

Metoda detekcji optycznej przeznaczona dla membranowych krzemowych czujników ciśnienia typu MEMS

Streszczenie. W pracy przedstawiono nową metodę optycznej detekcji opracowaną dla czujników ciśnienia typu MEMS. Wykonany technikami mikroinżynieryjnymi mikrosystem może być zastosowany do pomiaru ciśnienia w warunkach silnego pola elektromagnetycznego, wysokiej temperatury i silnego promieniowania jonizującego. Wstępne testy czujnika ciśnienia zintegrowanego z elementami systemu optycznej detekcji dały pozytywne wyniki.

Abstract. In paper a new optical detection method for silicon MEMS pressure sensors has been presented. Fabricated with using of the microengineering techniques microsystem is especially suitable for the pressure measurements in high temperature, high electromagnetic and high radiation environment. Preliminary testing of the pressure sensor integrated with components of the optical detection system has been successful. (**Optical detection method suitable for diaphragm silicon MEMS pressure sensors**).

Słowa kluczowe: detekcja optyczna, czujnik ciśnienia, MEMS.

Keywords: optical detection, pressure sensor, MEMS.

doi:10.12915/pe.2014.11.35

Wstęp

Krzemowe czujniki ciśnienia MEMS znalazły szerokie zastosowanie w medycynie, motoryzacji, przemyśle, sprzęcie wojskowym oraz w urządzeniach użytkowych np. smartfonach czy tabletach. Jednakże różnego typu krzemowe czujniki elektryczne (piezorezystancyjne, pojemnościowe) i czujniki optyczne (interferencyjne, odbiciowe) mają ograniczony zakres stosowania. Trudne warunki środowiskowe: wysoka temperatura, silne pole elektromagnetyczne, promieniowanie jonizujące, zagrożenie wybuchem wymagają zastosowania czujnika ciśnienia o nowej konstrukcji [1].

Czujnik ciśnienia MEMS powinien być odporny na wysoką temperaturę, iskrobezpieczny i najlepiej bezprzewodowy. W ostatnich latach prowadzone są intensywne prace nad rozwojem czujników MEMS wytwarzanych z węgla krzemu (SiC), który ma wyższą odporność termiczną w porównaniu z krzemem. Są one szczególnie użyteczne do pomiarów przyspieszenia i ciśnienia w podwyższonej temperaturze (do 500 °C) [2].

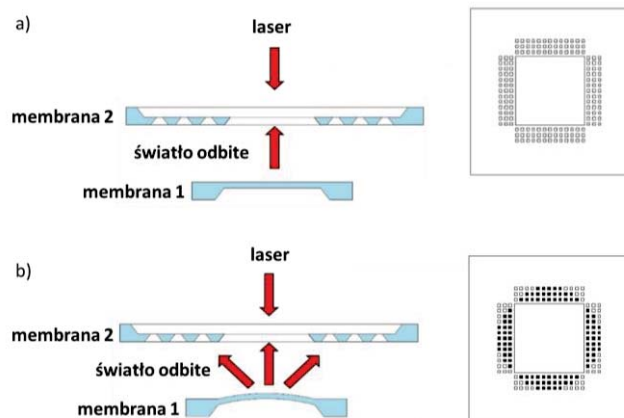
Obecnie do pomiarów przeprowadzanych w tzw. „trudnych warunkach”, na przykład w pobliżu generatorów i silników elektrycznych dużej mocy, linii elektroenergetycznych, w zbiornikach paliwa oraz w sytuacjach, gdy ze względów bezpieczeństwa lub utrudnionego dostępu konieczny jest zdalny pomiar, wykorzystywane są głównie czujniki z detekcją optyczną. Najczęściej są to czujniki światłowodowe wykorzystujące zjawisko interferencji lub dyfrakcji światła [3].

Konstrukcja i zasada działania

Prezentowany system detekcji optycznej składa się z perforowanej przesłony, laserowego źródła światła oraz detektora obrazu (rys. 1). W celu weryfikacji koncepcji systemu detekcji włączono w jego skład membranowy czujnik ciśnienia MEMS.

