

Zbigniew OPILSKI, Tadeusz PUSTELNY

AMPLITUDOWE CZUJNIKI ŚWIATŁOWODOWE - ZASTOSOWANIE

STRESZCZENIE

Przedstawiona została zasada działania światłowodowych czujników amplitudowych. Pokazano także możliwości ich zastosowania do budowy przetworników: drgań, siły, ciśnienia, ciśnienia górotworu, przyspieszenia oraz temperatury.

WPROWADZENIE

W ciągu ostatnich kilku lat zaobserwować można rosnące zainteresowanie czujnikami światłowodowymi. Zainteresowanie to wynika z dużej ich czułości oraz niewrażliwości na zakłócenia elektromagnetyczne. Nie bez znaczenia jest również fakt, iż nie wywołują one zagrożeń pożarami i wybuchami.

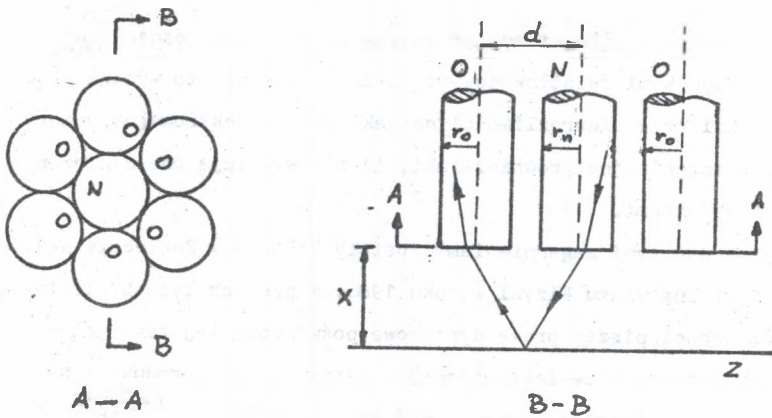
Prace nad tymi zagadnieniami zostały podjęte w Zakładzie Akustoelektroniki Instytutu Fizyki w roku 1986. W pracach tych brali także udział studenci, pisząc prace dyplomowe poświęcone tej tematyce.

Rozwój techniki światłowodowej w naszym kraju (produkcja światłowodów, kabli światłowodowych, źródeł, detektorów oraz elementów biernych) pozwala już na wdrażanie czujników światłowodowych do przemysłu.

Niniejsze opracowanie dotyczy jedynie wąskiej grupy czujników, tzw. amplitudowych. Propagująca się we włóknie światłowodowym fala świetlna charakteryzowana jest przez: amplitudę, fazę, częstotliwość oraz polaryzację. Mierzona wielkość fizyczna może wpływać na każdy z wymienionych parametrów. Wynika stąd konieczność stosowania różnego sposobu detekcji ich zmian. Pomiar zmian amplitudy fali świetlnej jest jednak metodą najbardziej dostępną. W pozostałych przypadkach konieczne jest stosowanie specjalizowanych światłowodów: jednomodowych lub jednopolarizacyjnych, których produkcja krajowa nie została jeszcze podjęta.

