz o współczynniku załamania –  $n_2$  [1,3], aby na zasadzie całkowitego wewnętrznego odbicia realizować w nim transmisję.

W światłowodowych wielomodowych można dodatkowo wyróżnić trzecią warstwę, która stanowi powłokę ochronną. Jest ona nazywana pierwotną warstwą ochronną bądź pokryciem zewnętrznym i nadaje włóknom wytrzymałość mechaniczną. Stanowi więc ochronę przed mikropęknięciami, na które narażona jest powierzchnia włókna, zwłaszcza przy stykaniu się z innymi materiałami. Nakłada się ją podczas procesu wyciągania włókna.

Światłowody wielomodowe posiadają znormalizowane średnice rdzenia i płaszcz, które wynoszą odpowiednio 50 μm/125 μm bądź 62,5 μm/125 μm [1,4]. Natomiast łączna średnica włókna wynosi 250 μm [1,4].



Rys. 1. Budowa włókna światłowodowego

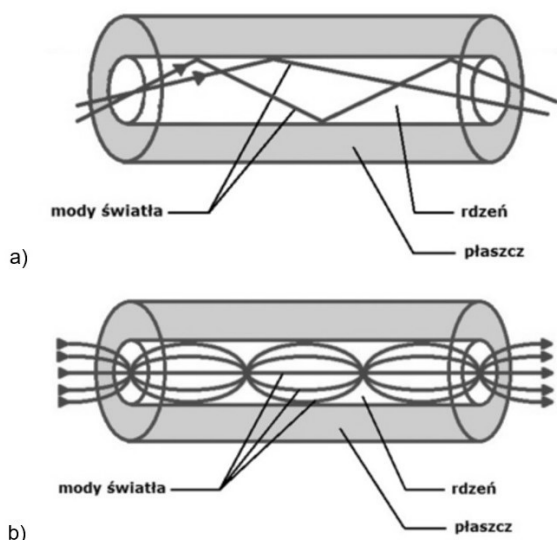
Podstawowym materiałem, z którego wykonywane są światłowody, jest krzemionka SiO<sub>2</sub>, którą domieszkuje się w celu otrzymania odpowiedniego współczynnika

załamania. Stosuje się domieszki takich pierwiastków jak: bor (B), fluor (F), glin (Al), fosfor (P), german (Ge), tal (Tl), i inne [2,5]. W optoelektronice światłowodowej można wyróżnić dwie techniki realizacji włókien wielomodowych:

- rdzeń wykonany z czystej krzemionki SiO<sub>2</sub>, natomiast płaszcz wykonany jest ze szkła typu SiO<sub>2</sub>-B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> i SiO<sub>2</sub>-F<sub>2</sub>, które stanowi materiał o współczynniku załamania mniejszym prawie o 1% [10,12]. Rozwiązanie to jest stosowane bardzo rzadko,
- płaszcz wykonany jest z czystej krzemionki SiO<sub>2</sub>, natomiast rdzeń wykonany jest z krzemionki SiO<sub>2</sub> domieszkowanej GeO<sub>2</sub>, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, TiO<sub>2</sub> lub Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> [2,4]. Domieszki te powodują zwiększenie współczynnika załamania ponad 1%. Rozwiązanie to jest najczęściej stosowane, a w szczególności przypadek, gdy rdzeń wykonany jest ze szkła typu SiO<sub>2</sub>-GeO<sub>2</sub>.

Mod jest monochromatyczną wiązką (nie falą 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 wielomodowych propaguje wiele modów, tzn. mod podstawowy nazywany zwyrodniałym, który oznaczony jest jako LP<sub>01</sub> (HE<sub>11</sub>) oraz mody dodatkowe. Mody składowe, za pomocą których niesiona jest moc optyczna w światłowodach wielomodowych, można określić na podstawie indeksów funkcji Bessela oraz kolejnych zer tejszej funkcji [3,4].

