

Zdzisław KACZMAREK

POLITECHNIKA ŚWIĘTOKRZYSKA, SAMODZIELNY ZAKŁAD ELEKTROTECHNIKI TEORETYCZNEJ I METROLOGII

Światłowodowy czujnik ciśnień impulsowych z siatką Bragga o liniowo zmiennym okresie**dr hab. inż. Zdzisław KACZMAREK**

Absolwent Wydziału Łączności Politechniki Wrocławskiej (1964). 13 lat pracował w przemyśle, jako konstruktor w Z R „Diora” w Dzierżonowie i jako st. specjalista metrologii w ZD „Cuprum” przy KGHM w Lubinie. Doktorat obronił w Instytucie Metrologii Elektrycznej Politechniki Wrocławskiej (1977) a habilitację na Wydziale Elektrycznym Politechniki Warszawskiej (1990). Jest autorem lub współautorem ponad 80 prac naukowych. Wypromował 4 doktorów n.t.



e-mail: z.kaczmarek@tu.kielce.pl

Streszczenie

W artykule przedstawiono światłowodowy czujnik ciśnień impulsowych, w którym przetwornikiem mechanicznym jest odcinek światłowodu jednomodowego stanowiący elastyczny pręt, natomiast jako przetwornik fali odkształceń wykorzystuje się siatkę Bragga z chirpem, naniesioną na rdzeniu tego światłowodu. Impuls ciśnienia działa za pośrednictwem głowicy pomiarowej na jedną z czołowych powierzchni odcinka światłowodu, wywołując w nim sprężystą falę odkształceń. Siatka Bragga przetwarza falę odkształcenia na zmiany długości fali wiązki światła. Podano układ optyczny układu pomiarowego z czujnikiem. Czujnik zastosowano do pomiaru ciśnień udarowych wywołanych wyładowaniem elektrycznym w wodzie. Przedstawiono uzyskane rezultaty pomiarów i wnioski z nich wynikające.

Słowa kluczowe: czujnik ciśnienia, światłowodowa siatka Bragga**Chirped fiber Bragg grating impulsive pressure sensor****Abstract**

This paper presents an impulsive pressure sensor based on the elastic bar. As the elastic bar, a piece of single mode optical fiber with a photo-inscribed chirped Bragg grating is used. The impulsive pressure acts on the front face of the measuring head, creating inside it elastic stress waves, propagating inside the optical fiber as longitudinal waves. The grating is an optical strain gauge, which converts the strain waves in the fiber into the changes of the Bragg wavelength. An experimental setup for the proposed sensor is demonstrated. The sensor was used to measure the pressure created by an electrical discharge in water. Measurement results and inferences are presented.

Keywords: pressure sensor, optical fiber Bragg grating**1. Wprowadzenie**

Elastyczny metalowy pręt, zwykle o przekroju kołowym, z zainstalowanymi na nim tensometrami rezystancyjnymi jest czujnikiem pomiarowym często stosowanym w pomiarach mechanicznych wielkości impulsowych. Jego podstawowe zalety to prosta budowa i szerokie pasmo przenoszenia. Stosowanie takiego czujnika wiąże się jednak z pewnymi niedogodnościami, które wynikają ze znacznej długości pręta i z konieczności kompensowania wpływu dyspersji fal w nim propagujących na dokładność przetwarzania, przy bardzo krótkich impulsach wymuszających. Szczególnie znaczna długość pręta ogranicza zakres zastosowania tego czujnika.

W celu ominięcia tych niedogodności zaproponowano koncepcję światłowodowego czujnika ciśnień impulsowych, w którym rolę sprężystego pręta spełnia odcinek światłowodu