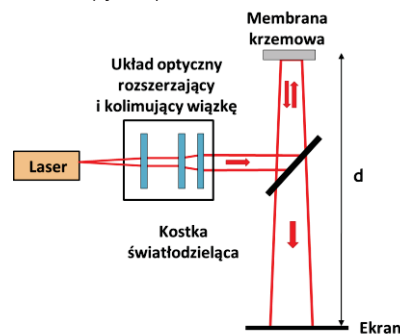
Nad powierzchnią krzemowej membrany 1 czujnika umieszczona jest krzemowa membrana 2 (perforowana przesłona), która zawiera centralny, kwadratowy otwór oraz 4 zestawy otaczających go mikrootworów. W wypadku nieodkształconej membrany czujnika, wiązka światła przechodzi przez centralny otwór przesłony i odbija się prostopadle nie powodując zaświecenia matrycy otworów (rys. 1a). Gdy pod wpływem mierzonego ciśnienia membrana 1 zostaje uwypuklona, część światła odbija się tak, że przechodzi ono przez mikrootwory. Powoduje to powstanie charakterystycznego wzoru punktów światła,

który jest obserwowany pod pewnym niedużym kątem w stosunku do kierunku padania wiązki laserowej (rys. 1b). W miarę zwiększania się odkształcenia membrany, odbite światło przechodzi przez coraz więcej mikrootworów matrycy, co zmienia kształt obserwowanego wzoru.



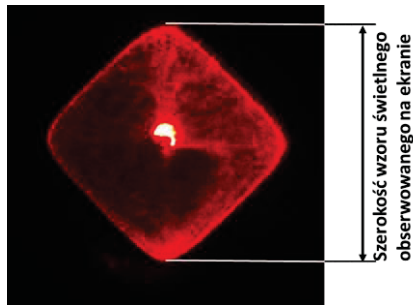
Rys. 1. Schemat układu detekcji oraz wzór punktów światła obserwowany na przesłonie (membranie 2): a) po odbiciu światła od płaskiej membrany czujnika – brak punktów światła, b) po odbiciu światła od odkształconej membrany czujnika – charakterystyczny wzór punktów światła (zaciemnione kwadraty)

W celu ustalenia wymiarów krzemowych elementów układu detekcji wykonano szereg pomiarów wielkości wzoru światła odbitego od ugiętej membrany 1, który był obserwowany na ekranie umieszczonym w odległości $d = 15\text{--}80\text{ cm}$ (rys. 2).



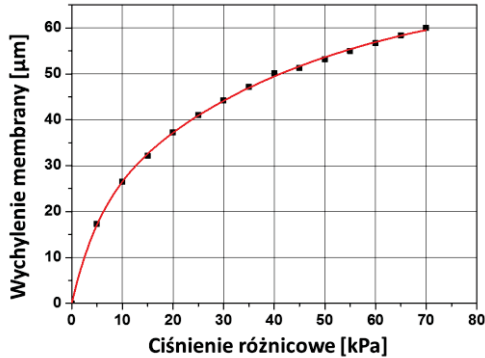
Rys. 2. Schemat układu do pomiaru szerokości wzoru obserwowanego na ekranie po odbiciu się wiązki światła od ugiętej membrany 1

Szerokość wzoru światła odbitego od membrany w funkcji ciśnienia różnicowego zmierzono dla różnych grubości i planarnych wymiarów membrany 1 (rys. 3).

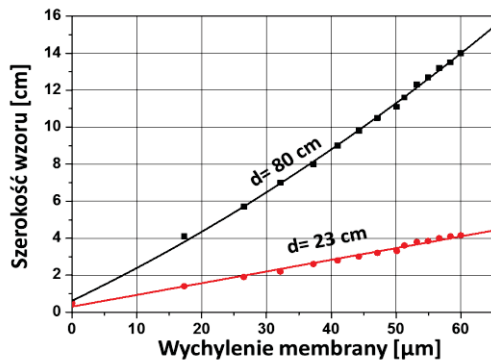


Rys. 3. Obraz światła na ekranie umieszczonym 80 cm od ugiętej membrany 1 ($p = 70$ kPa)

Wychylenie membrany w funkcji ciśnienia różnicowego (rys. 4) zmierzono za pomocą światłowodowego czujnika odbiciowego typu μ DMS-D6 firmy Philtec. Stwierdzono, że zależność szerokości wzoru światła na ekranie w funkcji wychylenia membrany jest zbliżona do liniowej (rys. 5).