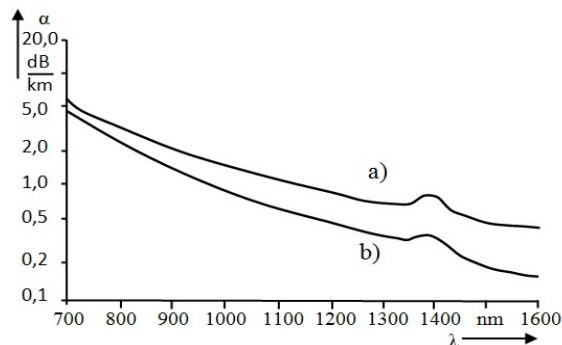
Światłowody wielomodowe mogą charakteryzować się różnymi profilami współczynnika załamania w rdzeniu – skokowym bądź gradientowym [3,4]. Ogólnie rzecz biorąc, profil współczynnika załamania w światłowodzie jest funkcją długości fali –  $n(\lambda)$ , jest to funkcja ciągła. Jej wartość maksymalna w rdzeniu jest większa niż stała wartość w płaszczu [6]. Kształt profilu współczynnika załamania decyduje o sposobie propagacji fali świetlnej w rdzeniu światłowodu (rys. 2.).



Rys. 2. Propagacja fali świetlnej w światłowodzie wielomodowym w zależności od profilu współczynnika załamania w rdzeniu: a) dla profilu skokowego, b) dla profilu gradientowego

Zjawiskiem towarzyszącym transmisji światłowodowej jest tłumienie, którego wartość zależy od długości fali świetlnej (okna optycznego) i nasila się wraz ze wzrostem długości światłowodu, przez co ogranicza zasięg transmisji sygnału optycznego. Nie wpływa ono jednak na kształt impulsu świetlnego [2,3,4].

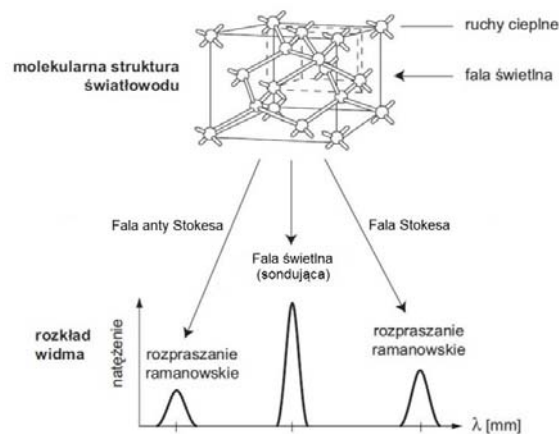
W światłowodzie wielomodowym tłumienie jest proporcjonalne do jego długości. Stąd też wprowadzono pojęcie tłumienności jednostkowej  $\alpha(\lambda)$ , będącej stosunkiem tłumienia światłowodu  $A(\lambda)$  do jego długości  $L$  i wyrażonej w jednostkach dB/km. Podobnie jak tłumienie zależy ona od długości fali świetlnej (rys. 3.).



Rys. 3. Charakterystyka określająca zależność tłumienności jednostkowej światłowodu od długości fali świetlnej: a) dla światłowodu wielomodowego, b) dla światłowodu jednomodowego [3]

### Wybrane informacje dotyczące wymuszonego rozproszenia Ramana

Przyczyną powstawania wymuszonego rozproszenia Ramana (SRS – Stimulated Raman Scattering) jest oddziaływanie pomiędzy drgającymi cząstkami (molekułami) szkła a propagowaną falą świetlną (rys. 4.). Padający na cząstkę szkła w rdzeniu światłowodu fala świetlna (sondująca) traci swoją energię, tworząc falę o mniejszej częstotliwości (falę Stokesa), falę o większej częstotliwości (falę anty Stokesa) oraz kwant energii drgań molekularnych ośrodka rozpraszającego (wibracje molekularne ośrodka). Fala Stokesa jest znacznie silniejsza od fali anty Stokesa. Dodatkowo obydwie fale są przesunięte względem fali sondującej o częstotliwość równą częstotliwości drgań cząstek szkła, która zwykle wynosi kilkanaście THz [2,3,4].



Rys. 4. Graficzna reprezentacja wymuszonego rozproszenia Ramana w światłowodzie [7]

Wynikiem powstawania wymuszonego rozproszenia Ramana jest przemiana częstotliwości. Różnica częstotliwości fal, propagowanej w rdzeniu światłowodu (sondującej) i Stokesa, jest równa częstotliwości drgań molekularnych i nazywanej częstotliwością Stokesa.

