

Tomasz BOJKO

AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA, WYDZIAŁ INŻYNIERII MECHANICZNEJ I ROBOTYKI, KATEDRA ROBOTYKI I DYNAMIKI MASZYN

Wybrane zastosowania układów MEMS w pomiarach wielkości mechanicznych

Dr inż. Tomasz Bojko

Jest adiunktem w Katedrze Robotyki i Dynamiki Maszyn AGH. Jego zainteresowania dotyczą mechatroniki, robotyki i automatyki. Jest autorem prac dotyczących robotyki medycznej, układów napędowych robotów oraz zastosowaniu nowoczesnych metod do szybkiego prototypowania układów automatyki.

bojko@uci.agh.edu.pl



Streszczenie

W artykule przedstawiono wybrane zastosowania dostępnych układów MEMS (Micro-Electro-Mechanical-Systems) do pomiarów wielkości mechanicznych. W artykule opisano podstawy, podstawowe technologie oraz aktualny stan wykorzystania układów MEMS. Jako przykład zastosowania układów MEMS opisano system do pomiarów przyspieszeń wyposażony w interfejs sieci CAN.

Abstract

In this paper applications of available MEMS microchip for mechanical values measurement are presented. Brief introduction to MEMS technology, basic MEMS manufacturing processes and application of MEMS structures in measurements are described. As an example of application of the MEMS an accelerometer equipped with CAN bus is presented.

1. WSTĘP

Krzem i zbudowane dzięki niemu układy mikroelektroniczne zrewolucjonizowały nasze życie oraz zmieniły świat. Wydawać by się mogło, że jego zastosowanie jest już w pełni określone i tylko od postępującemu zagęszczaniu ilości elementów na milimetrze kwadratowym struktury krzemowej zależeć będzie jego dalszy wkład w rozwój techniki i świata.

Z punktu widzenia mechanika - krzem to doskonałe właściwości mechaniczne tego pierwiastka, które przedstawiono w tabeli 1 w porównaniu ze stalą i aluminium.

	krzem	stal	aluminium
Ściskanie GPa	7	2.1	0.17
Twardość kg/mm ²	850	660	130
Moduł Younga 100GPa	1.9	2	0.7
Gęstość g/cm ³	2.3	7.9	2.7
Przewodność cieplna W/cm*K	1.57	0.32	2.36
rozszerzalność ppm/K	2.33	17.3	25

TABELA 1. Właściwości krzemu, stali i aluminium

Porównując właściwości krzemu i stali można łatwo spostrzec, że posiada on lepsze właściwości wytrzymałościowe, niższą gęstość oraz mniejszą przewodność cieplną. Stanowi, zatem wspaniały materiał do wytwarzania mikrostruktur nie tylko z zastosowaniem do układów scalonych, ale również mikro struktur o charakterze mechanicznym.

Dzięki rozwijanej od lat 70-tych technologii możliwe jest wytwarzanie na jednym kawałku krzemu systemów integrujących dwie wymienione funkcje krzemu. Takie struktury okre-

ślane są jako - Micro-Electro-Mechanical-Systems - w skrócie MEMS.

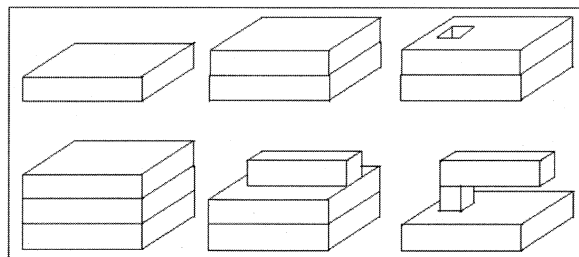
Technologia wykorzystująca krzem jako materiał do budowy zaawansowanych układów mechatronicznych wykorzystuje nie tylko elektryczne właściwości krzemu, ale również jego bardzo dobre własności mechaniczne. Technologia układów MEMS w pełni integruje dwie z głównych dziedzin mechatroniki - mechanikę oraz elektronikę.