1. ŚWIATŁOWODOWY CZUJNIK PRZEMIESZCZENIA - ZASADA DZIAŁANIA

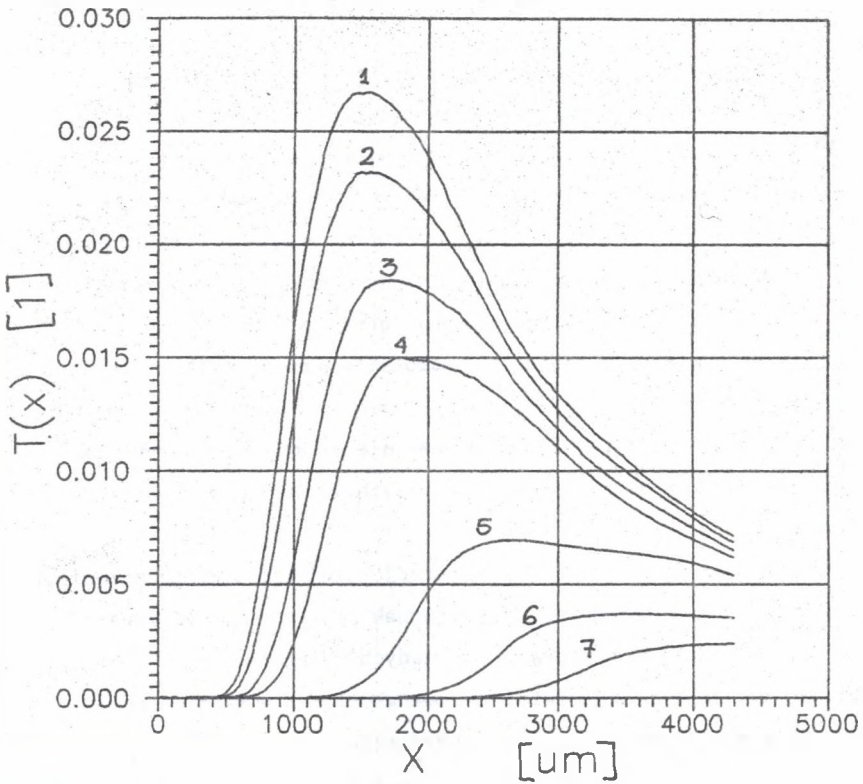
Czujnik ten mierzy odległość głowicy pomiarowej od powierzchni zwierciadlanej [1], [2]. Głowica składa się z dwóch układów światłowodów: nadawczego i odbiorczego. Na rys. 1 przedstawiono jej budowę w najprostszych przypadku. Składa się ona z jednego światłowodu nadawczego N, którym światło zostaje doprowadzone do głowicy oraz kilku światłowodów odbiorczych O umieszczonych dookoła światłowodu N i leżących w odległości d równoległe do niego.



Rys. 1. Budowa głowicy światłowodowej.

Fig. 1. Fiber sensor configuration.

Zadaniem światłowodów O jest odebranie światła wypromieniowanego przez centralny światłowod i odbitego od zwierciadlanej powierzchni pomiarowej. Ze światłowodu nadawczego N zostaje wypromieniowana rozbieżna wiązka światła o kącie rozbieżności φ zależnym od apertury numerycznej światłowodu, oraz sposobu jego pobudzenia. Wiązka ta pada na powierzchnię odbijającą i biegnie z powrotem w stronę głowicy pomiarowej. Tutaj oświetla czoła światłowodów odbiorczych O, na których drugim końcu, znajduje się fotodioda detekcyjna. Gdy powierzchnia odbijająca oddala się od głowicy pomiarowej, wiązka światła odbitego oświetla coraz większą część czoł światłowodów odbiorczych O. Przy dalszym



Rys.2. Charakterystyka przemieszczeniowa głowicy pomiarowej.

Fig.2. Fiber seuser displacement response.

1. $d=0.7$ mm
2. $d=0.8$ mm
3. $d=0.9$ mm
4. $d=1.0$ mm
5. $d=1.5$ mm
6. $d=2.0$ mm
7. $d=2.5$ mm

Światłowody typu Step-index o średnicy rdzenia

$$\phi_r = 380 \mu\text{m}$$

wzroście odległości głowicy od powierzchni odbijającej, natężenie światła w światłowodach rośnie coraz wolniej, a następnie zaczyna maleć. Rodzinę charakterystyk transmisyjnych czujnika przedstawiono na rys. 2. Rysunek ten ilustruje jednocześnie wpływ odległości między osiami światłowodów d , na charakterystykę przemieszczeniową głowicy.