Warunkiem koniecznym wystąpienia wymuszonego rozproszenia Ramana jest przekroczenie przez natężenie fali sondującej poziomu progowego opisanego wzorem [2]:

$$(1) \quad I_p^{pr} \approx 16 \cdot \frac{\alpha}{g_R} \text{ [W/cm}^2\text{]}$$

gdzie:  $\alpha$  – stała tłumienia światłowodu [W/W/cm],  $g_R$  – maksymalny współczynnik wzmocnienia Ramana [cm/W]. Należy w tym miejscu dodać, że w krzemionce  $\text{SiO}_2$  występuje continuum częstotliwości Stokesa [3,5], a więc możliwe jest określenie zależności widmowej współczynnika wzmocnienia Ramana.

Z punktu widzenia transmisji zjawisko to jest szkodliwe, ponieważ obniża poziom sygnału światłowodowego propagowanego w światłowodzie. Jednak w połowie lat osiemdziesiątych ubiegłego stulecia zostało ono wykorzystane do konstrukcji rozłożonych czujników temperatury [8] oraz do budowy wzmacniaczy Ramana, które są powszechnie stosowane w telekomunikacji światłowodowej do zwiększania zasięgu transmisji [2,3,4].

### Budowa, zasada działania i parametry rozłożonego czujnika temperatury z wymuszonego rozproszeniem Ramana

W rozłożonych czujnikach temperatury z wymuszonego rozproszeniem Ramana (termometrach światłowodowych z wymuszonego rozproszeniem Ramana) wykorzystuje się stosunek natężeń wstecznego rozproszenia fali Stokesa i fali anty Stokesa, który jest funkcją temperatury absolutnej (mierzonej od tzw. zera bezwzględnego i podawanej w kelwinach). Opisuje go następująca zależność [8]:

$$(2) \quad R_m(T) = \left( \frac{\lambda_s}{\lambda_{as}} \right)^4 \cdot \exp\left( -\frac{h \cdot c \cdot \Delta f}{k \cdot T} \right)$$

gdzie:  $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$  J·s – stała Plancka,  $c = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  – prędkość światła w próżni,  $\Delta f$  – liczba falowa określająca przesunięcie częstotliwości względem częstotliwości fali sondującej  $\left[ \frac{1}{\text{m}} \right]$ ,  $k = 1,381 \cdot 10^{-23} \frac{\text{J}}{\text{K}}$  – stała Boltzmanna,  $T$  – temperatura absolutna światłowodu [K].

Wzór (2) jest właściwy dla przypadku idealnego, gdy współczynnik załamania ośrodka, w którym prowadzona jest fala świetlna wynosi jeden. W rzeczywistym światłowodzie, rdzeń będący przewodnicą fali świetlnej, charakteryzuje się współczynnikiem załamania większym od jedności. Oznacza to, że prędkość światła w rdzeniu światłowodu opisana jest wzorem [9]:

$$(3) \quad v = \frac{c}{n_1} \left[ \frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$$

Uwzględniając zależność (3) można skorygować wzór (2) do postaci charakteryzującej stosunek natężeń wstępnego rozproszenia fali Stokesa i fali anty Stokesa w rdzeniu rzeczywistego światłowodu, który jest funkcją temperatury absolutnej:

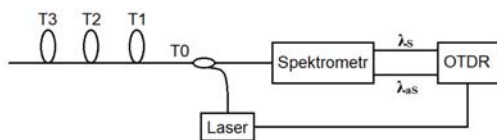
$$(4) \quad R_m(T) = \left( \frac{\lambda_s}{\lambda_{as}} \right)^4 \cdot \exp \left( - \frac{h \cdot c \cdot \Delta f}{n_1 \cdot k \cdot T} \right)$$

Należy dodać, że wartość maksymalna widma rozproszenia Ramana dla krzemionki SiO<sub>2</sub> jest przesunięta o liczbę falową  $\Delta f$  w przybliżeniu równą  $\pm 40000 \text{ l/m}$  [8] i tę wartość przyjmuje się w równaniach (2) i (4) dla światłowodów wielomodowych.

Na podstawie zależności (4) można określić współczynnik temperaturowy domieszkowanej krzemionki SiO<sub>2</sub> w zależności od jej współczynnika załamania ( $n_1$ ) oraz temperatury absolutnej ( $T$ ) [8]:

$$(5) \quad \alpha_T = \frac{1}{R_m(T)} \cdot \frac{\partial R_m(T)}{\partial T} = \frac{h \cdot c \cdot \Delta f}{n_1 \cdot k \cdot T^2} \left[ \frac{1}{\text{K}} \right]$$

