

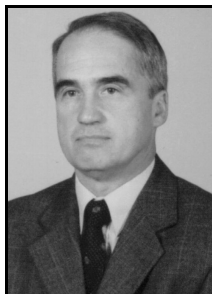
**Jacek GOŁĘBIOWSKI**

POLITECHNIKA ŁÓDZKA, INSTYTUT ELEKTROTECHNIKI TEORETYCZNEJ, METROLOGII I MATERIAŁOZNAWSTWA

## System do pomiaru ugięcia belek krzemowych stosowanych w mikroczujnikach

Dr hab. inż. Jacek GOŁĘBIOWSKI

Autor i współautor 96 publikacji, 5 skryptów, 1 rozdz. w książce, twórca i współtwórca 7 patentów i 2 zgłoszeń. Działalność naukowa związana jest z: badaniami, modelowaniem i projektowaniem systemów pomiarowych, aparatury oraz czujników (w szczególności czujników krzemowych, światłowodowych), a także aplikacjami systemów pomiarowych w sieciach komputerowych, cyfrowego przetwarzania sygnałów.



e-mail: jacekgol@p.lodz.pl

### Streszczenie

W pracy przedstawiono system do pomiaru ugięcia mikrobelki krzemowej. System składa się z części optycznej oraz sterownika i komputera. Omówiono zasadę działania systemu oraz przeanalizowano dobór parametrów układu do pomiaru niewielkich ugięć rzędu mikrometrów. Przedstawiono oprogramowanie pozwalające na wizualizację aktualnego położenia belki. Zamieszczono wyniki badań oraz określono przydatność systemu do pomiaru niewielkich ugięć.

**Słowa kluczowe:** mikro-belki krzemowe, przetworniki optoelektroniczne.

## System for the silicon beam deflection measurements in microsensors

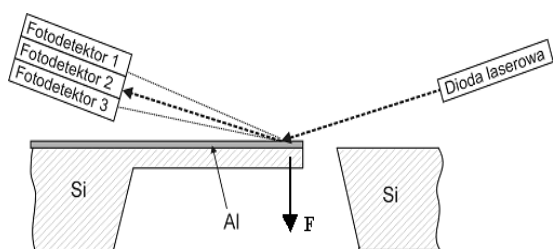
### Abstract

The system for the measurement of silicon microbeam deflection is presented. It consists of an optical part, a controller and a computer. The principle of the system in operation and the parameter selection for the measurements of the small (micrometers) deflections are described and analysed. The program which allows visualizing the current beam location is also presented. The results show the system usefulness for the micrometer deflection measurements.

**Keywords:** silicon microbeam, optoelectronic transducers.

## 1. Wstęp

W wielu produkowanych obecnie miniaturowych czujnikach i aktuatorach wykorzystuje się struktury krzemowe, w szczególności z mikrobelkami. Projektowanie i badanie tych miniaturowych urządzeń wymaga często pomiaru niewielkich przemieszczeń, rzędu mikrometrów np. położenia ruchomych mikrobelki, membran w czujnikach i aktuatorach.



Rys. 1. Zasada działania optycznego układu pomiarowego  
Si - struktura krzemowa, Al - warstwa aluminiowa (z zwierciadło),  
F - siła działająca na belkę  
Fig. 1. The operating principle of the optical measuring system  
Si - silicon structure, Al - aluminum layer (mirror),  
F - the force which attracts the beam

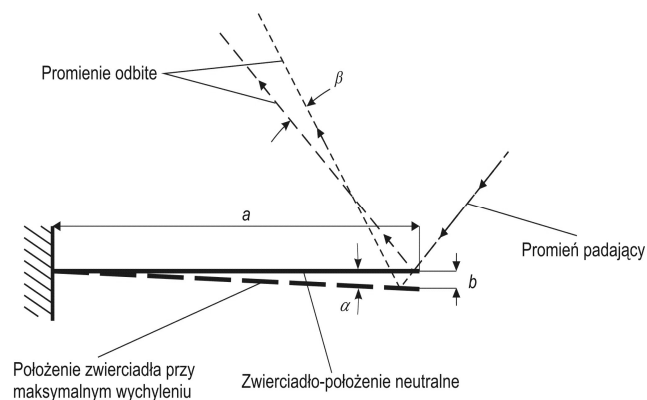
Ze względu na małe rozmiary, kruchość struktur oraz ograniczenie wpływu narzędzi pomiarowych na badaną strukturę nie