Do celów pomiarowych wykorzystuje się przede wszystkim lewe zbrocze charakterystyki z uwagi na dużą czułość przemieszczeniową. Przez odpowiednią budowę głowicy można zmieniać w pewnych granicach jej parametry i przez to dostosowywać ją do konkretnych potrzeb. Można wpływać na jej czułość, zakres pomiarowy, liniowość, położenie punktu pracy.

Sama głowica pomiarowa nie zawiera elementów posiadających bezwładność mechaniczną, może więc być stosowana nie tylko do pomiarów statycznych, ale również do pomiarów dynamicznych w szerokich granicach częstotliwości.

Przedstawiono tu podstawową konfigurację czujnika przemieszczenia. W konkretnych zastosowaniach używa się jednak głowic o zmodyfikowanej budowie, bardziej przystosowanej do stawianych wymagań.

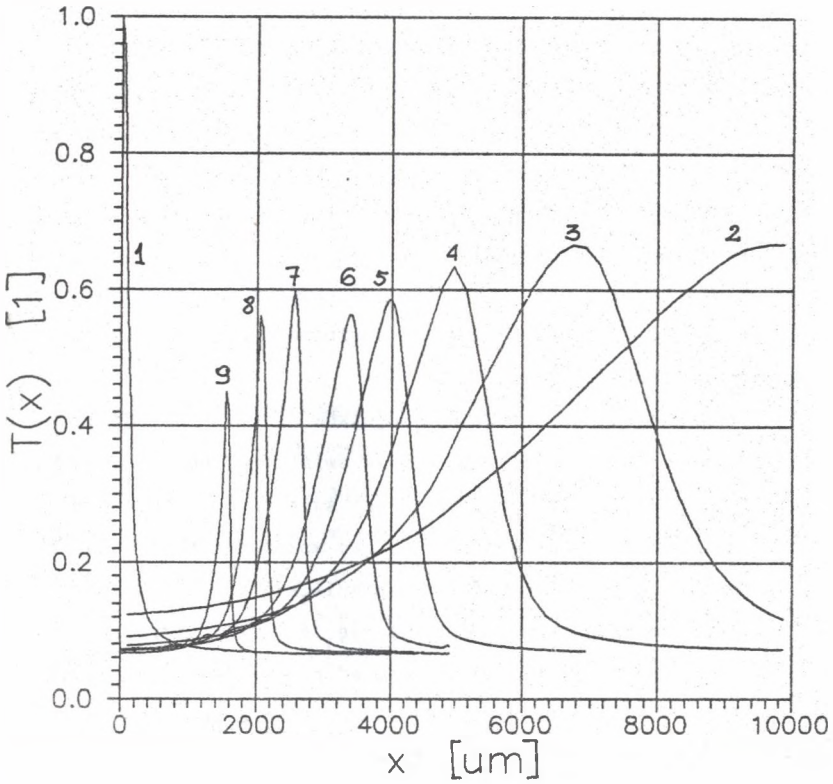
Poniżej zostanie przedstawiona budowa głowicy o większych możliwościach dostosowania parametrów do konkretnych potrzeb.

Głowica taka [2] (rys. 3) składa się tylko z jednego światłowodu, który pełni jednocześnie funkcję nadajnika jak i odbiornika światła.

Na jego końcu znajduje się światłowodowa soczewka gradientowa (SELFOC).

Światło zostaje wprowadzone do światłowodu za pomocą diody elektroluminescencyjnej D_n . Po przejściu przez rozgałęziacz światłowodowy R i odcinek transmisyjny światłowodu, światło oświetla soczewkę gradientową znajdującą się w odległości l od końca światłowodu. Soczewka ta formuje wiązkę światła (wpływa na kąt rozbieżności wiązki). Po odbiciu od powierzchni zwierciadlanej światło przechodzi ponownie przez soczewkę i wpada do tego samego światłowodu. W rozgałęziaczu R następuje rozdzielanie strumienia światła tak, że jego część oświetla fotodiodę odbiorczą D_o .