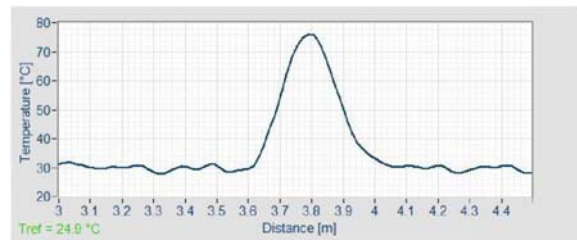
Odtwarzanie wartości mierzonej temperatury (mezurandu) na podstawie sygnału wyjściowego czujnika rozłożonego, działającego na bazie wymuszonego rozproszenia Ramana, wymaga zastosowania metody reflektometrycznej pomiaru [10], w której reflektometr optyczny (OTDR – Optical Time Domain Reflectometer) pracuje w układzie zmodyfikowanym (rys. 5.).



Rys. 5. Schemat układu rozłożonego czujnika temperatury z wymuszoną rozpraszaniem Ramana, w którym do analizy sygnału wyjściowego zastosowano spektrometr optyczny i reflektometr światłowodowy [8]

Dzięki zastosowaniu spektrometra optycznego można przeprowadzać reflektometryczną analizę odbitej fali Stokesa i anty Stokesa.

Rozdzielczość to najmniejszy przyrost mierzonej wartości, który można odczytać na skali (wyświetlaczu) przyrządu. Rozpatrywany czujnik temperatury charakteryzuje się rozdzielczością temperaturową oraz rozdzielczością przestrzenną. Rozdzielczość temperaturowa zależy od składu chemicznego rdzenia światłowodu oraz od długości fali świetlnej (fali sondującej). Rozdzielczość przestrzenna zależy od właściwości zastosowanego reflektometru optycznego, a więc od jego klasy, na podstawie której można wyznaczyć błąd z jakim określana jest pozycja zdarzenia na krzywej reflektometrycznej (rys. 6.) nazywanej reflektogramem [10]. Należy zaznaczyć, że zdarzenie symbolizuje miejsce, w którym zmianie ulega temperatura.



Rys. 6. Krzywa reflektometryczna umożliwiająca określenie miejsca wystąpienia zmiany temperatury oraz wartości mierzonej temperatury (mezurandu) przy użyciu rozłożonego czujnika temperatury z wymuszoną rozpraszaniem Ramana [11]

Obecnie, w celu osiągnięcia wysokiej skuteczności detekcji zmian (wahań) temperatury wzdłuż światłowodu pełniącego rolę czujnika oraz w celu poprawy rozdzielczości przestrzennej rozpatrywanego czujnika temperatury, stosuje się korelacyjną reflektometrię zliczania fotonów [8,11]. Dzięki tej technice uzyskuje się rozdzielczość przestrzenną równą około 10 cm, która przy użyciu klasycznej reflektometrii wynosiła około 1 m [8,11]. Mankamentem zastosowania tej metody jest pogorszenie rozdzielczości temperaturowej z około 1°C na około 2°C [8].

Termometry tego typu wymagają stosowania źródła światła (lasera) o znacznej mocy oraz względnie długiego czasu uśredniania. Wynika to z faktu, że moc wstępnego rozproszenia Ramana jest w przybliżeniu trzy rzędy wielkości mniejsza od mocy wstępnego rozproszenia Rayleigha [8], które jest podstawowym źródłem informacji dla reflektometru optycznego [2,4,10].

Zasięg pomiaru temperatury rozłożonym czujnikiem światłowodowym z wymuszoną rozpraszaniem Ramana nie przekracza 10 km [8]. Obecnie powszechnie stosowany czujnik firmy LUCIOL INSTRUMENTS LDT-100 [11] charakteryzuje się zasięgiem pomiaru wynoszącym 250 m, rozdzielczością temperaturową około 2°C i rozdzielczością przestrzenną około 1 cm.

### Wpływ stężenia molowego domieszki GeO<sub>2</sub> w rdzeniu światłowodu na czułość temperaturową rozpatrywanego termometru światłowodowego

Celem badań było określenie wpływu stężenia molowego domieszki germanu w szkle typu SiO<sub>2</sub>-GeO<sub>2</sub>, z którego wykonany jest rdzeń światłowodu wielomodowego w czujniku firmy LUCIOL INSTRUMENTS LDT-100 [11], na czułość temperaturową rozpatrywanego czujnika. Znormalizowane średnice rdzenia i płaszczki rozpatrywanego światłowodu wynoszą odpowiednio 62,5 μm/125 μm.

