

Paweł KARASIŃSKI

## MIKROZGIĘCIOWY ŚWIATŁOWODOWY CZUJNIK PRZEMIESZCZEN

STRESZCZENIE. W niniejszym opracowaniu przedstawione są wyniki badań krajowych włókien optycznych pod kątem ich przydatności dla mikrozgięciowego czujnika przemieszczeń. Przedstawiono zależności; fotosygnалу na wyjściu włókna w funkcji odkształcenia, czułości od okresu zewnętrznego zaburzenia oraz ilości tych zaburzeń, otrzymane dla standardowego gradientowego włókna telekomunikacyjnego.

## A. WPROWADZENIE

Odchylenie położenia włókna światłowodu od linii prostej poprzez pojawiające się naprężenia powoduje zmiany w rozkładzie współczynnika załamania  $n$ . Zmiany rozkładu współczynnika załamania wprowadzają zjawisko sprzęgania się prowadzonych w światłowodzie modów. Zjawisko to polega na przepływie energii na ogół z modów niższego rzędu do modów wyższego rzędu. Składowe podłużne wektorów falowych odpowiadających modom propagującym się w światłowodzie włóknistym opisuje wyrażenie [1]:

$$\beta_m = k_0 n_0 \left[ 1 - \left( \frac{m}{m_c} \right)^{\frac{2\alpha}{\alpha+2}} \frac{2\Delta}{2} \right]^{\frac{1}{2}} ; \quad (1)$$

gdzie:  $k_0$  - wektor falowy w próżni,

$n_0$  - współczynnik załamania światła w próżni,

$\Delta = (n_1 - n_2) / n_1$  - względna różnica współczynników załamania rdzenia i płaszczu,

$\alpha$  - wykładnik określający profil współczynnika załamania,

$m$  - numer opisywanego modu,

$m_c$  - całkowita liczba modów propagujących się w światłowodzie.

Różnica pomiędzy składowymi podłużnymi wektorów propagacji  $\Delta\beta_m$  modów o numerach  $m-1$  i  $m$  jest na podstawie wyrażenia (1) równa [2]:

$$\Delta\beta_m = \beta_{m-1} - \beta_m = \left( \frac{\alpha}{\alpha+2} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{2\sqrt{\Delta}}{\alpha} \left( \frac{m}{m_c} \right)^{\frac{\alpha-2}{\alpha+2}} ; \quad (2)$$

gdzie  $a$  jest promieniem rdzenia światłowodu.

Dla parabolicznego rozkładu współczynnika załamania ( $\alpha=2$ ):

$$\Delta\beta = \frac{\sqrt{2\Delta}}{a} \quad (3)$$

Oznacza to, że we włóknie o parabolicznym rozkładzie współczynnika załamania  $\Delta\beta$  jest niezależne od numeru modu  $m$  i wszystkie mody są jednakowo przesunięte w przestrzeni wektorów falowych  $\beta$ .

Dla włókna o skokowym rozkładzie współczynnika załamania ( $\alpha=\infty$ )

$$\Delta\beta = \frac{2\sqrt{\Delta}}{a} \frac{m}{m_c} \quad (4)$$

W tym przypadku mody nie są jednakowo przesunięte w przestrzeni wektorów falowych  $\beta$ . W światłowodzie poddanym mikrozgięciom efektywne sprzężenie pomiędzy prowadzonymi modami występuje, gdy składowe podłużne wektorów falowych  $\beta_m$  i  $\beta_{m+1}$  spełniają warunek [3]:

$$\beta_m - \beta_{m+1} = \frac{2\pi}{\Lambda} \quad (5)$$

gdzie  $\Lambda$  jest okresem zewnętrznego zaburzenia.

Dla światłowodu o parabolicznym rozkładzie współczynnika załamania istnieje optymalna wartość okresu zaburzenia  $\Lambda_c$  odpowiadająca najsilniejszemu sprzężeniu się prowadzonych modów w światłowodzie:

$$\Lambda_c = 2\pi a / 2\Delta \quad (6)$$

W przypadku światłowodu o skokowym rozkładzie współczynnika załamania otrzymuje się różne  $\Lambda$  dla różnych par modów.