Dzięki ponad dwudziestoletniemu okresowi badań technologia ta przechodzi z etapu badań laboratoryjnych do produkcji układów w skali masowej. Spowodowane jest to opanowaniem technologii wytwarzania układów MEMS na szeroką skalę oraz pojawieniem się na rynku odbiorców tej technologii stosujących ją w takich produktach jak: pamięci masowe, telefonia komórkowa, osprzęt dla przemysłu motoryzacyjnego, sieci optyczne, urządzenia do badań biomedycznych [5],[7].

2. TECHNOLOGIA WYTWARZANIA UKŁADÓW MEMS

Technologia wytwarzania układów MEMS różni się w zależności od zastosowania, które może dotyczyć czujników, napędów, komponentów RF, układów optycznych czy układów związanych z przepływami cieczy. Najbardziej klasyczną metodą wytwarzania układów MEMS jest metoda wytwarzania elementów z poruszającymi się elementami krzemowymi, które mają zastosowanie do budowy akcelerometrów, żyroskopów i miniaturowych układów napędowych. Na rysunku 1 pokazano schematycznie proces wytwórczy krzemowej mikro-belki mającej zastosowanie do budowy akcelerometrów i innych przetworników pomiarowych [4] oraz układów napędowych.

W pierwszym etapie na podłożu krzemowym (I) nakładana jest warstwa tlenku krzemu (II), w której za pomocą standardowych metod znanych z procesów wytwarzania układów CMOS wytrawiane są obszary będące w przyszłości podporami wytwarzanych mikrostruktur (III). Warstwa ta na dalszym etapie procesu zostanie wytrawiona. Następnie nakłada się kolejną warstwę krzemu (IV), która również zostaje wytrawiona w celu nadania wymiarów wytwarzanej mikro-belce (V). Ostatnim etapem produkcji struktury jest wytrawienie warstwy tlenku (VI). Etap ten kończy proces przygotowania mikro-struktury części mechanicznej układu MEMS w prezentowanej metodzie.

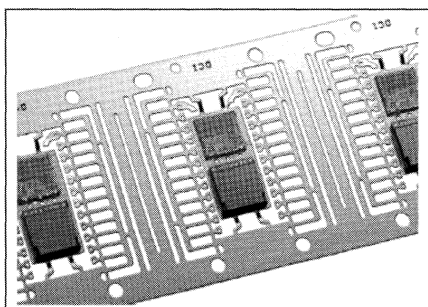


Rys. 1. Technologia wytwarzania układów MEMS

W większości przypadków część elektroniczna MEMS wytwarzana jest obecnie w standardowym procesie wytwarzania układów scalonych. Takie rozdzielanie produkcji podyktowane jest względami ekonomicznymi oraz technicznymi, ponieważ aby gotowy układ mógł trafić do klienta końcowego musi być 'zapakowany' w obudowę ze standardowym rozkładem wyprowadzeń. Mikrostruktura mechaniczna układu MEMS nie nada-

je się tworzy w procesie wtryskowym z uwagi na konieczność zapewnienia wolnej przestrzeni do poruszania się wytworzonych mikrostruktur. Rozwiązaniem tego problemu jest wytworzenie 'przeciw-struktury', która przyklejana jest następnie na wierzchnią warstwę głównego mikroukładu. Podczas sklejania obu warstw stosowane są atmosfery ochronne w celu zabezpieczenia przed wpływem wilgoci mogącej zniszczyć mikrostrukturę oraz umożliwiającą jego długotrwałą pracę ze stabilnymi parametrami. Ciekawą właściwością takich układów jest to, że mierząc charakterystykę częstotliwościową wytworzonej mikrostruktury ocenić można gęstość zastosowanego do zabezpieczenia gazu, sprawdzając poprawność procesu.

Zabezpieczoną mikrostrukturę można następnie połączyć w jednym układzie z przygotowaną mikroelektroniką i zabezpieczyć w procesie wtryskowym. Na rysunku 2 pokazano gotowy układ przed procesem zabezpieczenia tworzywem sztucznym.