Wartość współczynnika złamania, w zależności od stężenia molowego domieszki w rdzeniu światłowodu oraz długości fali świetlnej, można wyznaczyć korzystając z równania Sellmeiera [12]:

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

gdzie:  $a_i$ ,  $b_i$  [μm] – stałe, które dla konkretnego rodzaju szkła określa się doświadczalnie. Wzory pozwalające wyznaczyć wartości współczynników  $a_i$  i  $b_i$ , w zależności od stężenia molowego (ułamek molowego) domieszki GeO<sub>2</sub> w rdzeniu światłowodu, zostały wyprowadzone i przedstawione w pracy [13].

Na podstawie obliczeń matematycznych przeprowadzonych w środowisku MathCAD, rozpatrując różne stężenia molowe domieszki GeO<sub>2</sub> w rdzeniu światłowodu wielomodowego i różne długości fali świetlnej,

dla różnych wartości temperatury, korzystając ze wzorów (5) i (6), wyznaczono wartości współczynnika temperaturowego w rdzeniu światłowodu o współczynniku załamania  $n_1$  (tabele 1÷6). Do obliczeń przyjęto liczbę falową równą 40000 1/m [8].

Tabela 1. Wartości współczynnika temperaturowego w zależności od stężenie molowego domieszki GeO<sub>2</sub>, długości fali świetlnej, dla temperatury bezwzględnej 273 K

Długość fali świetlnej $\lambda$ [nm]	Współczynnik temperaturowy w rdzeniu światłowodu $\alpha_T \cdot 10^3$ [1/K]				
	x = 0 M%	x = 5 M%	x = 10 M%	x = 15 M%	x = 20 M%
700	5,309	5,280	5,252	5,220	3,898
780	5,313	5,288	5,255	5,227	4,266
800	5,317	5,288	5,259	5,227	4,333
900	5,320	5,295	5,262	5,234	4,566
1000	5,328	5,299	5,270	5,241	4,708

Tabela 2. Wartości współczynnika temperaturowego w zależności od stężenie molowego domieszki GeO<sub>2</sub>, długości fali świetlnej, dla temperatury bezwzględnej 293 K

Długość fali świetlnej $\lambda$ [nm]	Współczynnik temperaturowy w rdzeniu światłowodu $\alpha_T \cdot 10^3$ [1/K]				
	x = 0 M%	x = 5 M%	x = 10 M%	x = 15 M%	x = 20 M%
700	4,609	4,584	4,559	4,532	3,384
780	4,613	4,590	4,562	4,538	3,703
800	4,616	4,590	4,565	4,538	3,761
900	4,619	4,597	4,569	4,544	3,964
1000	4,625	4,600	4,575	4,550	4,087

Tabela 3. Wartości współczynnika temperaturowego w zależności od stężenie molowego domieszki GeO<sub>2</sub>, długości fali świetlnej, dla temperatury bezwzględnej 313 K

Długość fali świetlnej $\lambda$ [nm]	Współczynnik temperaturowy w rdzeniu światłowodu $\alpha_T \cdot 10^3$ [1/K]				
	x = 0 M%	x = 5 M%	x = 10 M%	x = 15 M%	x = 20 M%
700	4,039	4,017	3,995	3,971	2,965
780	4,042	4,023	3,998	3,976	3,245
800	4,045	4,023	4,001	3,976	3,296
900	4,047	4,028	4,003	3,982	3,473
1000	4,053	4,031	4,009	3,987	3,581

Tabela 4. Wartości współczynnika temperaturowego w zależności od stężenie molowego domieszki GeO<sub>2</sub>, długości fali świetlnej, dla temperatury bezwzględnej 333 K

Długość fali świetlnej $\lambda$ [nm]	Współczynnik temperaturowy w rdzeniu światłowodu $\alpha_T \cdot 10^3$ [1/K]				
	x = 0 M%	x = 5 M%	x = 10 M%	x = 15 M%	x = 20 M%
700	3,569	3,549	3,530	3,508	2,620
780	3,571	3,554	3,532	3,513	2,867
800	3,573	3,554	3,535	3,513	2,912
900	3,576	3,167	3,537	3,518	3,069
1000	3,581	3,561	3,542	3,523	3,164

Tabela 5. Wartości współczynnika temperaturowego w zależności od stężenie molowego domieszki GeO<sub>2</sub>, długości fali świetlnej, dla temperatury bezwzględnej 353 K