Zmiany odległości l oraz własności ogniskujących soczewki silnie wpływają na charakterystykę przemieszczeniową $T(X)$ czujnika światłowodowego.

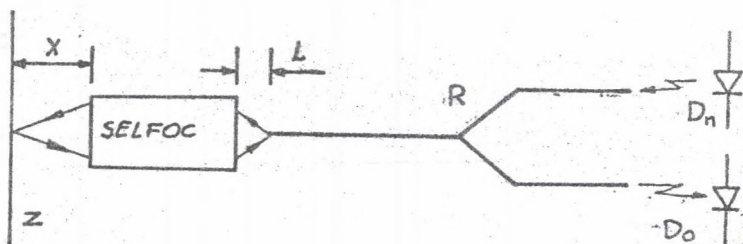


Rys.4. Charakterystyka przemieszczeniowa czujnika jednowłóknowego.

Fig.4. One-fiber sensor displacement response.

1. Bez soczewki
2. $l=0.6$ mm
3. $l=0.8$ mm
4. $l=1.0$ mm
5. $l=1.2$ mm
6. $l=1.4$ mm
7. $l=1.8$ mm
8. $l=2.2$ mm
9. $l=3.0$ mm

Światłowód gradientowy o średnicy rdzenia $\phi_r=50 \mu\text{m}$ i aperturze numerycznej $NA=0,21$.



Rys.3. Budowa czujnika jednowłóknowego.

Fig.3. One-fiber sensor configuration.

Rys.4. przedstawia rodzinę charakterystyk zmierzonych dla różnych wartości parametru l . Jego zmiana pozwala dostosować charakterystykę do konkretnych zastosowań.

Należy nadmienić, że przy budowie czujników opartych na przedstawionej zasadzie należy uwzględnić fakt, że w światłowodach występują straty mikrozgięciowe na wszelkich zagięciach światłowodu. Zmusza to do mierzenia tych strat i uwzględniania ich we wskazaniach urządzenia. Straty te mierzy się w światłowodzie odniesienia, który jest ułożony razem ze światłowodem czujnikowym. Zakłada się, że straty mikrozgięciowe są jednakowe w obydwu światłowodach. Procedurę uwzględniania strat mikrozgięciowych wykonuje automatycznie, odpowiednio zaprojektowana część elektroniczna urządzenia.

Czujnik opisowego typu znajduje szerokie zastosowanie wszędzie tam, gdzie mierzoną wielkość fizyczną, można zamienić na pomiar przesmyczenia, lub pomiar tłumienia w przestrzeni pomiarowej. Mają one jednak poważną przewagę nad konwencjonalnymi metodami pomiarowymi. Wynika to z możliwości przestrzennego i galwanicznego rozdzielania głowicy światłowodowej od części elektronicznej, obrabiającej pomiarowy sygnał świetlny. Obydwie części połączone są tylko za pomocą dielektrycznego światłowodu. Czujniki takie mogą pracować w warunkach dużych zakłóceń elektromagnetycznych, oraz w środowiskach łatwo palnych.

Poniżej przedstawionych zostanie kilka zastosowań światłowodowego czujnika przemieszczenia.

2. CZUJNIK DRGAŃ

Idea czujnika drgań wynika bezpośrednio z zasady działania opisanego czujnika przemieszczenia. Głowica pomiarowa umocowana jest do miejsca, względem którego odbywa się pomiar, natomiast zwierciadło pomiarowe do drgającego obiektu. Urządzenie takie zostało wykonane i zastosowane do pomiaru drgań głowicy kombajnu górniczego na stanowisku badawczym. Głowica pomiarowa przystosowana była do pomiaru drgań o maksymalnej amplitudzie 0,1 mm oraz 1 mm, w zakresie częstotliwości od 0 do 10 kHz. Pomiar odbywał się z dynamiką 35 dB. Wyjście urządzenia przystosowane było do współpracy z magnetofonem pomiarowym.