stosuje się metod stykowych. Doskonałym rozwiązaniem jest zastosowanie optycznych metod pomiarowych [1, 2], w szczególności wykorzystujących przetworniki optoelektroniczne [3]. Pozwala to na całkowite odseparowanie systemu pomiarowego od badanego układu. Na rysunku 1 pokazano zasadę działania układu optycznego, który może być zastosowany do pomiaru niewielkich ugięć. Strumień świetlny emitowany jest przez diodę laserową z kolimatorem lub laser zapewniający spójną wiązkę oświetla ruchome zwierciadło (ruchoma belka z warstwą aluminiową) [4]. Strumień światła po odbiciu od zwierciadła trafia do fotodetektora. Przetwornik optyczny w postaci linijki światłoczułej pozwala określić położenie promienia świetlnego w danej płaszczyźnie [5, 6].

## 2. System Pomiarowy

### 2.1. Układ optyczny

Głównym elementem systemu pomiarowego jest układ optyczny z przetwornikiem optoelektronicznym. Podstawowe parametry przetwornika to: liczba pikseli, aktywna długość obszaru światłoczułego, rozdzielczość, zakres widma użytkowego. Na rysunku 2 pokazano uproszczony przebieg strumienia świetlnego, przy założeniu niewielkich ugięć belki oraz, że belka jest sztywna i jest zamocowana przegubowo w punkcie podparcia. System pomiarowy został zaprojektowany do badania statycznych ugięć belki o długości  $a=1$  mm i zakresie zmian ugięcia jej końca  $b=\pm 0,01$  mm (maksymalny kąt  $\alpha$  wynosi  $0,573^\circ$ ).



Rys. 2. Analiza graficzna zmiany kąta odbicia strumienia świetlnego  
Fig. 2. The graphical analysis of the optical flux reflection angle

Zmiana położenia promienia odbitego przy ugiętej belce o kąt  $\alpha$ , odpowiada kątowi  $\beta=2\alpha$ . Dla wybranego przetwornika można obliczyć odległość w jakiej należy go umieścić, żeby wykorzystać jego aktywną długość optyczną przy założonej rozdzielczości pomiaru ugięcia większej od  $0,1 \mu\text{m}$ .

Dostępnych jest wiele rodzajów sensorów o różnych rozdzielczościach i liczbie pikseli. Występuje pomiędzy nimi znaczna rozbieżność cenowa zależna głównie od technologii wytwarzania rozdzielczości i szybkości przetwarzania. Stawiane wymagania przy stosunkowo niskich kosztach spełnia przetwornik firmy Hamamatsu (S9226) [7], produkowany w technologii CMOS [8]. Podstawowe parametry tego przetwornika: liczba pikseli - 1024, rozdzielczość -  $7,8 \mu\text{m}$ , długość obszaru światłoczułego -  $7,9872$  mm, zakres widma optycznego  $400 - 1000$  nm. Dla tego przetwornika przyjęto, że jest on umieszczony w odległości  $150$  mm od powierzchni lustra, co dla maksymalnego ugięcia belki  $b=0,01$  mm odpowiada zmianom położenia strumienia na powierzchni prze-

twornika o ok. 3 mm. Zakładając możliwość pomiaru w zakresie  $\pm 0,01$  mm oraz możliwość regulacji ustawienia przetwornika w granicach  $\pm 1$  mm, to cały obszar optyczny przetwornika zostanie wykorzystany.

Długość 3 mm na powierzchni przetwornika odpowiada liczbie ok. 384 pikselom (maksymalne ugięcie belki 10  $\mu\text{m}$ ). Rozdzielczość pomiaru ugięcia odpowiadająca jednemu pikselowi wynosi ok. 0,03  $\mu\text{m}$ , jest to wynik lepszy od zakładanego (0,1  $\mu\text{m}$ ).

Do uruchomienia przetwornika optoelektronicznego wymagane jest dostarczenie dwóch sygnałów sterujących – sygnału startowego Start oraz sygnału zegarowego CLK. Dodatkowy sygnał  $V_g$  umożliwia regulację poziomu wyjściowego sygnału Video.

W procesie odczytywania danych generowane są trzy sygnały – Video, Trig oraz EOS. Sygnał Video jest sygnałem analogowym generowanym w postaci ciągu (1024) impulsów odpowiadającym kolejnym pikselom fotodetektora. Impuls Trig jest generowany każdorazowo (w czasie trwania kolejnych impulsów Video) w chwili czasowej odpowiedniej do wykonania pomiaru natężenia oświetlenia danego piksela. Sygnał EOS jest generowany przez detektor po zakończeniu całego cyklu (1024 impulsów sygnału Video).