Długość fali świetlnej $\lambda$ [nm]	Współczynnik temperaturowy w rdzeniu światłowodu $\alpha_T \cdot 10^3$ [1/K]				
	x = 0 M%	x = 5 M%	x = 10 M%	x = 15 M%	x = 20 M%
700	3,176	3,158	3,141	3,122	2,331
780	3,178	3,163	3,143	3,126	2,551
800	3,180	3,163	3,145	3,126	2,591
900	3,182	3,167	3,147	3,130	2,731
1000	3,187	3,169	3,152	3,135	2,816

Tabela 6. Wartości współczynnika temperaturowego w zależności od stężenie molowego domieszki GeO<sub>2</sub>, długości fali świetlnej, dla temperatury bezwzględnej 373 K

Długość fali świetlnej $\lambda$ [nm]	Współczynnik temperaturowy w rdzeniu światłowodu $\alpha_T \cdot 10^3$ [1/K]				
	x = 0 M%	x = 5 M%	x = 10 M%	x = 15 M%	x = 20 M%
700	2,844	2,829	2,813	2,796	2,088
780	2,846	2,833	2,815	2,800	2,285
800	2,848	2,833	2,817	2,800	2,321
900	2,850	2,836	2,819	2,804	2,446
1000	2,854	2,838	2,823	2,808	2,522

Podczas badań wyszczególniono długość fali 780 nm, ponieważ źródłem światła w rozpatrywanym czujniku jest laser wielomodowy o długości fali świetlnej 780 nm, która nie jest widzialna dla oka ludzkiego i zawiera się w paśmie bliskim podczerwieni tj. od 700 nm do 1000 nm. Dodatkowo przyjęto temperaturę z przedziału od 0 °C (273 K) do 100 °C (373 K), ponieważ takim właśnie zakresem pomiarowym charakteryzuje się badany czujnik [11].

Dysponując wynikami zawartymi w tablicach 1÷6 można wyznaczyć rozdzielczość temperaturową rozpatrywanego czujnika w zależności od stężenia molowego domieszki GeO<sub>2</sub> w rdzeniu światłowodu wielomodowego oraz długości fali świetlnej, dla różnych wartości temperatury. W tym celu należy przeprowadzić normalizację uzyskanych wyników zgodnie ze wzorem:

$$(7) \quad R_T = \frac{1}{\alpha_T \cdot T} [^{\circ}\text{C}]$$

gdzie:  $T$  – temperatura bezwzględna, dla której określano wartość temperaturowego współczynnika w rdzeniu światłowodu wielomodowego [K]. Uzyskane wyniki zostały zawarte w tabelach 7÷12.

Tabela 7. Rozdzielczość temperaturowa w zależności od stężenie molowego domieszki GeO<sub>2</sub>, długości fali świetlnej, dla temperatury bezwzględnej 273 K

Długość fali świetlnej $\lambda$ [nm]	Rozdzielczość temperaturowa $R_T$ [°C]				
	x = 0 M%	x = 5 M%	x = 10 M%	x = 15 M%	x = 20 M%
700	0,690	0,694	0,697	0,702	0,940
780	0,689	0,693	0,697	0,701	0,859
800	0,689	0,693	0,697	0,701	0,845
900	0,689	0,692	0,696	0,700	0,802
1000	0,688	0,691	0,695	0,699	0,778

Tabela 8. Rozdzielczość temperaturowa w zależności od stężenie molowego domieszki GeO<sub>2</sub>, długości fali świetlnej, dla temperatury bezwzględnej 293 K

Długość fali świetlnej $\lambda$ [nm]	Rozdzielczość temperaturowa $R_T$ [°C]				
	x = 0 M%	x = 5 M%	x = 10 M%	x = 15 M%	x = 20 M%
700	0,741	0,745	0,749	0,628	1,009
780	0,740	0,744	0,748	0,752	0,922
800	0,739	0,744	0,748	0,752	0,907
900	0,739	0,742	0,747	0,751	0,861
1000	0,738	0,742	0,746	0,750	0,835

Tabela 9. Rozdzielczość temperaturowa w zależności od stężenie molowego domieszki GeO<sub>2</sub>, długości fali świetlnej, dla temperatury bezwzględnej 313 K