3. CZUJNIK SIŁY

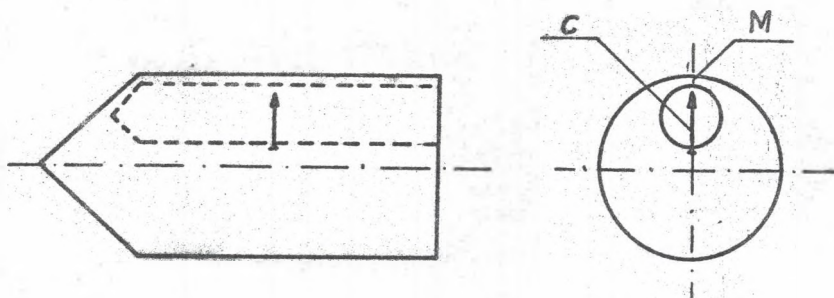
Cechy światłowodowego czujnika przemieszczenia pozwalają na łatwe jego zastosowanie do budowy czujnika siły. Siła jest przykładana do kształtki, która pod jej wpływem ulega deformacji sprężystej. Deformacja ta powinna być proporcjonalna do przyłożonej siły. Głowica światłowodowa mierzy siłę pośrednio, mierząc deformacje. Zakres pomiarowy uzależniony jest od czułości i zakresu pomiarowego głowicy światłowodowej, a także od podatności mechanicznej kształtki pomiarowej.

4. CZUJNIK CIŚNIENIA

Ciśnienie jest także wielkością fizyczną, którą łatwo zamienić na pomiar przemieszczenia (deformacji). Metodą tą można mierzyć nie tylko ciśnienie gazów czy cieczy.

Przedstawiony zostanie czujnik ciśnienia górotworu. Pomiar ciśnienia górotworu ma poważne znaczenie w górnictwie podczas urobku węgla.

Głowica pomiarowa została przedstawiona na rys.5. Wprowadza się ją do otworu wywierconego w górotworze (poza strefę spękań). Po pewnym czasie otwór zostaje zaciśnięty przez górotwór. Od tej chwili, na membranę pomiarową M działa ciśnienie górotworu, które deformuje ją sprężysto. Asymetryczne umieszczenie otworu i membrany w głowicy pomiarowej powoduje, że charakterystyka czujnika jest kierunkowa i umożliwia pomiar jednej składowej ciśnienia.



Rys.5. Budowa głowicy do pomiaru ciśnienia górotworu

M - membrana pomiarowa

C - światłowodowy czujnik przemieszczenia.

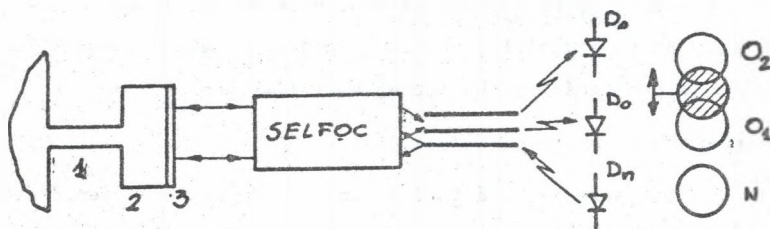
Fig.5. Tectonic-pressure fiber sensor configuration

M - diaphragm

C - displacement fiber sensor.

5. CZUJNIK PRZYSPIESZENIA

Idea pomiaru przyspieszenia została przedstawiona na rys.6.



Rys.6. -

1. sprężysta belka

2. masa

3. zwierciadło

4. światłowodowa głowica

a. kierunek przyspieszenia

Fig.6.

1. elastic beam

2. mass

3. mirror

4. fiber sensor

a. direction of acceleration.

Działające na masę 2 przyspieszenie powoduje ugięcie sprężystej belki. Ugięcie to rejestrowane jest przez głowicę światłowodową umieszczoną przed zwierciadłem 3, umocowanym do masy 2 [4].