## B. WYNIKI BADAŃ

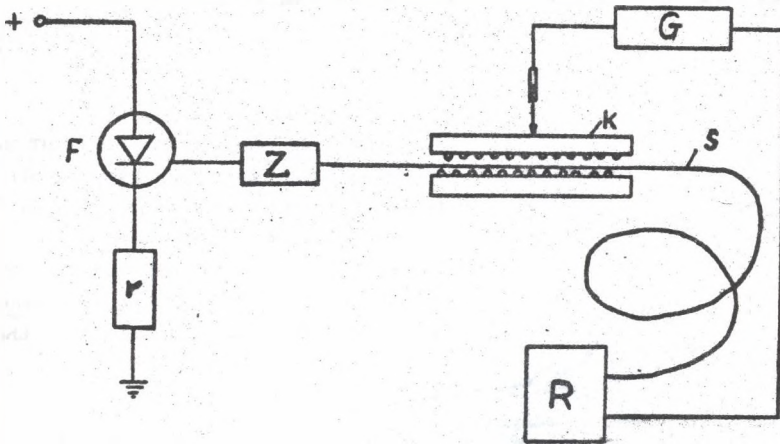
W początkowej fazie badań nad mikrozgięciowym czujnikiem przemieszczeń wykonano wiele eksperymentów na różnych typach krajowych włókien światłowodowych. Eksperymenty te pozwoliły ustalić kryteria, którymi należy się kierować przy wyborze rodzaju włókna światłowodowego dla tego typu czujnika. Stwierdzono, że dla mikrozgięciowego czujnika przemieszczeń najkorzystniejszy jest wybór włókna światłowodowego o parabolicznym rozkładzie współczynnika załamania ( $\alpha=2$ ). Wybór taki zapewnia możliwość osiągnięcia efektywnego sprzężenia pomiędzy prowadzonymi modami, które w światłowodzie o takim rozkładzie współczynnika załamania są jednakowo przesunięte w przestrzeni wektorów falowych  $\beta$  (wzór 3). Płaszcz włókna powinien być twardy i nie ulegać trwałym deformacjom podczas odkształcania światłowodu. Z uwagi na tak ustalone kryteria dalsze badania były prowadzone z wykorzystaniem standardowego telekomunikacyjnego światłowodu włóknistego o parabolicznym rozkładzie współczynnika załamania.

W układzie pomiarowym przedstawionym na rys.1 otrzymano szereg charakterystyk przemieszczeniowych czujnika dla różnych okresów zewnętrznego zaburzenia  $\Lambda$ .

Charakterystykę otrzymaną przy okresie zewnętrznego zaburzenia  $\Lambda=2$  [mm]

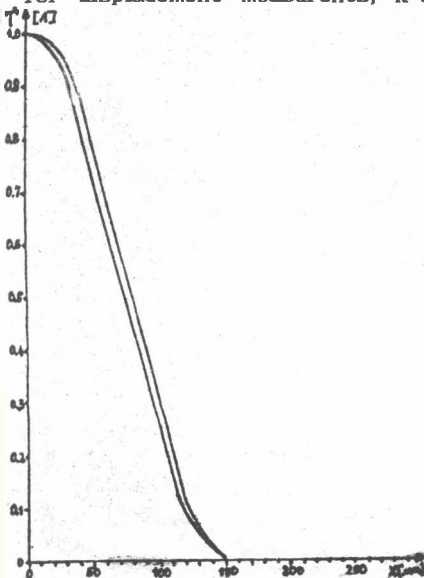
i liczbie zaburzeń  $N=10$  przedstawia rys.2. Wszystkie otrzymane charakterystyki, podobnie jak przedstawiana na rys.2, posiadały w znacznym zakresie odcinki liniowej zależności fotosygnалу  $T$  od wielkości deformacji światłowodu  $x$ . Przebiegi te wykazywały histerezę.

W dodatkowych eksperymentach stwierdzono, że jej źródłem jest tarcie pomiędzy włóknem światłowodowym a deformującymi je matrycami.