Rys. 4. Zależność wychylenia membrany $5 \times 5 \times 0,025$ mm³ od ciśnienia różnicowego

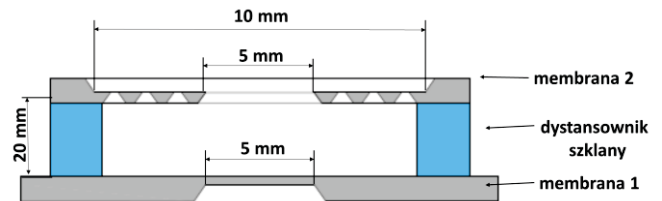


Rys. 5. Szerokość wzoru po odbiciu światła od membrany w funkcji wychylenia membrany (grubość membrany wynosi $25 \mu\text{m}$)

Na podstawie otrzymanych wyników i przeprowadzonych obliczeń dobrano odległość pomiędzy membraną 1 a membraną 2 oraz zaprojektowano matryce otworów w membranie 2.

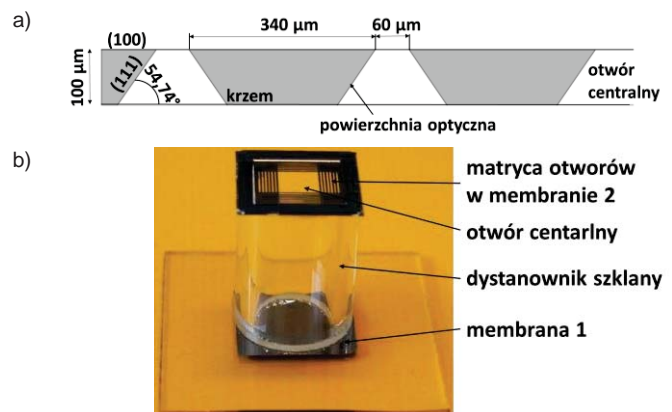
Technologia

Testowa struktura czujnika ciśnienia zintegrowanego z elementami systemu optycznej detekcji składała się z trzech części: membrany krzemowej 1 (czujnika), dystansownika szklanego i membrany krzemowej 2 (przesłony) (rys. 6) [4].



Rys. 6. Schemat budowy czujnika zintegrowanego z elementami systemu detekcji optycznej

Membrany 1 o wymiarach planarnych 5×5 mm² i grubości 20 i 30 μm , zostały wytworzone w dwustronnie polerowanym podłożu krzemowym o orientacji krystalograficznej (100) i grubości 400 μm . Uformowano je w procesie anizotropowego, głębokiego trawienia krzemu w roztworze 10 M KOH w temperaturze 80 °C, wykorzystując maskę z termicznego SiO_2 o grubości 1 μm . Dystansownik szklany wykonano z rurki ze szkła borokrzemowego o średnicy zewnętrznej 20 mm, grubości ścianki 1,8 mm i wysokości 20 mm. Membrana 2 o wymiarach $10 \times 10 \times 0,125$ mm³ została wykonana podobnie jak membrana 1. Następnie, uformowano w niej centralny, kwadratowy otwór 5×5 mm² oraz matryce kwadratowych mikrootworów o wymiarach $60 \times 60 \mu\text{m}^2$ metodą anizotropowego trawienia krzemu. Cechą charakterystyczną mikrootworów jest wynikające z właściwości monokrystalicznego krzemu ułożenie ścian bocznych pod kątem 54,74° w stosunku do lica podłoża (rys. 7a). Wszystkie części czujnika zostały połączone ze sobą metodą bondingu anodowego (450 °C, 1000 V, 3 min) (rys. 7b).