jednomodowego, a funkcję tensometru pełni siatka Bragga, naniesiona na jego rdzeniu w wybranym miejscu. Średnica jednomodowego światłowodu telekomunikacyjnego, dla trzeciego okna transmisyjnego wokół długości fali 1550 nm, wynosi 0,125 mm. Na podstawie krzywej dyspersyjnej pierwszej postaci drgań pręta dla stosunku jego promienia a i długości fali $a/\lambda < 0,1$ prędkość fazowa podłużnych fal sprężystych jest większa niż $c_f > 0,9996 c_0$ przy czym c_0 jest prędkością fal podłużnych w nieskończonej cienkim przecię. [1]. Przy tak nieznacznej różnicy prędkości fazowej i prędkości c_0 wpływ dyspersji fal można pominąć. Dla pręta światłowodowego o promieniu 62,5 μm , wykonanego ze szkła kwarcowego dla którego $c_0 = 5740$ m/s i liczba Poissona $\nu = 0,21$, uwzględniając warunek $a/\lambda < 0,1$ oraz zależność $f = c_0/\lambda$, zakres pracy bez wpływu dyspersji fal wynosi ~ 9 MHz. Włókno światłowodowe o dowolnej długości, pełniące rolę sprężystego pręta, nie stanowi utrudnienia w pomiarach, gdyż może być łatwo zwijane z promieniem zgięcia kilku centymetrów.

Światłowodowy czujnik ciśnień impulsowych, z odcinkiem światłowodu jako sprężystym prętem i z siatką Bragga o stałym okresie przedstawiono w pracach [2-4]. W niniejszym artykule przedstawiono ten rodzaj czujnika, ale z zastosowaniem siatki Bragga o liniowo zmiennym okresie oraz szklaną głowicę pomiarową. Głowica ta zawierająca stożek, stanowiący przejście między częścią walcową wprowadzaną do obiektu a odcinkiem włókna światłowodowego, umożliwia doprowadzenie wymuszenia impulsowego do włókna. Przedstawiono uzyskane rezultaty pomiarów ciśnień impulsowych z zastosowaniem proponowanego czujnika pomiarowego.

2. Światłowodowa siatka Bragga o zmiennym okresie

Siatki te mają monotonicznie zmienny okres wzdłuż swojej długości, rys. 1. Długość fali Bragga siatki określa zależność [6]

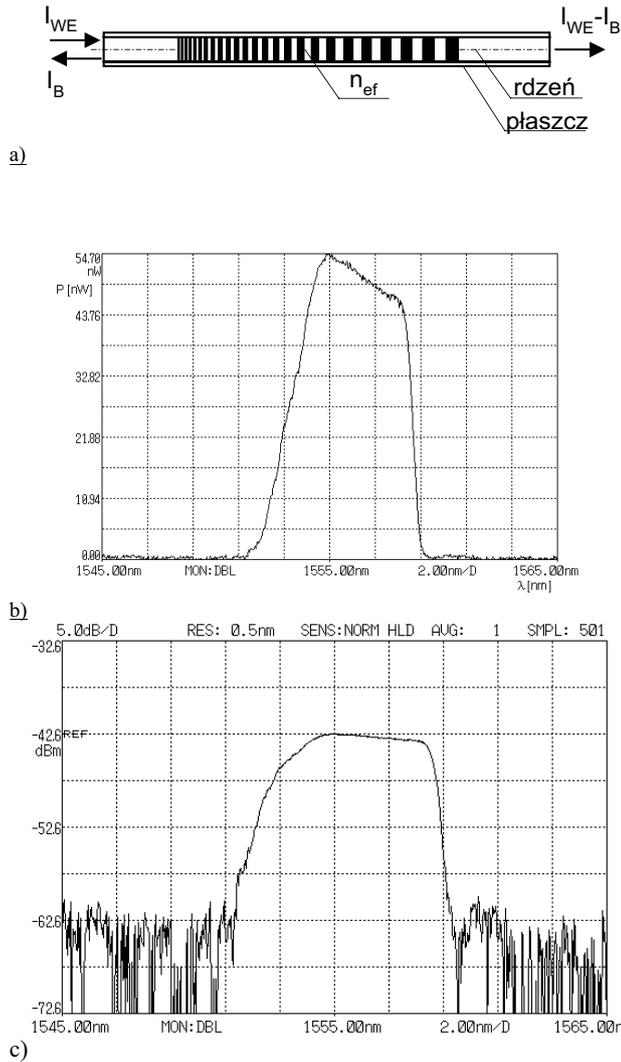
$$\lambda_B(z) = 2n_{ef}(z)\Lambda(z) \quad (1)$$

przy czym Λ jest okresem siatki, n_{ef} jest efektywnym współczynnikiem załamania rdzenia włókna, z oznacza współrzędną przestrzenną. Dla siatki o liniowo zmiennym okresie obowiązuje relacja