Długość fali świetlnej $\lambda$ [nm]	Rozdzielczość temperaturowa $R_T$ [°C]				
	x = 0 M%	x = 5 M%	x = 10 M%	x = 15 M%	x = 20 M%
700	0,791	0,795	0,800	0,805	1,078
780	0,790	0,794	0,799	0,804	0,985
800	0,790	0,794	0,799	0,804	0,969
900	0,789	0,793	0,798	0,802	0,920
1000	0,788	0,793	0,797	0,801	0,892

Tabela 10. Rozdzielczość temperaturowa w zależności od stężenie molowego domieszki GeO<sub>2</sub>, długości fali świetlnej, dla temperatury bezwzględnej 333 K

Długość fali świetlnej $\lambda$ [nm]	Rozdzielczość temperaturowa $R_T$ [°C]				
	x = 0 M%	x = 5 M%	x = 10 M%	x = 15 M%	x = 20 M%
700	0,841	0,846	0,851	0,856	1,146
780	0,841	0,845	0,850	0,855	1,047
800	0,840	0,845	0,850	0,855	1,031
900	0,840	0,848	0,849	0,854	0,978
1000	0,839	0,843	0,848	0,852	0,949

Tabela 11. Rozdzielczość temperaturowa w zależności od stężenie molowego domieszki GeO<sub>2</sub>, długości fali świetlnej, dla temperatury bezwzględnej 353 K

Długość fali świetlnej $\lambda$ [nm]	Rozdzielczość temperaturowa $R_T$ [°C]				
	x = 0 M%	x = 5 M%	x = 10 M%	x = 15 M%	x = 20 M%
700	0,892	0,897	0,902	0,907	1,215
780	0,891	0,896	0,901	0,906	1,110
800	0,891	0,896	0,901	0,906	1,093
900	0,890	0,894	0,900	0,905	1,037
1000	0,889	0,894	0,899	0,904	1,006

Tabela 12. Rozdzielczość temperaturowa w zależności od stężenie molowego domieszki GeO<sub>2</sub>, długości fali świetlnej, dla temperatury bezwzględnej 373 K

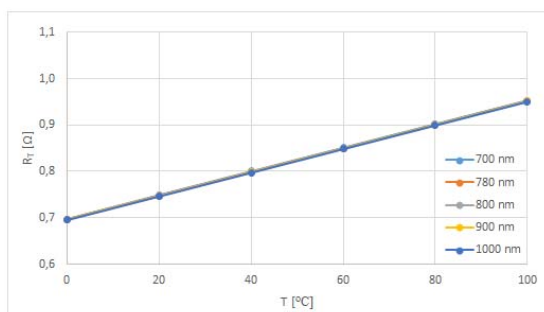
Długość fali świetlnej $\lambda$ [nm]	Rozdzielczość temperaturowa $R_T$ [°C]				
	x = 0 M%	x = 5 M%	x = 10 M%	x = 15 M%	x = 20 M%
700	0,943	0,948	0,953	0,959	1,284
780	0,942	0,946	0,952	0,957	1,173
800	0,941	0,946	0,952	0,957	1,155
900	0,941	0,945	0,951	0,956	1,096
1000	0,939	0,945	0,950	0,955	1,063

### Podsumowanie

Analizę uzyskanych wyników przeprowadzono w odniesieniu do stałej Verdet najczęściej stosowanych w technice pomiarowej światłowód wielomodowych. Jej wartość to 4,580 rad/T m [14]. Na podstawie wzorów zawartych w pracy [13], przy użyciu aplikacji MathCAD wyznaczono, że dla długości fali 780 nm, odpowiada ona stężeniu molowemu GeO<sub>2</sub> równemu 10,5 M%. Uzyskany wynik potwierdza, że światłowody wielomodowe charakteryzują się dużym stężeniem molowym domieszki germanu w rdzeniu, dzięki temu przy mniejszej długości fali świetlnej mogą mieć zbliżoną wartość stałej Verdet do światłowód jednomodowych, które do transmisji wykorzystują znacznie dłuższe fale (1310 nm bądź 1550 nm).

Jeżeli w czujniku zastosowany zostanie światłowód wielomodowy o określonej wartości stężenia molowego domieszki GeO<sub>2</sub> w rdzeniu, to zmiana długości fali świetlnej nie wpływa na rozdzielczość temperaturową. Zależy ona jednak od wartości temperatury mierzonej.