## 2.2. Oprogramowanie procesora

W analizowanym systemie pomiarowym przetwornik optoelektroniczny sterowany jest za pomocą mikrokontrolera współpracującego z komputerem PC. Zadaniem mikroprocesora jest generowanie sygnałów sterujących potrzebnych do pracy przetwornika optycznego, pobieranie danych pomiarowych z przetwornika oraz przetwarzanie ich z postaci analogowej na cyfrową i wysyłanie do komputera PC.

Procesor Atmega32 firmy Atmel [9] wyposażony jest w trzy ośmiobitowe, dwukierunkowe porty komunikacyjne. Do komunikacji z czujnikiem wykorzystuje się dwa dwukierunkowe porty A i C. Sygnały sterujące pracą czujnika optycznego generowane są na wyjściu portu C, zaś sygnały odbierane z czujnika doprowadzone są do portu A. Port A pracuje w trybie wejścia analogowego dla konwertera A/C. Sygnał Video jest przetwarzany przez zintegrowany przetwornik A/C z rozdzielczością dziesięciobitową. Port B wykorzystywany jest do połączenia z programatorem. Połączenie z komputerem poprzez interfejs RS232 zostało zrealizowane za pomocą portu D.

Podstawowe procedury wykonywane przed uruchomieniem głównego programu :

- Konfiguracja portu szeregowego RS232. Uaktywniane są nadajnik i odbiornik oraz przerwanie odbiornika. Ustawiane są parametry transmisji: prędkość transmisji (19200Kb/s), ośmiobitowa transmisja asynchroniczna, brak bitów parzystości, jeden bit stopu.
- Konfiguracja parametrów przetwornika A/C: ustawienie źródła napięcia odniesienia (AVCC), ustawienie sposobu zapisania wyniku z przesunięciem ośmiu starszych bitów do rejestru ADCH, wybranie kanału ADC1 jako wejścia sygnału przetwornika, ustawienie opcji auto-wyzwalania oraz ustawienie częstotliwości taktowania przetwornika.
- Ustawienie parametrów portu A oraz portu C, włączenie przerwań, uaktywnienie wejścia przerwań zewnętrznych INT0.

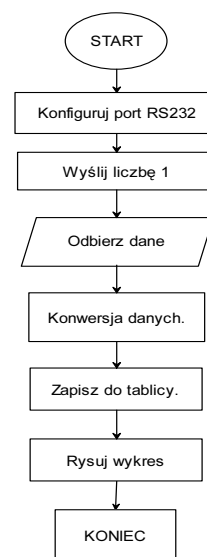
Po skonfigurowaniu realizowany jest proces odpowiadający za wykonanie pomiaru. Program uruchamiany jest sygnałem zewnętrznym wysylnym z komputera. Następnie generowana jest sekwencja sygnałów CLK i Start. Pętla generująca te sygnały wykonywana jest 8214 razy, co odpowiada sekwencji 4107 impulsów zegarowych wysyłanych do przetwornika. Taka sekwencja jest wymagana przez przetwornik, aby odebrać wszystkie 1024 próbki danych. Pojawienie się sygnału EOS oznacza koniec transmisji sygnałów Video. Odbierane dane są przetwarzane na postać cyfrową i przesyłane do komputera PC. W wielu przypadkach dziesięciobitowa dokładność pomiaru nie jest wymagana. Poziom szumu na wyjściu Video może osiągać nawet 5% maksymalnej wartości sygnału odbieranego. W celu uzyskania szybszej

transmisji dane są przesyłane przez mikroprocesor do komputera są w postaci ośmiobitowej (usuwane są dwa najmłodsze bity).

## 2.3. Oprogramowanie komputera PC

Komputer odbiera dane z mikroprocesora i przetwarza je na postać graficzną. Wynik pomiaru przedstawiony jest w postaci wykresu natężenia strumienia światła padającego na przetwornik dla kolejnych pikseli przetwornika.

Oprogramowanie komputera zostało napisane w środowisku LabView. Schemat blokowy programu pokazano na rysunku 3. Po uruchomieniu, program inicjalizuje port RS232. Ustawiane są parametry portu takie jak w przypadku procesora (ośmiobitowa transmisja danych, prędkość transmisji - 19200kb/s, jeden bit stopu, brak sprawdzania parzystości). Następnie do układu mikroprocesorowego program wysyła liczbę jeden i oczekuje na dane pomiarowe. Program odbiera ciąg danych pomiarowych (1024) i przekształca je z formatu heksadecymalnego na postać dziesiętną jednocześnie przeliczając na zakres 0..5V.