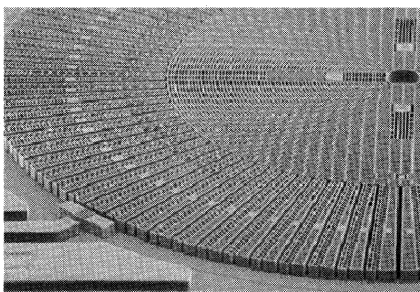


Rys. 2. MEMS przed procesem wtryskowym

Problematyka dotycząca wytwarzania 'opakowań' układów MEMS jest ciągle badana i rozwijana. Dotyczy to głównie układów napędowych, w których konieczna jest połączenie obciążenia zewnętrznego do mikronapędu, przy zachowaniu wszelkich zabezpieczeń przed zniszczeniem mikrostruktury MEMS.

3. WYBRANE ZASTOSOWANIA UKŁADÓW MEMS W UKŁADACH MECHANICZNYCH

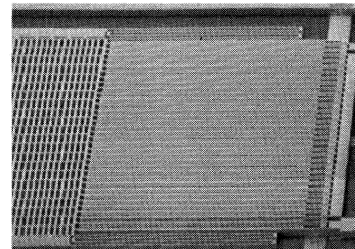
Jednym z głównych obszarów zastosowań układów MEMS jest wytwarzanie mikronapędów, które mogą być stosowane np. w nanorobotyce lub badaniach biomedycznych, napędach przyrządów optycznych [6]. Literatura szeroko opisuje takie układy, stosowane w warunkach laboratoryjnych. Współczesne praktyczne zastosowanie takich mikronapędów dotyczy elektrostatycznych mikrosilników służących do pozycjonowania głowic dysków komputerowych oraz przełączników optycznych. Prototyp silnika do pozycjonowania głowicy dysku pokazano na rysunku 3 [2].



Rys. 3. Mikrosilnik elektrostatyczny do dokładnego pozycjonowania głowicy pamięci masowej

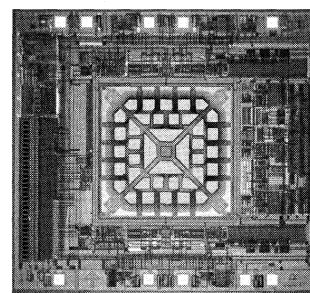
Istotną rolę od szeregu lat spełniają układy MEMS w pomiarach wielkości mechanicznych, gdzie największe zastosowania mają - akcelerometry i ostatnio układy żyroskopowe. Największym odbiorcą tych układów jest przemysł samochodowy, gdzie stoso-

wane są jako akcelerometryczne czujniki poduszek powietrznych oraz czujniki przemieszczeń, w coraz bardziej wyrafinowanych układach wspomagających kierowcę jak np. układy ESP. Na rysunku 4 pokazano mikrostrukturę liniowego czujnika akcelerometrycznego.



Rys. 4. Mikrostruktura akcelerometru liniowego MEMS

Standardowa struktura układu MEMS posiada jak wspomniano, części ruchome, które mogą ulec zniszczeniu np. przy przecięciu układu na wskutek silnego uderzenia. Istnieją konstrukcje, które pozbawione są tej wady. Firma MEMSIC [3] oferuje w komercyjnej sprzedaży akcelerometry pracujące na zasadzie pomiaru zmiany rezystancji mostka pomiarowego wywołanej przez ruch ograniczonego nad mostkiem gazu. Opisany układ jest jednym z przykładów na pełną integrację układu pomiarowego elektronicznego w jednej strukturze krzemu. Widok struktury czujnika przedstawiono na rysunku 5.



Rys. 5. Struktura dwuosiowego akcelerometru z wykorzystaniem pomiaru przepływu gazu przez mostek rezystancyjny.

Firma Analog Devices [1] od początku 2003 roku oferuje zintegrowany w jednym układzie żyroskop ADXR150. Układ posiada wbudowaną zaawansowaną strukturę MEMS umożliwiającą pomiar prędkości rotacji względem osi Z oraz następnie przy pomocy zintegrowanego układu elektronicznego dokonuje generacji, filtrowania i dopasowania sygnału wyjściowego. Układ przeznaczony jest do zastosowań w przemyśle samochodowym.