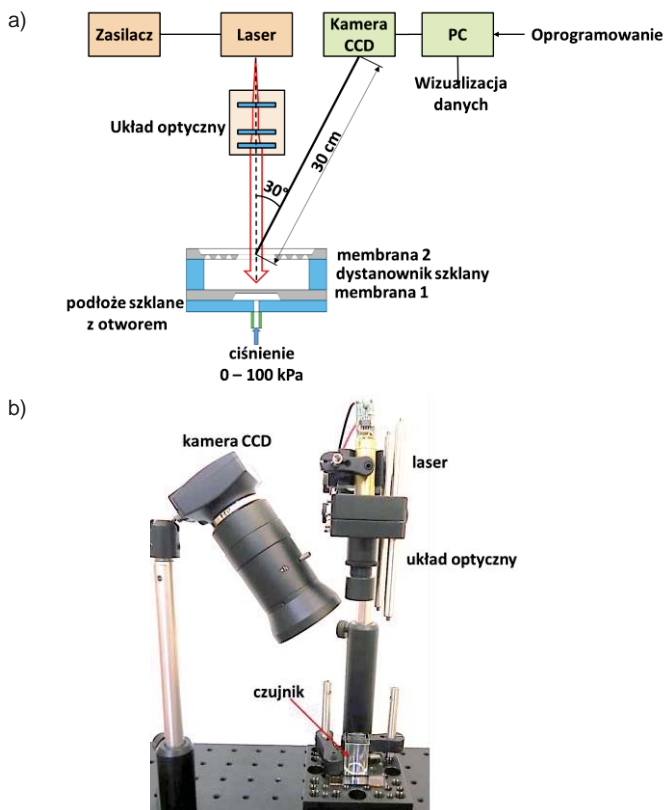


Rys. 7. Optyczny czujnik ciśnienia: a) przekrój fragmentu membrany 2, b) fotografia gotowego czujnika

Wyniki testów

W przeprowadzonych testach, jako źródło światła wykorzystywano półprzewodnikowy laser o długości fali 532 nm i mocy 5 mW, który umieszczono w odległości 25 cm od membrany 1. W celu oświetlenia całej powierzchni membrany wiązka lasera została rozszerzona i skolimowana przez układ soczewek (rys. 8a). Membrana 1 została połączona anodowo z podłożem szklanym z wykonanym wcześniej otworem, przez który doprowadzane było sprężone powietrze odkształcające membranę.

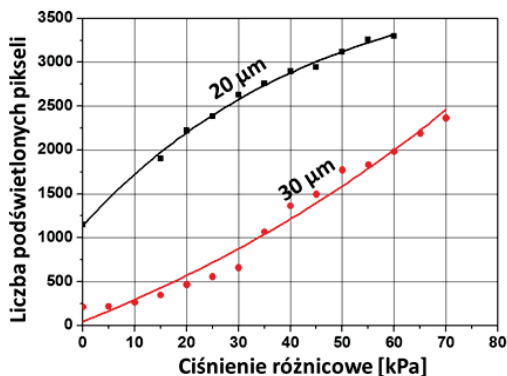
Do obserwacji wzoru na membranie 2 zastosowano kamerę CCD firmy Thorlabs (rozdzielczość 1280 x 1024 pikseli), którą umieszczono pod kątem 30° do osi optycznej układu, w odległości 30 cm od powierzchni membrany (rys. 8). Obraz zarejestrowany przez kamerę był analizowany komputerowo za pomocą specjalnego do tego celu opracowanego oprogramowania.



Rys. 8. Układ pomiarowy: a) schemat, b) fotografia

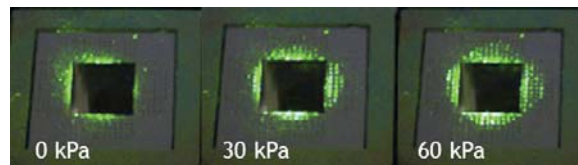
W programie na wybranym obszarze zarejestrowanego przez kamerę obrazu, zliczana była liczba pikseli powyżej zadanego progu jasności. Znając zależność wychylenia membrany od ciśnienia można było danej wartości ciśnienia przypisać liczbę podświetlanych pikseli. Na tej podstawie określano wartość ciśnienia odkształcającej membranę.