$$\Lambda(z) = \Lambda_0 + \Lambda_1 z \quad (2)$$

przy czym Λ_0 jest okresem początkowym siatki, a Λ_1 oznacza zmiany tego okresu wzdłuż długości l siatki. Widmo mocy wiązki odbitej siatki ma przebieg zbliżony do prostokątnego. Pasma wiązki odbitej jest wprost proporcjonalne do jej długości i współczynnika Λ_b , natomiast dolną i górną długość fal tego pasma wyznaczają długości fal Bragga skrajnych siatek struktury. W czujniku zastosowano siatkę o centralnej długości fali 1559,500 nm, współczynnika odbicia mocy 0,996, 1,0 dB paśmie 4,456 nm, 3 dB paśmie 5,255 nm. Siatkę naniesiono na rdzeń światłowodu jednomodowego Corning SMF28. Widmo mocy wiązki odbitej siatki przedstawiono w liniowym układzie osi współrzędnych na rysunku 1b, a w półlogarytmicznym układzie osi współrzędnych na rysunku 1c.

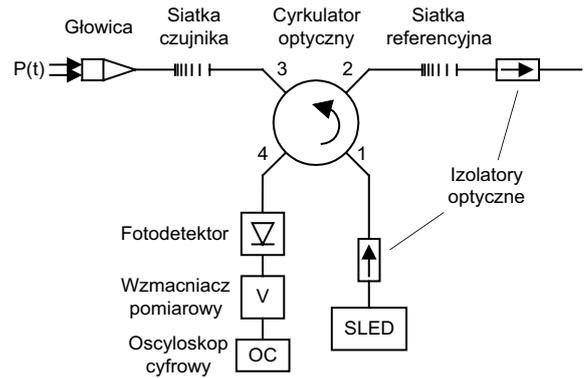
Malejąca amplituda widma mocy wiązki odbitej siatki, obserwowana na rysunku, wynika z kształtu widma gęstości mocy diody elektroluminescencyjnej, którą oświetlano badaną siatkę.



Rys. 1. Światłowodowa siatka Bragga o zmiennym okresie a) struktura, b) i c) widmo mocy wiązki odbitej
Fig. 1. Chirped fiber Bragg grating a) the structure, b) i c) the power spectrum of a reflected light beam

3. Zasada działania czujnika i układ pomiarowy

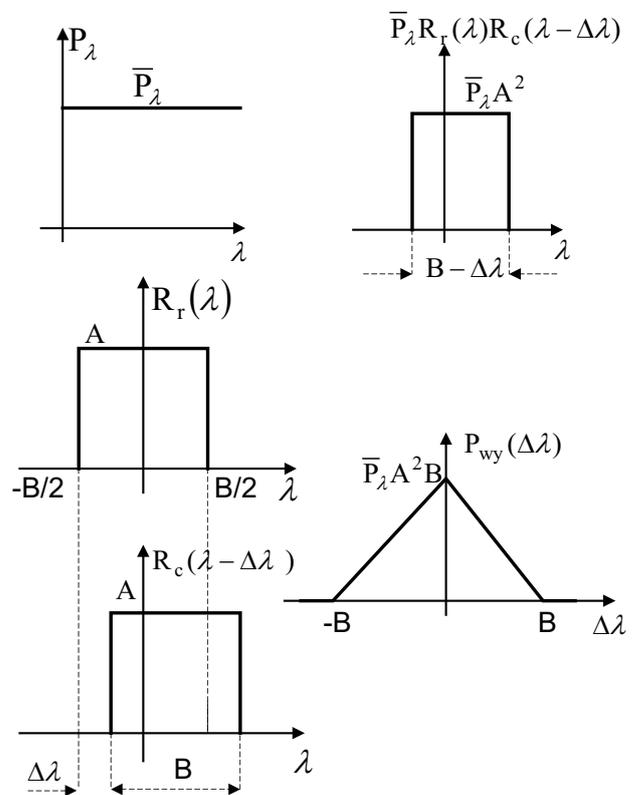
Czujnik jest zbudowany z jednomodowego odcinka światłowodu z naniesioną na jego rdzeniu siatką Bragga o zmiennym okresie. Jeden koniec światłowodu przyspawano do szklanej głowicy pomiarowej o kształcie stożkowym z częścią cylindryczną u podstawy. Odcinek światłowodu pełni rolę przetwornika mechanicznego, natomiast siatka Bragga stanowi przetwornik mechaniczno-optyczny o częstotliwościowym sygnale wyjściowym. Głowica pomiarowa wprowadzona do obiektu przejmuje, przez czołową powierzchnię części cylindrycznej, impuls ciśnienia, który wytwarza w głowicy fale podłużnych fal odkształceń. W części stożkowej głowicy impuls odkształcenia ma dwie składowe o przeciwnych znakach: przednia jego część jest falą ścisnąjącą, a tylna falą rozciągającą. Fala rozciągająca powstaje dla zachowania pędu przy przemieszczaniu się fali w kierunku wierzchołka stożka [4]. Schemat układu pomiarowego czujnika ciśnienia impulsowego przedstawiono na rysunku 2. Do budowy układu pomiarowego zastosowano diodę SLED o centralnej długości fali 1560 nm, mocy optycznej 15 mW i paśmie 50 nm, odbiornik optyczny o regulowanym skokowo wzmacnieniu i paśmie 10 MHz, spigłajlowane izolatory optyczne i optyczny cyrkulator 4-portowy.