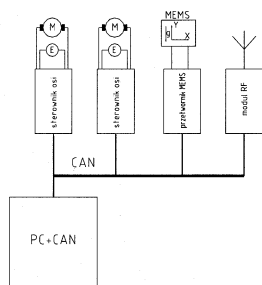
Kolejną dużą grupą zastosowań układów MEMS są układy RF. W tej dziedzinie mikrostruktury stosowane są jako zamienniki klasycznych oscylatorów czy filtrów oraz jako układy nadawania i odbioru fal radiowych. Układy te są stosowane głównie w zastosowaniach telefonii komórkowej i łączności za pomocą fal radiowych w inteligentnych układach pomiarowych [9].

Istotną grupą zastosowań układów MEMS są do analizy substancji chemicznych lub sterujących przepływem cieczy lub gazów. Dobrym przykładem zastosowania technologii MEMS w tej dziedzinie jest głowica drukarki atramentowej, w której ciecz (tusze) pobierany jest do mikro-komór i następnie wyrzucany z nich z dużą prędkością za pomocą temperatury. Wzrost temperatury wytwarzany jest przez przepływ prądu przez rezystory wbudowane w ściany komór.

Z przedstawionego opisu wynika, że największą grupą zastosowań układów MEMS znajdziemy w pomiarach przyspieszeń. W KRiDM AGH opracowano projekt inteligentnego układu do pomiarów przyspieszeń z układem MEMS, który wyposażono w interfejs magistrali CAN.

4. SIECIOWY AKCELEROMETR Z UKŁADEM MEMS

W KRiDM AGH podjęto prace nad konstrukcją sieciowego modułu akcelerometrycznego z wykorzystaniem układu MEMS. W przyjętym rozwiązaniu założono, że do transmisji danych z modułu wykorzystana zostanie przemysłowa sieć w standardzie CAN (Controller Area Network)[10]. CAN jest jednym ze standardów sieciowych obecnych na rynku sieci przemysłowych. Specyfikacja CAN dotyczy sposobu oraz rodzaju transmisji danych. Wybór rozwiązania sieciowego dla projektowanego modułu, a w szczególności sieci CAN, poddyktowany był koniecznością zapewnienia szybkiej wymiany danych pomiędzy opracowanymi modułami, wśród których znajdzie się sterownik położenia silników prądu stałego, opisywany moduł akcelerometryczny oraz moduł bezprzewodowej transmisji danych. Przyjęte rozwiązanie umożliwi unifikację sposobu wymiany informacji pomiędzy modułami oraz zapewni elastyczność w konfigurowaniu układów sterująco-pomiarowych opracowywanych w KRiDM AGH dla aplikacji pomiarowych oraz związanych z robotyka. Ogólny schemat blokowy projektowanego systemu przedstawiono na rysunku 6.

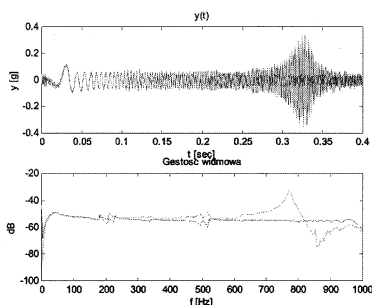


Rys. 6. Ogólny schemat blokowy projektowanego systemu.

Projektowany układ pomiarowy z przetwornikiem akcelerometrycznym będzie miał możliwość statycznego pomiaru wektora przyspieszenia ziemskiego g oraz aktualnych wartości przyspieszeń dla dwóch osi X, Z . Możliwość pomiaru kąta wektora g umożliwia zastosowanie tych przetworników np. w układach pomiaru położenia i orientacji efektora. W miarę pojawiania się na rynku rozwiązań trójosiowych przetworników akcelerometrycznych MEMS z interfejsem cyfrowym układ będzie mógł być rozbudowany do trzech osi X, Y, Z .