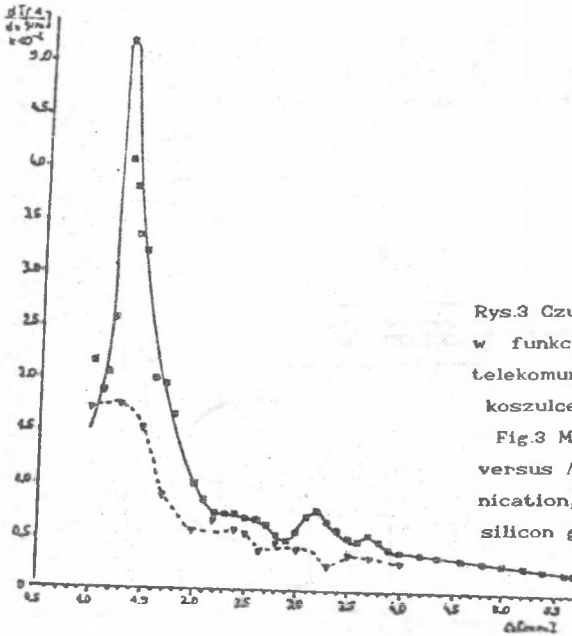


Rys. 1. Układ pomiarowy. F-fotodioda CQYP 06F, S-światłowód, K-kształtka deformująca, Z-ziączka światłowodowa, G-przyrząd precyzyjnego pomiaru przemieszczenia, R-układ detekcyjny, r-rezystor.

Fig. 1. The scheme of the measurements system. F-photodiode CQYP 06F, S-fiber, K-microbend modulator, Z-fiber coupler, G-precision instrument for displacement measurements, R-detector, r-resistor

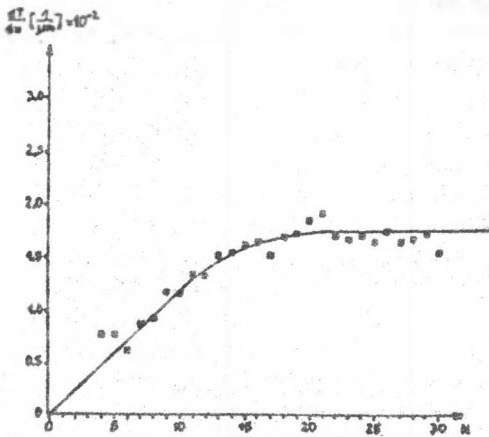


Rys. 2 Charakterystyka czujnika dla okresu zewnętrznego zaburzenia  $\lambda=2(\text{mm})$ , liczby zaburzeń  $N=10$   
Fig.2 Displacement characteristic versus mechanical wavelength  $\lambda$  and number of microbends  $N$ .



Rys.3 Czułość przemieszczeniowa  $dT/dx$  w funkcji  $\Delta$ . ■-standardowe włókno telekomunikacyjne, v-to samo włókno w koszulce z gumy silikonowej.

Fig.3 Microbending sensitivity  $dT/dx$  versus  $\Delta$ . ■-standard fiber telecommunication, v-the same fiber with the silicon gum jacket.



Rys.4 Czułość przemieszczeniowa w zależności od liczby mikrozgięć.

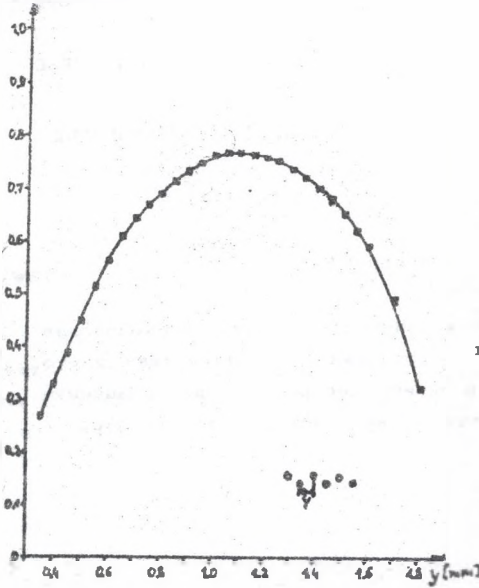
$\Delta=2$  [mm]

Fig.4 Displacement sensitivity versus number of microbends.

