

# Układy MEMS

*Układy MEMS stały się już dosyć powszechne, choć ich rozwój rozpoczął się względnie niedawno. Ich najbardziej znane zastosowanie to akcelerometry, ale istnieje szereg innych czujników, które wykonywane są w tej technologii. Z czasem, wraz ze wzrostem precyzji ich wykonywania, powstają nowe pomysły użycia MEMS-ów.*

Układy MEMS to miniaturowe urządzenia elektromechaniczne. Ich nazwę można rozszerzać jako Micro-Electro-Mechanical Systems, ale znane są też określenia takie jak Micromachines i MST – czyli Micro System Technologies. Wszystkie one określają w gruncie rzeczy te same układy, choć wywodzą się z różnych rejonów świata, a więc i powstały w oparciu o różne produkty wytwarzane na całym świecie.

MEMS-y to układy łączące w sobie elementy mechaniczne i elektroniczne, ale wykonane w miniaturowej skali. Mają mikrometrowe rozmiary, choć wraz z postępem technologicznym powstają coraz mniejsze konstrukcje, które niekiedy nazywa się NEMS-ami (Nano-Electro-Mechanical Systems). Wyróżnia się także układy MOEMS, BIO-MEMS i RF-MEMS. Te pierwsze to układy optoelektromechaniczne, które mają zastosowanie głównie w komunikacji optycznej. BIO-MEMS to układy przeznaczone do pracy z żywą materią. Ostatnia grupa to układy pracujące z falami radiowymi i krótszymi.

## Po co komu MEMS-y?

Integracja elementów elektronicznych z mechanicznymi w miniaturowej skali prowadzi do szeregu korzyści, których nie dałoby się osiągnąć praktycznie żadnymi innymi metodami. Małe rozmiary to nie jedyna zaleta tworzenia układów w skali mikrometrów. Okazuje się bowiem, że miniaturyzacja pozwala budować układy mechaniczne, które szybciej się poruszają oraz można je łatwo przyspieszać i zatrzymywać, a wszystko to dzięki ich małej inercji. Co więcej, ulegają mniejszym zmianom pod wpływem temperatury, a nawet są odporne na wibracje, które mogą zaszkodzić układom w skali makro. Naturalnie, niewielkie rozmiary przyczyniają się także do zmniejszenia zapotrzebowania na materiały konieczne do wykonania elementów mechanicznych, co prowadzi do ograniczenia kosztów ich produkcji. Inaczej mówiąc, MEMS-y świetnie sprawdzają się tam, gdzie za pomocą praw mechaniki da się zrealizować zadanie, które nie wymaga działania dużej siły.

Warto też dodać, że do wykonywania układów MEMS można wykorzystywać technologie stosowane podczas produkcji scalonych układów elektronicznych, a w konsekwencji możliwe jest wytworzenie zintegrowanych układów elektroniczno-mechanicznych, zamkniętych w jednej, niewielkiej obudowie.

W efekcie, układy MEMS tworzone są jako całe mikrosystemy, które cechują się szeregiem zalet w stosunku do analogicznych systemów w skali makro. Mikrosystemy są przede wszystkim tańsze w produkcji. Można je wytwarzać np. w fabrykach układów scalonych starszej generacji, które w przeciwnym wypadku albo zostałyby zamknięte, albo musiałyby zostać unowocześnione. Co więcej, dzięki niewielkim rozmiarom, zużywają mało mocy i cechują się małą wagą. W konsekwencji są tańsze w użytkowaniu. Bardzo ważny jest również fakt integracji poszczególnych elementów systemu w jednym układzie scalonym. Pozwala to znacząco zmniejszyć liczbę zewnętrznych kabli i połączeń, które najbardziej wpływają na zawodność urządzeń elektronicznych.

MEMS-y mogą pełnić wiele różnych funkcji w układach elektronicznych. Najczęściej służą jako sensory, aktuatory lub pomagają kondycjonować sygnały odbierane z sensorów. W ogólności można je nazwać przetwornikami, czyli elementami, które transformują sygnał lub energię jednego typu na inny. Dzięki połączeniu w elektromechanicznej budowie, mogą przetwarzać nie tylko energię elektryczną i magnetyczną, ale także mechaniczną, termiczną, a nawet chemiczną i radiacyjną – tj. wpływać na natężenie promieniowania elektromagnetycznego lub długości lub fazy rozchodzących się fal elektromagnetycznych.

## Technologia produkcji

O ile definicja układów MEMS nie ogranicza wyboru materiałów, z których mogą być budowane, w praktyce powstają one przede wszystkim w oparciu o podłoża krzemowe. Wynika to głównie z właściwości fizycznych krzemu i z dużej dostępności wykonanych z nich płytek podłożowych. Monokrystaliczny krzem dobrze przewodzi ciepło, jest lekko elastyczny, ale nie poddaje się deformacji pod wpływem długotrwałego nacisku, a ponadto jest stabilny nawet w bardzo wysokich temperaturach.