Zmierzono zależność liczby podświetlonych punktów od ciśnienia w zakresie od 0 do 70 kPa, dla membran o dwóch grubościach (rys. 9 i 10).



Rys.9. Liczba podświetlonych pikseli w funkcji ciśnienia dla matrycy otworów membrany 2; grubość membrany 1: 20 i 30 μm

Zgodnie z przewidywaniami dla membrany grubszej obserwuje się mniejszą ilość podświetlanych pikseli niż dla membrany cieńszej. Na podstawie kilkakrotnie przeprowadzonych pomiarów stwierdzono, że powtarzalność otrzymywanych wyników jest zadawalająca.



Rys. 10. Obrazy wzoru punktów świetlnych obserwowanych na membranie 2 o grubości 20 μm dla 3 wartości mierzonego ciśnienia

Podsumowanie

W pracy zaprezentowano nową metodę optycznej detekcji opracowaną dla krzemowego, membranowego czujnika ciśnienia MEMS. Opisano konstrukcję i technologię krzemowo-szklanych elementów systemu detekcji, który zapewnia możliwość zdalnego odczytu mierzonego ciśnienia. Pomiar odbywa się w czasie rzeczywistym, bez konieczności stosowania specjalistycznych przyrządów pomiarowych. Odczyt ciśnienia może być zrealizowany przez zewnętrznego obserwatora bezpośrednio lub za pomocą ekranu, a także z wykorzystaniem dostępnej komercyjnie kamery CCD. Zakres pracy czujnika może być dostosowywany do potrzeb przez odpowiedni dobór wymiarów membrany 1 i 2. Ponieważ urządzenia elektroniczne takie jak laser czy kamera mogą znajdować się w znacznej odległości od czujnika MEMS, może on pracować w „trudnych” warunkach tzn. tam, gdzie niemożliwe jest zastosowanie standardowych rozwiązań. Prezentowany mikrosystem może być zastosowany do pomiaru ciśnienia w warunkach wysokiej temperatury (np. 450°C) lub w środowisku, gdzie występuje silne promieniowanie jonizujące

Planowane są dalsze prace, w ramach których zbadane zostaną czynniki, które mogą wpływać na symetrię i kontrast obserwowanego wzoru świetlnego. Zostaną także określone parametry czujnika zintegrowanego z zaproponowanym optycznym systemem detekcji, takie jak czułość, dokładność i maksymalny zasięg pracy.

Podziękowania

Autorzy dziękują studentowi Politechniki Lwowskiej Danylo Lizanetsa za pomoc w opracowaniu oprogramowania do analizy obrazu z kamery CCD (7program ramowy „EDUMEMS”).

Prace były finansowane z funduszu badań statutowych Politechniki Wrocławskiej

LITERATURA

- [1] G. Fragiaco, K. Reck, L. Lorenzen, E. V. Thomsen, “Novel Designs for Application Specific MEMS Pressure Sensors”, Sensors 10 (2010) 9541-9563.
- [2] N. G. Wright, A. B. Horsfall, “SiC sensors: a review”, J. Phys. D: Appl. Phys. 40 (2007) 6345-6354.
- [3] E. Pinet, “Pressure measurement with fiber-optic sensors: commercial technologies and applications”, 21st International Conference on Optical Fiber Sensors, Proc. of SPIE Vol. 7753, 2011, 1-4.
- [4] J. Dziuban, K. Sareło, “Układ i sposób pomiaru obiektów odbijających światło, zwłaszcza detektorów promieniowania jonizującego”, zgłoszenie patentowe PL405836, 2013.

Autorzy: mgr. inż. Katarzyna Sareło, dr hab. inż. Anna Górecka-Drzazga, prof. dr hab. inż. Jan Dziuban Politechnika Wroclawska, Wydział Elektroniki Mikrosystemów i Fotoniki, Zakład Mikroinżynierii i Fotowoltaiki, ul. Janiszewskiego 11/17, 50-372 Wrocław, E-mail: katarzyna.sarelo@pwr.edu.pl; anna.gorecka-drzazga@pwr.edu.pl; jan.dziuban@pwr.edu.pl