Światło wprowadzone jest do najniżej położonego światłowodu N. Wychodząc z niego oświetla światłowodową soczewkę gradientową, która formuje światło w wiązkę równoległą. Odbite od zwierciadła przechodzi ponownie przez soczewkę i skupione przez nią pada na dwa światłowody odbiorcze O_1 i O_2 , oświetlając je jednakowo. Pod wpływem działającego przyspieszenia zwierciadło pochyla się. Powoduje to zmianę natężeń światła odbieranych przez światłowody odbiorcze O_1 i O_2 . Różnica tych natężeń jest miarą kąta pochylenia zwierciadła, a więc także działającego przyspieszenia.

Czułość opisanego urządzenia wynosi około 10^{-6} g (g - przyspieszenie ziemskie).

6. AMPLITUDOWE CZUJNIKI TEMPERATURY

Zasada działania tej grupy czujników światłowodowych oparta jest na wpływie temperatury na warunki propagacji światła w włóknie wielomodowym.

Niektóre ciekłe kryształy z grupy cholesterolów w obecności propagującej się w nich fali elektromagnetycznej pod wpływem zmian temperatury wykazują zmianę swojej barwy oraz wartości współczynnika załamania światła. Istnieje możliwość wykorzystania tego efektu do budowy czujników temperatury w zakresie 280 - 320 K [5, 3].

Można wykorzystać do konstrukcji czujnika efekt wpływu temperatury na dwójłomność niektórych kryształów. Termometr zbudowany na kryształce dwójłomnym został zastosowany do pomiaru temperatury końcówek wiertniczych przy pracach głębinowych. Osiągnięto dokładność 2 deg w zakresie od temperatur pokojowych do 773 K [7].

Kolejną grupę wielomodowych czujników światłowodowych stanowią te, w których wykorzystano wpływ temperatury na własności fluorescencyjne fosforu i niektórych jego mieszanin. Przejściu światła ultrafioletowego przez światłowód, który otoczony jest substancją fluorescencyjną, towarzyszy emisja wsteczna w tym światłowodzie. Okazuje się, że natężenie tego wstecznego promieniowania zależne jest od temperatury substan-

cji otaczającej włókno [9].

Inną grupę czujników stanowią tzw. czujniki dylatacyjne. Wykorzystują one, opisaną wcześniej przy okazji czujników odbiciowych przemieszczenie i siły, silną natężność transmisji światła od wzajemnej odległości między czołem światłowodu i powierzchnią odbijającą. Do realizacji zmian ustawienia czoła włókien względem zwierciadła wykorzystuje się zjawisko różnej termicznej rozszerzalności liniowej włókien światłowodowych i osłony zakończonej zwierciadłem. Rolę elementu pomiarowego spełnia osłona poddawana bezpośrednio działaniu temperatury. W zależności od materiału osłony czujniki tego typu mogą być wykorzystane w zakresie temperatur do ok. 1000 K i większym.

6.1. Światłowodowy czujnik temperatury z absorpcją światła w półprzewodniku.

W Instytucie Fizyki Politechniki Śląskiej szczególnie silnie rozwinięte są badania nad czujnikiem wykorzystującym temperaturową zależność absorpcji światła w półprzewodniku.

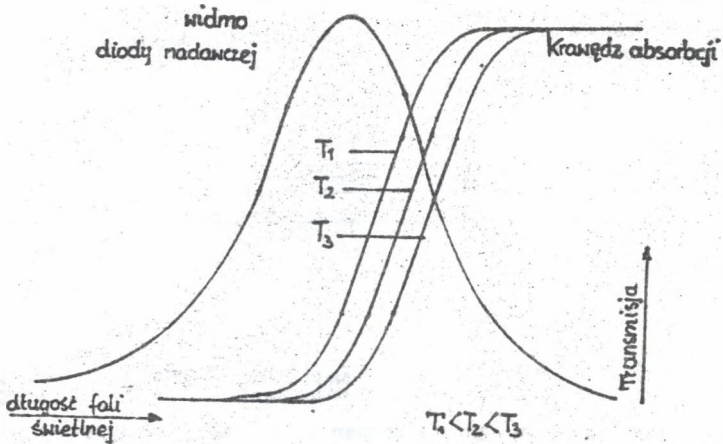
Duże zainteresowanie tym czujnikiem wynika z możliwości zastosowania go w urządzeniach elektroenergetycznych dużej mocy, wszędzie tam gdzie istnieją silne zakłócające pola elektromagnetyczne.