Rys. 2. Schemat światłowodowego czujnika ciśnienia impulsowego z siatką Bragga o zmiennym okresie
Fig. 2. Setup of the optical fiber pressure sensor with a chirped Bragg grating

Szerokopasmowa wiązka światła diody SLED oświetla, poprzez wyprowadzenia 1 i 2 cyrkulatora optycznego siatkę referencyjną. Odbita wiązka światła od tej siatki poprzez wyprowadzenia 2 i 3 cyrkulatora pada na siatkę czujnika. Światło odbite od siatki czujnika doprowadza się poprzez wyprowadzenia 3 i 4 cyrkulatora do fotodetektora, w którym przetwarza się na sygnał prądowy, wzmacniony w odbiorniku optycznym. Sygnał wyjściowy odbiornika rejestruje się przy pomocy oscyloskopu cyfrowego.

Demodulację długości fali sygnału czujnika przeprowadza się przy pomocy optycznego dyskryminatora długości fali składającego się z dwóch identycznych siatek o zmiennym okresie: siatki czujnika i siatki referencyjnej. Dyskryminator pracuje w układzie odbiciowym. Sposób działania i charakterystykę przetwarzania takiego dyskryminatora z siatkami o prostokątnym widmie współczynnika odbicia mocy ilustruje rysunek 3.



Rys. 3. Ilustracja działania optycznego dyskryminatora długości fali i jego charakterystyka przetwarzania
Fig. 3. Illustration of operation of an optical wavelength discriminator and its transfer function

Moc optyczna wiązki wyjściowej jest liniową funkcją długości fali, można opisać ją zależnością o postaci [5]

$$P_{wy}(\Delta\lambda) = \int_{-B/2+\Delta\lambda}^{B/2} P_{\lambda} R_r(\lambda) R_c(\lambda - \Delta\lambda) d\lambda \quad (3)$$

przy czym: $P_{\lambda} = dP/d\lambda$ jest widmowa gęstością mocy źródła światła, $R_r(\lambda)$ i $R_c(\lambda)$ są współczynnikami odbicia mocy siatek: referencyjnej i czujnika odpowiednio, B jest pasmem siatek, $\Delta\lambda$ oznacza przesunięcie długości fali siatki czujnika wywołanej mesurandem. Jeżeli przyjąć widmo współczynnika mocy siatek o kształcie prostokątnym o amplitudzie A oraz stałą gęstość widmowa mocy źródła światła równą \bar{P}_{λ} , na podstawie relacji (3) moc wyjściowa dyskryminatora określa się zależnością

$$P_{wy}(\Delta\lambda) = \int_{-B/2+\Delta\lambda}^{B/2} \bar{P}_{\lambda} A^2 d\lambda = \bar{P}_{\lambda} A^2 (B - \Delta\lambda) \quad (4)$$

Uwzględniając, że $\Delta\lambda$ może przyjmować wartości dodatnie i ujemne, otrzymuje się ogólną postać zależności na moc wyjściową