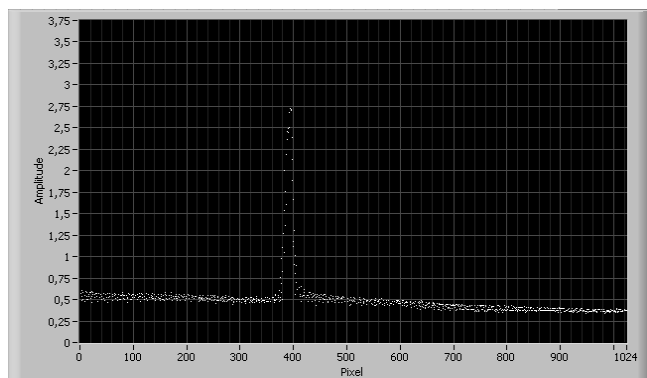
Rys. 3. Schemat blokowy programu komputerowego  
Fig. 3. The block scheme of the computer program

Tak przetworzone dane zapisywane są w tablicy i następnie wyświetlane w postaci wykresu zależności napięcia (odpowiadającego natężeniu światła padającego na dany piksel sensora przetwornika) od numeru danego piksela przetwornika.

## 3. Wyniki badań

Badanie działania opisanego systemu polegało na przeprowadzeniu pomiarów położenia strumienia świetlnego dla określonego ugięcia belki. Ze względu na bardzo małe wartości mierzonych ugięć  $\pm 10$   $\mu\text{m}$  oraz brak dokładnych przyrządów do weryfikacji pomiarów przeprowadzono pomiary na modelu w skali 10 razy większym. Do badań wykorzystano cienką sprężystą folię, z której wykonano belkę o długości 10 mm. Wymuszono ugięcia w zakresie  $\pm 100$   $\mu\text{m}$ . Dla takich parametrów belki zmiany kąta  $\beta$  były takie same jak dla założonych danych. Wyniki pomiarów przedstawiano jako zależność amplitudy sygnału odebranego z przetwornika optycznego (V) od położenia strumienia światła na przetworniku (numer danego piksela). Jako wynik pomiaru położenia strumienia światła przyjęto położenie punktu charakterystyki o największej amplitudzie. Końcowy wynik pomiaru był uśredniany dla serii 100 pomiarów. Przykładową charakterystykę otrzymaną dla położenia odpowiadającego 390 pikselowi pokazano na rysunku 4. Widać wyraźnie pojawiające się szumy wynika-

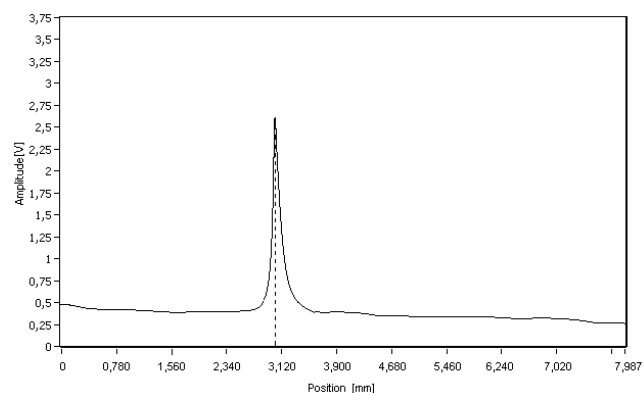
jące z dużej czułości przetwornika (ślady strumienia rozproszenia, przypadkowe odbicia strumienia głównego).



Rys. 4. Wyjściowa charakterystyka pomiarowa - położenie strumienia światła odpowiadające 390 pikselowi [10]

Fig. 4. The output characteristics – the optical flux representing 390 pixels

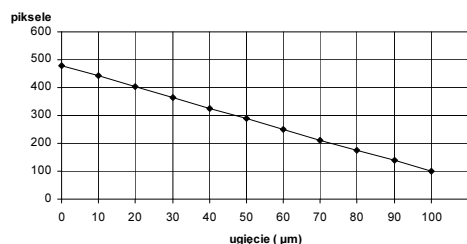
W celu lepszej wizualizacji wyników pomiarów oraz eliminacji szumów charakterystyki wyjściowe zostały poddane filtracji i aproksymacji. Tak przetworzoną charakterystykę z rysunku 4 pokazano na rysunku 5.