Jeżeli w czujniku zastosowany zostanie fotonadajnik o określonej długości fali świetlnej, to stężenie molowe domieszki GeO<sub>2</sub> w rdzeniu światłowodu wielomodowego mieszczące się w przedziale od około 0 M% do około 15 M% nieznacznie poprawia rozdzielczość temperaturową. Znaczącą poprawę obserwuje się dla tzw. dużego stężenia molowego domieszki wynoszącego około 20 M%. Również i w tym przypadku temperatura mierzona wpływa na rozdzielczość temperaturową czujnika.



Rys. 7. Zależność rozdzielczości temperaturowej czujnika, którego światłowód wielomodowy ma rdzeń domieszkowany germanem GeO<sub>2</sub> o stężeniu molowym 10 M%

Z analizy wynika, że światłowody wielomodowe o dużym stężeniu molowym domieszki GeO<sub>2</sub> powinny być stosowane w czujnikach przeznaczonych do detekcji małych zmian temperatury, ponieważ są one czulsze od światłowód o standardowym stężeniu domieszki GeO<sub>2</sub> w rdzeniu. Dodatkowo warto zaznaczyć, że zależność czułości od mierzonej temperatury jest liniowa i dla światłowód wielomodowych o standardowym stężeniu domieszki w rdzeniu zawiera się w przedziale od około 0,65 °C do około 0,95 °C, natomiast dla światłowód wielomodowych o dużym stężeniu molowym domieszki w rdzeniu zawiera się w przedziale od około 0,94 °C do około 1,06 °C. Graficzna reprezentacja rozpatrywanych zależności (rys. 7.) została opracowana dla stężenia molowego domieszki 10 M%, ponieważ w przybliżeniu takim właśnie stężeniem molowym domieszki GeO<sub>2</sub> charakteryzuje się rdzeń światłowodu wielomodowego stosowanego w komercyjnie dostępnym termometrze firmy LUCIOL INSTRUMENTS LDT-100 [11].

**Autorzy:** dr inż. Sławomir Andrzej Torbus, Politechnika Warszawska Filia w Płocku, Łukasiewicza 17, 09-400 Płock, E-mail: [sławomir.torbus@pw.edu.pl](mailto:sławomir.torbus@pw.edu.pl)

### LITERATURA

- [1] Marciniak M., Ratuszek M., Łączność Światłowodowa, WKŁ, Warszawa (1998)
- [2] Perlicki K., Pomiar w optycznych systemach telekomunikacyjnych, WKŁ, Warszawa (2002)
- [3] Siudak 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 w Bydgoszczy, Bydgoszcz (1997)
- [5] Szwedowski A., Romaniuk R. S., Szkło optyczne i fotoniczne. Właściwości techniczne, WNT, Warszawa (2009)
- [6] Ratuszek M., Termiczne połączenia jednomodowych światłowód telekomunikacyjnych, Wydawnictwo UTP w Bydgoszczy, Bydgoszcz (2008)
- [7] Wiatr J., Ochrona przeciwpożarowa kabli i przewodów, elektro.info, Maj (2008)
- [8] Kaczmarek Z., Światłowodowe czujniki i przetworniki pomiarowe, Agenda Wydawnicza PAK, Warszawa (2006)
- [9] Torbus S. A., Surma D., Zastosowanie polarymetrycznych czujników natężenia prądu i Ślizgającej Dyskretnej Transformaty Winera-Chinczyna w układach kontrolno-zabezpieczeniowych linii elektroenergetycznych wysokiego napięcia 110 kV, Przegląd Elektrotechniczny, Listopad (2011)
- [10] Torbus S. A., Wpływ temperatury na wartość współczynnika załamania w rdzeniu światłowodu jednomodowego, Przegląd Elektrotechniczny, Marzec (2016)
- [11] [https://www.interlab.pl/uploads/files/Broszury/LUCIOL/Ldt-100\\_specsheet\\_rev\\_003.pdf](https://www.interlab.pl/uploads/files/Broszury/LUCIOL/Ldt-100_specsheet_rev_003.pdf)
- [12] Majewski A., Teoria i projektowanie światłowód, WNT, Warszawa (1991)
- [13] Torbus S. A., Ratuszek M., Zastosowanie jednomodowych światłowód telekomunikacyjnych odpornych na zginanie G.657 do realizacji cewki pomiarowej polarymetrycznego czujnika natężenia prądu, Przegląd Elektrotechniczny, Kwiecień (2012)
- [14] Rose A. H., Etzel S. M., Wang C. M., Verdet constant dispersion in annealed optical fiber current sensors, Journal of Lightwave Technology, Vol. 15, No. 5, May (1997)