Układy MEMS wykonywane są na pięć sposobów: poprzez obróbkę objętościową, obróbkę powierzchniową, za pomocą procesu LIGA i jej odmiany UV-LIGA oraz poprzez łączenie elementów.

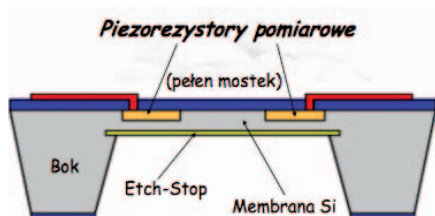
Pierwsza z wymienionych metod polega na wytrawianiu w powierzchni płytki półprzewodnikowej kształtów układu. Określa się ją jako

„Bulk micromachining”. Proces ten może być realizowany na kilka sposobów: trawienie można przeprowadzać np. chemicznie (na mokro lub suchu) lub poprzez bombardowanie powierzchni płytki strumieniem cząsteczek. Bardzo duże znaczenie ma w tym przypadku orientacja krystalograficzna płytki podłożowej. To od niej zależy, jak postępuje trawienie i jaki kształt osiągają tworzone otwory w płytce. Obróbka objętościowa często odbywa się z obu stron płytki. Pozwala to na wytworzenie struktur w całej objętości płytki. Po zakończeniu procesu z podłoża zostają usunięte wszystkie niepotrzebne fragmenty krzemu. W ten sposób wykonuje się przede wszystkim czujniki ciśnienia, akcelerometry i dysze drukarek atramentowych.

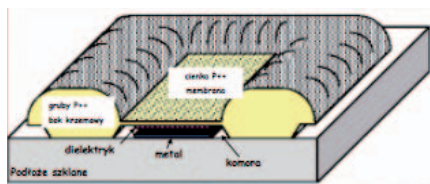
W przypadku obróbki powierzchniowej, na płytkę podłożową nakładane są kolejne warstwy, które następnie poddawane są trawieniu. W efekcie na powierzchni płytki powstają złożone, trójwymiarowe struktury, wykonane z materiału, który nań nałożono. W zależności od liczby nakładanych kolejno warstw i powiązanych z nimi procesów trawienia możliwe jest uzyskanie mniej lub bardziej skomplikowanych kształtów. Najprostsze czujniki wykonuje się w oparciu o dwie dodatkowe warstwy. Bardziej zaawansowane sensory oraz proste aktuatory wymagają trzech poziomów. Zaawansowane aktuatory budowane są z wykorzystaniem czterech warstw, podczas gdy do najbardziej zaawansowanych systemów stosuje się nawet pięć poziomów. W technologii obróbki powierzchniowej, oprócz sensorów ciśnienia i przyspieszenia, wykonuje się układy optyczne do matryc DLP.

Trzecią z metod produkcji jest LIGA (Lithographic Galvanoforming Abforming). Polega ona na nakładaniu materiału formy na metalowe podłoże. Następnie formę naświetla się promieniowaniem rentgenowskim poprzez odpowiednio zaprojektowaną maskę. W kolejnym etapie produkcji naświetlony materiał poddawany jest wywołaniu, co skutkuje uzyskaniem kształtu formy. Jest ona następnie wykorzystywana do nakładania materiału na podłoże. Po jej usunięciu na podłożu zostaje pożądanym, trójwymiarowy kształt. Metoda ta stosowana jest do wykonywania precyzyjnych mechanizmów, czego przykładem mogą być przekładnie optyczne stosowane do sprzęgania ze sobą światłowodów lub też przekładnie mechaniczne. Pozwala uzyskać większą rozdzielczość naświetlania niż dwie wcześniej opisanie technologie.

Nieco tańszą odmianą technologii jest UV-LIGA. Proces ten przebiega praktycznie identycznie jak LIGA, z tą różnicą, że zamiast promieniowania rentgenowskiego stosowane jest promieniowanie ultrafioletowe. Dzięki temu produkcja w technologii UV-LIGA jest tańsza, gdyż falami



Rys. 1. Piezoelektryczny czujnik ciśnienia MEMS



Rys. 2. Czujnik ciśnienia MEMS wykorzystujący zmianę pojemności

ultrafioletowymi jest znacznie łatwiej kierować niż promieniami X. Odbywa się to kosztem precyzji, bowiem im krótsze fale wykorzystane do naświetlania formy, tym większa rozdzielczość procesu produkcyjnego.

### Czujniki ciśnienia

Jednym z najpowszechniejszych czujników MEMS są sensory ciśnienia. Cechują się one szeregiem zalet w stosunku do innych czujników tej wielkości fizycznej i na przestrzeni lat zostały dobrze dopracowane. Mogą być wykonywane

w różny sposób, wykorzystując przy tym odmienne zjawiska fizyczne. Najbardziej popularna odmiana bazuje na zjawisku piezoelektrycznym. Wygięcie się mostka pod wpływem różnicy ciśnień z jednej i drugiej strony elementu powoduje zmianę rezystancji układu (rys. 1).