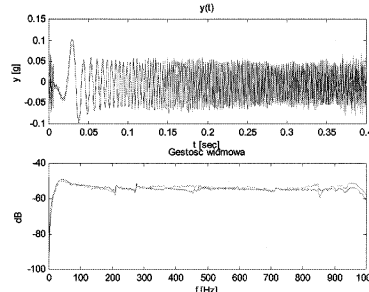
W celu przeanalizowania parametrów akcelerometrycznych przetworników MEMS zestawiono stanowisko badawcze i porównano wyniki uzyskanych pomiarów z pomiarami wykonanymi za pomocą przetwornika przyspieszeń ICP. W skład stanowiska wchodził system pomiarowy SigLab, wzбудnik, wzmacniacz mocy, komputer PC z oprogramowaniem Matlab. Badanym przetwornikiem był układ ADXL05 firmy Analog Devices, protoplasta dostępnych obecnie przetworników dwuosiowych tej samej firmy. Podczas badań analizowano zarówno czasowe jak i częstotliwościowe parametry obu przetworników.

Przetworniki zamontowane na głowicy wzбудnika poddawano szerokopasmowym wymuszeniu typu 'chirp' w zakresie do 1kHz. Podczas ba-



Rys. 7. Porównanie wyników pomiarów przetworników MEMS i ICP - rezonans układu MEMS

dań zauważono ogromny wpływ sposobu zamocowania przetwornika MEMS na uzyskane wyniki. Potwierdza to wcześniej opisywany problem doboru 'obudowy' przetwornika oraz konieczność właściwego sposobu zamocowania układu elektronicznego na badanym obiekcie. Na rysunku 7 i 8 przedstawiono wyniki w postaci przebiegów czasowych oraz wykresów gęstości mocy odpowiednio dla: wstępnego układu pomiarowego (widoczny rezonans obudowy) oraz dla układu zmodyfikowanego.



Rys. 8. Porównanie wyników pomiarów przetworników MEMS i ICP - układ zmodyfikowany

Pomiary potwierdziły dobre odwzorowanie przyspieszeń przez układ MEMS, szczególnie w zakresie niskich częstotliwości.

5. PODSUMOWANIE

Obecnie można zauważyć coraz większą liczbę zastosowań układów MEMS. Dzieje się tak dzięki szybkiemu rozwojowi technologii wytwarzania układów MEMS jak również rosnącemu zapotrzebowaniu rynku na zaawansowane technologicznie zminiaturyzowane rozwiązania mające interdyscyplinarny charakter. Dzięki układom MEMS mamy możliwość mierzenia wielkości i kontrolowania przemieszczeń, których nie sposób wykonać w technice konwencjonalnej. Zalety taniego i masowego wytwarzania układów MEMS z wykorzystaniem dobrze opanowanych technologii krzemowych dają dodatkowy impuls ekonomiczny w dziedzinie rozwoju tych układów. Ciekawymi zagadnieniami dotyczącymi przyszłości układów MEMS są: opracowanie miniaturywnych źródeł energii - mikro zasilaczy, cel energetycznych, opracowanie systemu mikro satelitów zbudowanych w oparciu o technologię MEMS oraz budowę mikroukładów 'BioFlips' służących do stałej analizy biochemicznej w organizmach żywych[8]. Układy MEMS stosowane są również do modyfikacji struktur mechanicznych stanowiąc 'mikroukłady napędowe', które potrafią zmienić właściwości korygowanych struktur mechanicznych [8].

W warunkach krajowych możemy wyłącznie skupić się nad zastosowaniami układów MEMS, i znajdowaniem nowych dziedzin zastosowań tych coraz bardziej dostępnych układów.

LITERATURA

- [1] www.analog.com
- [2] www.st.com
- [3] www.memsic.com
- [4] B. Murari, Is Micromachining Still a Dream or an Industrial Reality? ,2001 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics(AIM'01) Como, Italy, 8-11 July 2001
- [5] Gregory T. Kovacs, Micromachined transducers sourcebook Stanford University, McGraw-Hill, February 1998, ISBN: 0072907223
- [6] H. Toshiyoshi, H. Fujita, Microactuators for optical switches, 3rdFrance-Japan Congress on Mechatronics, October 1-3, Besancon, France
- [7] J. Gardner, V. Varadan, O. Osama Awadelkarim, „Microsensor MEMS and Smart Devices”, J.Wiley, UK,2001
- [8] www.darpa.com
- [9] microlab.berkeley.edu
- [10] K. Etschberger, Controller Area Network (CAN), K. Etschberger, 2001, ISBN: 3-00-007376-0,

Title: Selected MEMS applications for mechanical values measurements

Artykuł recenzowany