Rys. 5. Aproksymowana charakterystyka pomiarowa - położenie strumienia światła dla 390 pikseli [10]

Fig. 5. Approximated measuring characteristics – the optical flux location for 390 pixels

Do weryfikacji metody optycznej dla modelu w skali 10:1 zastosowano miernik przesunięcia typu TT20 z czujnikiem indukcyjnym typu GT22 sterowanym pneumatycznie. Maksymalny błąd pomiaru (przrzędu pomiarowego z sondą) dla zakresu  $1\div 100\mu\text{m}$ , wynosił  $\delta_p=5\%$  przy rozdzielczości dla tego zakresu  $1\mu\text{m}$ . Na rysunku 6 pokazano charakterystykę doświadczalną otrzymaną dla badanego modelu.



Rys. 6. Charakterystyka zmiany oświetlenia przetwornika w funkcji ugięcia modelu belki  
Fig. 6. The transducer characteristics: the dependence of transducer illumination on the model beam deflection

## 4. Wnioski

Przedstawiono system do pomiaru ugięcia belki krzemowej w zakresie niewielkich przemieszczeń rzędu kilkunastu-kilkudziesięciu mikrometrów. System pomiarowy składa się z układu optycznego, układu mikroprocesorowego oraz komputera PC. Układ procesorowy steruje pracą przetwornika, przetwarza sygnał analogowy na postać cyfrową oraz zapewnia komunikację z komputerem. Oprogramowanie komputera umożliwia zbieranie danych pomiarowych i ich obróbkę oraz wizualizację wyników pomiarowych.

Badania eksperymentalne przeprowadzono na modelu w skali 10:1. Przed rozpoczęciem procesu pomiarowego wykonywano procedurę „zerowania” układu mechanicznego tzn. wyznaczano położenie neutralne odpowiadające zerowemu ugięciu. Korekcja przeprowadzana była za pomocą oprogramowania. Program umożliwia również kalibrację przeprowadzaną dla maksymalnego ugięcia. Z analizy błędów uwzględniających parametry układu optycznego, przetwornika optoelektronicznego i systemu przetwarzania wynika, że błąd graniczny powinien być mniejszy od 1% co dla potrzeb badań modelowych jest wystarczające. Dla serii 100 pomiarów wyznaczona maksymalna wartość odchylenia standardowego nie przekraczała 0,5%. Powtarzalność wyników w danej serii można uznać za dobrą, natomiast wyniki pomiarów uzyskane z pominięciem procedury „zerowania” i kalibracji wykazywały znaczne rozrzuty pomiędzy seriami pomiarów. Na dokładność całego systemu duży wpływ ma stabilność parametrów układu optycznego, przede wszystkim odległość przetwornika od badanej belki oraz warunki otoczenia takie jak wpływ oświetlenia, temperatury.

Zaprojektowany system znalazł zastosowanie w laboratorium krzemowych sensorów w szczególności do pomiarów ugięć belek krzemowych w czujnikach pola magnetycznego z przetwornikami elektromagnetycznymi.

## 5. Literatura

- [1] Prohuń T., Rybak M., Gołębiowski J.: Zastosowanie metody przetwarzania obrazu do pomiaru grubości membran krzemowych mikroczujników, Mater. XIII Konfer. SIS Sieci i Systemy Informatyczne, Łódź, str.509-516, 2005
- [2] Gołębiowski J., Prohuń T., Rybak M.: Pomiar grubości membran krzemowych stosowanych w mikroczujnikach, Elektronika, nr. 1, str. 53-56, 2006
- [3] Lopez-Higuera J.M.: Fibre sensing technology, Wiley, West Sussex, 2002
- [4] Coldren L.A., Corzine S.W.: Diode lasers and photonic integrated circuits, Wiley, New York, 1995
- [5] Donati S.: Photodetectors – devices, circuits and applications, Prentice Hall Inc. 2000
- [6] Zhong Z.W., Zhao L.P., Lin H.H.: Development and investigation of an optical tilt sensor, Optic Communications, vol.261, issue 1, pp. 23-28, 2006
- [7] <http://www.hamamatsu.com>.
- [8] Hosticka B.J.: CMOS sensor systems, Sensors and Actuators A, vol.66, issue 1-3, pp.335-341, 1998
- [9] <http://www.atmel.com>
- [10] Alabrudziński W.: Mikroprocesorowy system pomiarowy z optycznym czujnikiem do pomiaru położenia strumienia świetlnego, praca dyplomowa, PŁ, 2007.