W czujniku wykorzystywana jest zmiana współczynnika absorpcji światła w półprzewodniku.

Zmiana absorpcji światła wywołana jest temperaturową zmianą szerokości przerwy energetycznej z temperaturą tego półprzewodnika. Szerokość przerwy energetycznej z temperaturą maleje. Na rys. 7 pokazano ideę pomiaru tą metodą [10].

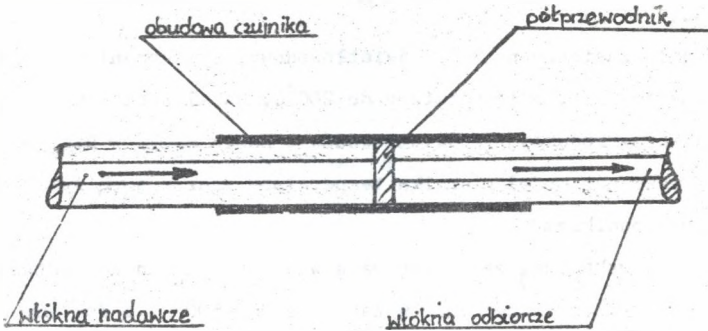
Długość fali świetlnej λ_0 , odpowiadająca krawędzi absorpcji, zmienia się zatem z rosnącą temperaturą w kierunku fal dłużych. Jeśli jako źródła światła używa się diody elektroluminescencyjnej, której widmo promieniowania przypada na zakres zmian λ_0 , to natężenie światła przechodzącego przez półprzewodnik maleje z rosnącą temperaturą.

Czujnik, wykorzystujemy ideę przedstawioną na rys. 8, wymagał zastosowania dwóch kabli światłowodowych: nadawczego i odbiorczego. Obudowa czujnika, wewnątrz której znajdował się półprzewodnik, powodowała, że czujnik był na tyle duży, że punktowy pomiar temperatury był nim praktycz-



Rys.7. Jde o działanie czujnika temperatury z wykorzystaniem absorpcji światła w półprzewodniku.

Fig.7. The idea of temperature optical sensor with the absorption light in semiconductor.

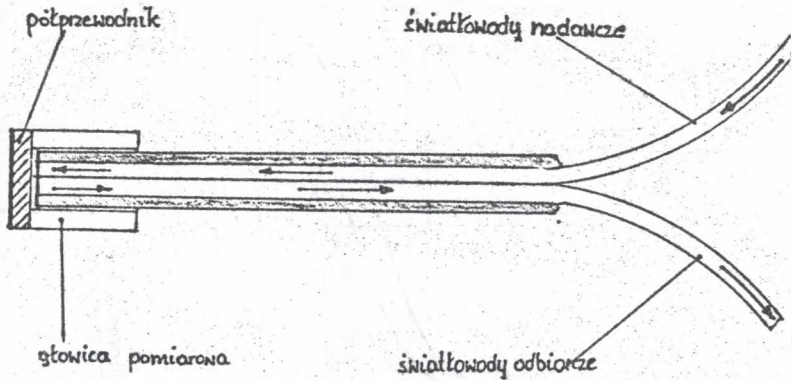


Rys.8. Schemat czujnika temperatury z półprzewodnikiem.

Fig.8. Fiber temperature sensor configuration.

nie niemożliwy. Z tych powodów w modelu laboratoryjnym zastosowano pewną odmianę tej idei (rys. 9).