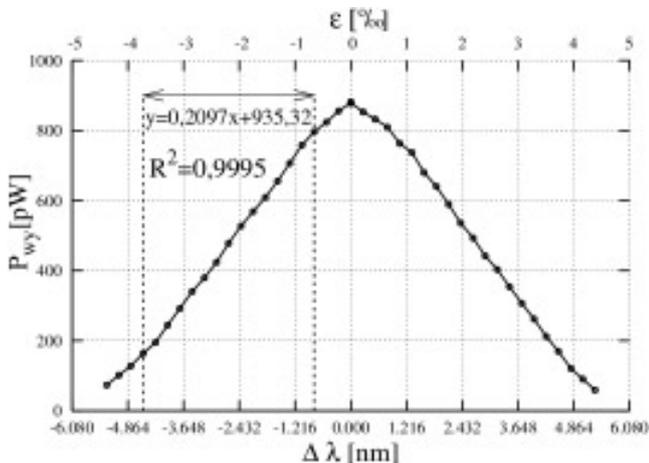
$$P_{wy}(\Delta\lambda) = \bar{P}_{\lambda} A^2 (B - |\Delta\lambda|) \quad \text{dla } |\Delta\lambda| \leq B \quad (5)$$

$$P_{wy}(0) = \bar{P}_{\lambda} A^2 B \quad \text{dla } \Delta\lambda = 0$$

Dla $|\Delta\lambda| > B$ nie ma związku między funkcjami widmowymi $R_r(\lambda)$ oraz $R_c(\lambda - \Delta\lambda)$, zatem

$$P_{wy}(\Delta\lambda) = 0 \quad \text{dla } |\Delta\lambda| > B \quad (6)$$

Charakterystykę przetwarzania dyskryminatora rzeczywistego, zbudowanego z dwóch siatek o widmie mocy współczynnika odbicia przedstawionym na rysunku 1bc przy oświetleniu siatki referencyjnej wiązką ze źródła światła białego przedstawiono na rysunku 4.

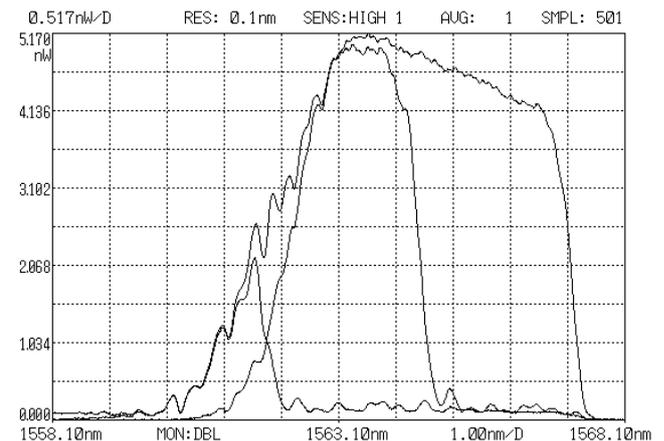


Rys. 4. Charakterystyka przetwarzania optycznego dyskryminatora długości fali
Fig. 4. The transfer function of the optical wavelength discriminator

Charakterystykę tą otrzymano obciążając jeden koniec swobodnie zwisającego włókna siatki czujnika odważnikami o znanej masie, przy zamocowanym w uchwycie drugim końcu włókna. Moc wyjściową dyskryminatora, którą stanowi moc

wiązki odbitej siatki czujnika, mierzono analizatorem widma światła. Dobierając wartość zakresu przetwarzania dyskryminatora można uzyskać błąd nieliniowości mniejszy niż 0,5%. Z przebiegu charakterystyki dyskryminatora wynika, że w zależności od punktu pracy możliwa jest demodulacja sygnałów unipolarnych i bipolarnych. Punkt pracy dyskryminatora ustala się przez odkształcenie siatki referencyjnej w specjalnym przyrządzie. Możliwy zakres przesunięcia centralnej długości fali tej siatki wynosi 10 nm.

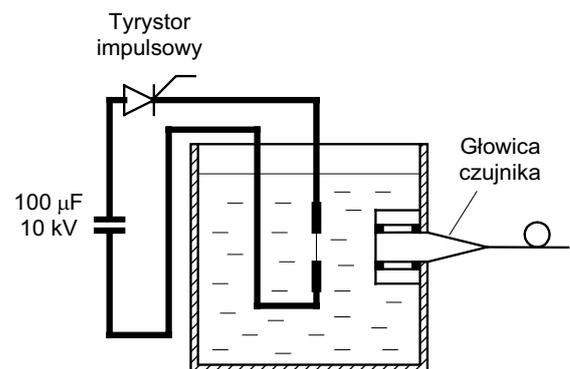
Widmo gęstości mocy wiązki wyjściowej dyskryminatora dla trzech punktów pracy: $\Delta\lambda = 0$, $\Delta\lambda = B/2$ oraz $\Delta\lambda = B$ przedstawiono na rysunku 5.