Charakterystyki otrzymane przy różnych okresach zewnętrznych zaburzeń  $\Delta$  pozwoliły wyznaczyć przebieg czułości przemieszczeniowej  $dT/dx$  czujnika

mikrozgięciowego w funkcji  $\lambda$ . Przebieg ten przedstawia rys.3. Widoczne jest ostre maksimum czułości  $dT/dx$  dla  $\lambda \approx 1.2$  [mm], co odpowiada efektywnemu sprzęgnięciu się prowadzonych modów. Z porównania obu przebiegów widać, że miękkie pokrycie włókna zmniejsza czułość przemieszczeniową czujnika.

Na rys.4 przedstawiona jest zależność czułości przemieszczeniowej  $dT/dx$  od liczby zewnętrznych zaburzeń  $N$ . Otrzymany przebieg wskazuje na silną zależność czułości przemieszczeniowej od liczby zaburzeń, dla małych  $N$  ( $n < 15$ ).



Rys. 5 Charakterystyka otrzymana przy równoległym przesuwie matryc deformujących na kierunku światłowodu. Odształcenie poprzeczne  $x=60$  [ $\mu$ m],  $\lambda=2$  [mm],  $N=10$

Fig. 5 The characteristic obtained for microbend modulator displacement on a fiber direction. The magnitude of the transversal displacement  $x=60$  [ $\mu$ m]  $\lambda=2$  [mm],  $N=10$

Równoległe przemieszczenia jednej z matryc deformujących względem drugiej na kierunku wyznaczonym przez światłowód, przy ustalonym odształceniu  $x$ , implikują zmiany w rozkładzie mikrozgięć światłowodu. Odpowiedź czujnika na takie przemieszczenia matryc deformujących przedstawia rys.5. Taki przebieg otrzymanej charakterystyki wynika z faktu, że również podczas opisanego odształcania światłowodu zmienia się promień jego mikrozgięć. Najmniejszy promień mikrozgięć odpowiada skrajnym wartościom  $y$ , a co za tym idzie maksymalnemu tłumieniu prowadzonego sygnału w światłowodzie.

#### C. PODSUMOWANIE

Dla mikrozgięciowego czujnika przemieszczeń najbardziej predisponowany spośród dostępnych w kraju włókien światłowodowych jest standardowy światłowód telekomunikacyjny. Stosowanie miękkich pokryć światłowodu

zmniejsza czułość przemieszczeniową czujnika .

Mikrozgięciowy czujnik przemieszczeń wykazuje histerezę , której źródłem jest tarcie pomiędzy włóknem a deformującymi je matrycami .

#### LITERATURA

- [1] John E. Midwinter, Światłowodowy telekomunikacyjny, WNT, W-wa 1983.
- [2] P. Karasiński, Praca dyplomowa ,Wydz. MAT-FIZ 1986,Pol. Si. 1986.
- [3] H. G. Unger, Planar optical wave guides and fibers, Oxford Engineering science series.
- [4] Thomas G. Giallorenzi et al.,Optical fiber sensor technology, IEEE J. Quantum Electron,vol. Qe-18.

Recenzent: Prof. dr hab. Jerzy Ranachowski

#### ВОЛОКОННЫЙ МИКРОСОГНУТЫЙ ДАТЧИК

##### Резюме

В этой работе представлено экспериментальные результаты исследования микросогнутого светового датчика. Представлены характеристики этого датчика; зависимость фотосигнала от величины деформации, деформационную чувствительность от перепада микросогнута и количества микросогнутов

#### FIBER OPTIC DISPLACEMENT SENSOR

##### Summary

In this paper there have been presented results of the investigations of optic fibers made in Poland in the point of view of their usefulness in a microbending displacement sensor. The characteristics for standard telecommunication fiber are presented. It shows a typical displacement characteristic photosignal  $T$  of the fiber output on a deformation magnitude  $x$ , and the characteristic of a displacement sensitivity  $dT/dx$  on a mechanical wavelength of the periodic perturbation  $\Lambda$  for mentioned fiber with the silicon gum jacket and without it. Investigation results of the displacement sensitivity  $dT/dx$  on number of microbendings are also presented.