Na jednym z końców kabla światłowodowego włókna zostały pogrupowane w dwie wiązki: nadawczą i odbiorczą. Światło prowadzone wiązką nadawczą przechodzi przez półprzewodnik, odbija się od zwierciadła (naniesionego na zewnętrznej powierzchni półprzewodnika), powtórnie przechodzi przez półprzewodnik i wiązkę odbiorczą wraca do układu detekcyjnego. Taka idea pozwala na praktycznie punktowe pomiary temperatury. Charakteryzuje się



Rys.9. Półprzewodnikowy czujnik temperatury - wersja odbiciowa.

Fig.9. Fiber temperature sensor configuration - the reflection version.

dużą elegancją, gdyż w całym torze stosowany jest tylko jeden kabel światłowodowy. W zakresie temperatur od 250 do 550 K silne zmiany szerokości przerwy energetycznej z temperaturą wykazuje monokrystaliczny arsenek galu.

W układzie zastosowano kabel światłowodowy, w wykonaniu specjalnym, wytrzymały na ciągle temperatury do 200°C. Kabel został wykonany w Ośrodku Badawczo-Produkcyjnym Światłowodów w Hucie Szkła w Białymstoku.

Został wykonany model miernika temperatury wraz z sondą światłowodową i półprzewodnikiem.

Wstępne badania wskazują, że zastosowane w nim rozwiązania elektroniczne umożliwiają pomiar temperatury w zakresie 250-500 K, z dokładnością 1.5 deg.

PODSUMOWANIE

W zakończeniu można stwierdzić, że czujniki światłowodowe, ze względu na uniwersalność możliwości ich zastosowań, a także ze względu na wspomniane wcześniej zalety, powinny znaleźć zastosowanie w wielu urządzeniach pomiarowych i układach automatyki przemysłowej. Wszędzie tam, gdzie stosowanie konwencjonalnych metod pomiarowych jest utrudnione lub wręcz niemożliwe.

LITERATURA

- [1] M.P.Conley, C.J.Zarobila, J.B.Freal: Reflection type fiber-optic sensor. SPIE vol. 718, 1986, str. 237.
- [2] B.Krzan: Praca dyplomowa nt. "Wykonanie i przetestowanie światłowodowego czujnika przemieszczenia". Gliwice 1987. r.
- [3] S.D.Cusworth, J.M.Senior: Optical fibre sensing using GRIN rod lenses. Journal of Optical Sensors, Vol. 2, No 6, 1987, str. 421.
- [4] K.Cout: Praca dyplomowa nt. "Światłowodowy czujnik przyspieszenia". Gliwice 1988. r.
- [5] T.C.Rozzell, et al., J.Microwave Power, vol. 9, 1984, str. 241.
- [6] A.Deficis, Microwave Journal, vol. 10, 1977, str. 55.
- [7] M.Brenci, R.Falcai, Italian Patent No 84155 A/82, 1982, 18.
- [8] K.Wichersheim, Indian Res. Div, 1979, str. 82.
- [9] D.Christensen, J,Biomed. Eng, vol. 1, 1977, str. 541.
- [10] T.Pustelny, Zastosowania światłowodów, Materiały Konferencyjne, Białowieża. 1987.

Recenzent: Prof. dr hab. Jerzy Ranachowski

АМПЛИТДНЫЕ СВЕТЛОВОДОВЫЕ ДАТЧИКИ - ИСПОЛЬЗОВАНИЕ

Резюме

Представлен принцип работы волоконно-оптических амплитудных датчиков. Показаны возможности их применения для построения преобразователей колебаний, силы, тектонического давления, ускорения и температуры.

FIBER-OPTIC SENSORS - APPLICATION

Summary

A fiber-optic measurement instruments were presented. These instruments were applied to construct sensors of: vibration, force, pressure, tectonic pressure, acceleration and temperature.