Rys. 5. Widmo gęstości mocy wiązki wyjściowej dyskryminatora dla trzech wartości przesunięcia widma siatki czujnika
Fig. 5. Power spectrum density of the discriminator output beam obtained for three values of the spectrum shift of the sensor's grating

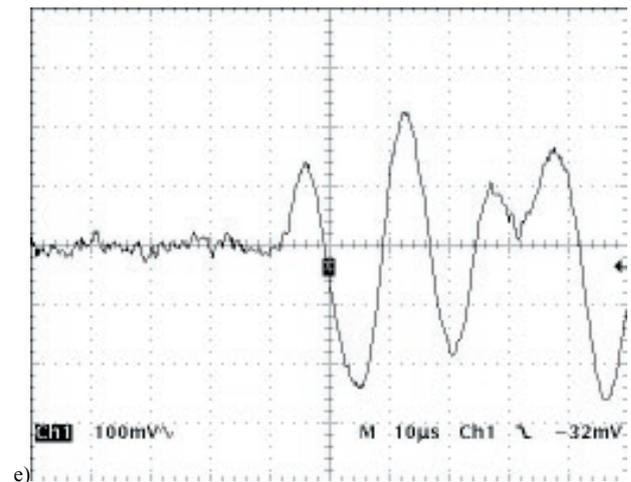
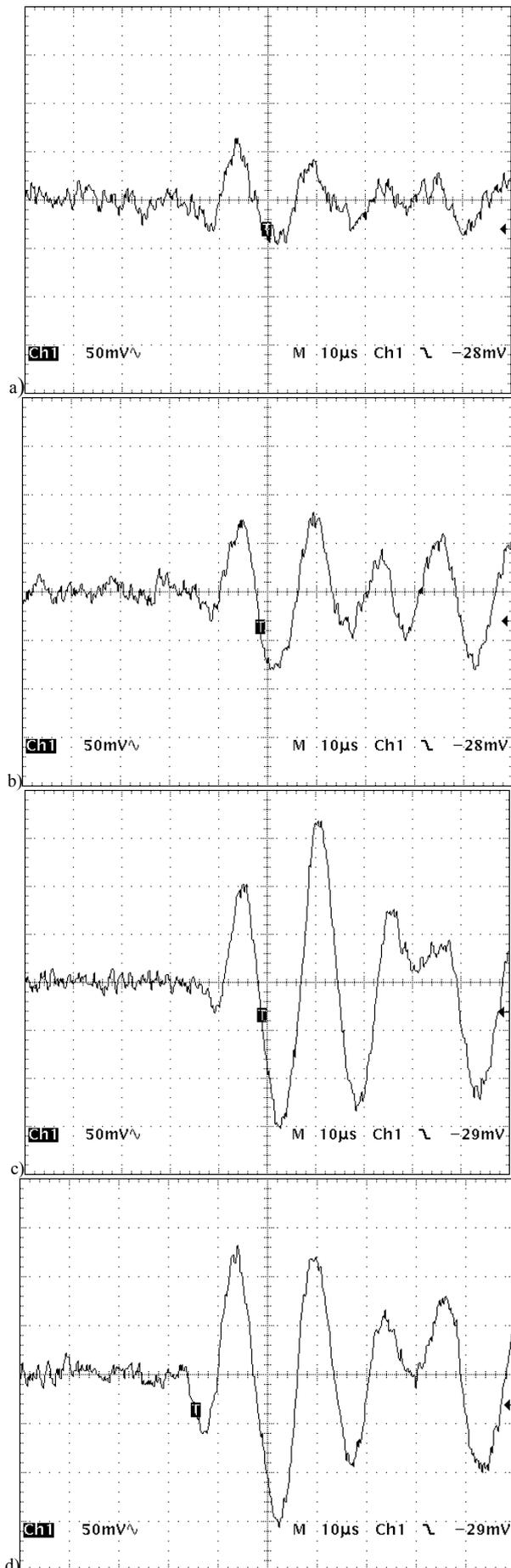
4. Pomiary

Czujnik został użyty do pomiaru ciśnień uderowych wywołanych wyładowaniem elektrycznym w wodzie. Wykorzystano w tym celu niskonapięciowe wyładowanie elektryczne, inicjowane eksplozją drutu miedzianego, uzyskane jako wynik rozładowania kondensatora olejowego o pojemności 100 μF , uprzednio naładowanego do ustalonej wartości napięcia rys. 6.



Rys. 6. Generator ciśnień impulsowych, w którym wykorzystuje się wyładowanie elektryczne w wodzie
Fig. 6. Impulsive pressure generator based on the electric discharge in water

Układ pomiarowy wzorcowano statycznie, ciśnieniem rozciągającym o wartości 3,98 MPa uzyskanym przez obciążenie siatki czujnika swobodnie zwisającym odważnikiem o masie 5 g. Przykłady zarejestrowanych przebiegów ciśnień uderowych, wywołanych rozładowaniem w wodzie kondensatora naładowanego do napięcia z zakresu 500 V do 700 V, przedstawiono na rysunku 7.



Rys.7. Przebiegi napięcia wyjściowego czujnika przy przetwarzaniu ciśnienia udarowego wywołanego wyładowaniem elektrycznym w wodzie. Początkowe napięcie kondensatora: a) 500 V, b) 550 V, c) 600 V, d) 650 V, e) 700 V.

Fig. 7. Voltage waveforms from the sensor excited by the impulsive pressure produced by the electric discharge in water. Start voltage of the capacitor: a) 500 V, b) 550 V, c) 600 V, d) 650 V, e) 700 V.

Przebiegi te zawierają wiele impulsów, z których dodatnie są impulsami naprężeń ściskających a ujemne reprezentują naprężenia rozciągające. Pierwsze impulsy naprężeń: ściskający i rozciągający są wywołane bezpośrednio wymuszeniem. Obydwa impulsy można przyjmować jako miarę działającego wymuszenia impulsowego, wiedząc że impuls rozciągający wynika z teorii propagacji fal sprężystych w stożku. Pozostałe impulsy są odbitymi impulsami od powierzchni głowicy pomiarowej. Wartość napięcia wyjściowego czujnika wywołana wzorcowym ciśnieniem 3,98 MPa wynosi 380 mV.

5. Wnioski

Rezultaty przeprowadzonych pomiarów wskazują, że proponowany czujnik może być stosowany w pomiarach ciśnień impulsowych. Jako miarę mierzonego impulsu ciśnienia można przyjmować pierwszy impuls odpowiadający naprężeniu rozciągającemu. Podstawowe zalety czujnika, to prosta budowa, szerokie pasmo przenoszenia (~ 9 MHz dla światłowodu SMF 28), częstotliwościowy sygnał wyjściowy oraz brak powstawania fal gnących, co zapewnia konstrukcja głowicy pomiarowej. Do ograniczeń czujnika należy zaliczyć jego małą czułość, co predysponuje go do zastosowań w pomiarach dużych ciśnień impulsowych. Dalsze badania prowadzone będą w kierunku zoptymalizowania samej głowicy pomiarowej oraz eliminacji wpływu zmian natężenia oświetlenia na dokładność pomiaru.

6. Literatura

- [1] Z. Kaczmarek: Pomiar i odtwarzanie przebiegów sił i ciśnień impulsowych. Wydawnictwa Politechniki Świętokrzyskiej Monografie, Studia, Rozprawy 26, Kielce, 2001.
- [2] Z. Kaczmarek: Fiber Bragg grating impulsive pressure sensor. Proc. SPIE, Optical Fibers Applications, 2005, Vol. 5952, pp 151-155.
- [3] Z. Kaczmarek: Światłowodowy czujnik ciśnień impulsowych z siatka Bragga. PAK, No. 4, 2006, ss. 24-28.
- [4] T. Kaczmarek, Z. Kaczmarek: Zmodyfikowany czujnik ciśnień impulsowych ze światłowodową siatką Bragga. Mat. X Konf. Światłowody i ich zastosowania Krasnobród 2006, ss. 566-560.
- [5] Z. Kaczmarek: Światłowodowe czujniki i przetworniki pomiarowe. Agenda Wydawnicza PAK, Warszawa, 2006
- [6] A. Othonas, K. Klli.: Fiber Bragg gratings. Fundamentals and applications in telecommunications and sensing. Artech House, Boston London, 1999.