Dużo lepsze parametry da się uzyskać, jeśli do pomiaru ciśnienia wykorzysta się badanie zmiany pojemności kondensatora, wytworzonego w strukturze układu. Struktura układu tego typu została przedstawiona na rys. 2. Nacisk powietrza bądź innego mierzonego medium na zewnętrzną stronę membrany wygina ją, zmieniając pojemność kondensatora powstałego pomiędzy membraną a warstwą metalu. Czujniki tego typu są bardzo czułe, a jednocześnie praktycznie niewrażliwe na zmiany temperatury. Niestety, budowa tego elementu jest złożona. Struktury tej nie da się wytworzyć w prostym procesie technologicznym.

### Akcelerometry

Czujniki przyspieszenia w technologii MEMS szybko wypierają z rynku inne elementy przeznaczone do pomiaru zmian szybkości poruszania się obiektów. Ich główne zastosowania obejmują wykrywanie kolizji w motoryzacji oraz są integrowane w przenośnych urządzeniach elektronicznych. Tradycyjnie, czujniki przyspieszenia były wykonywane z dyskretnych elementów, montowanych w przedniej

części samochodu, które połączone były do układów elektronicznych umieszczonych przy poduszce powietrznej. Czujniki wykonane w technologii MEMS pozwoliły na integrację elementu wykrywającego zmiany przyspieszenia, jego przetworników i elektroniki sterującej napętnieniem poduszki powietrznej. Dzięki temu koszt elektroniki obsługującej poduszki powietrzne zmalał 5–10-krotnie. Co więcej, czujniki MEMS-owe są dużo mniejsze, co pozwala ograniczyć łączną masę pojazdu.

### Belki, wsporniki, tryby

Układy MEMS to nie tylko czujniki, ale także złożone mechanizmy. W technologii tej da się wykonać mikroskopijne tryby, silniki, a nawet generatory. Trwają prace badawcze nad stworzeniem efektywnych mikroskopijnych generatorów prądu. Jak dotąd powstały jedynie prototypowe urządzenia, takie jak np. opracowany przez instytut Georgia Tech generator o mocy 1,1 W, którego szerokość wynosi około 10 mm.

W praktyce, w technologii MEMS można wytwarzać wszelkie elementy mechaniczne zbudowane z belek, wsporników i trybów. Możliwe jest także tworzenie powierzchni lustrzanych, co wykorzystuje się w projektorach DLP firmy Texas Instruments. Matryca gęsto ułożonych miniaturowych lusterek, z których każde może zmienić swoje ustawienie, pozwala na sterowanie poszczególnymi pikselami obra-

R E K L A M A

**Tektronix**  
Enabling Innovation

Uniwersalne multimetry  
teraz również firmy **TEKTRONIX**

PRZYRZĄDY POMIAROWE

POMIARY RF

POMIARY CZĘSTOTLIWOŚCI

POMIARY TV

TELEKOMUNIKACJA

**nowość**



**Multimetry Cyfrowe**

- ▶ Dokładność pomiarowa do 0.0024%
- ▶ Ilość funkcji matematycznych  
11 (model 4040/50)  
6 (model 4020)
- ▶ Pamięć pomiarów:  
Pamięć wewnętrzna:  
10,000 odczytów;  
USB: 999 plików  
(do 10K odczytów każdy)
- ▶ Interfejsy LAN, GPIB,  
RS232 (adapter USB)



**PROMOCJA!**

Oscyloskopy z serii  
**TDS1000B/2000B**  
z **20% rabatem\***

\*promocja ważna do wyczerpania zapasów  
\*promocja nie łączy się z innymi rabatami i promocjami

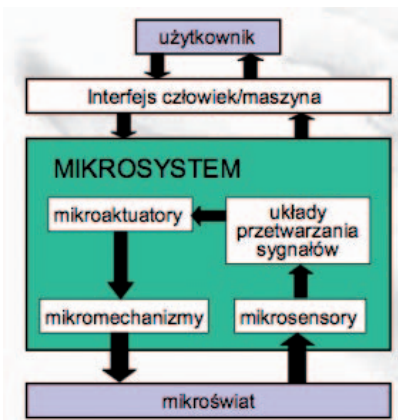
**TESPOL**  
Sp. z o.o.

Siedziba Firmy: 54-413 Wrocław, ul. Klecińska 125, tel. 071 783 63 60, fax 071 783 63 61  
Biuro Handlowe: 03-301 Warszawa, ul. Jagiellońska 74, tel. 022 675 75 42, fax 022 675 54 47

[tespol@tespol.com.pl](mailto:tespol@tespol.com.pl) | [www.tespol.com.pl](http://www.tespol.com.pl)

Dostępne również w sieci sprzedaży: Gdańsk - Bialł, tel. 058 322 11 91, Poznań - Merazet, tel. 061 866 86 14, Warszawa - Merserwis, tel. 022 831 42 56





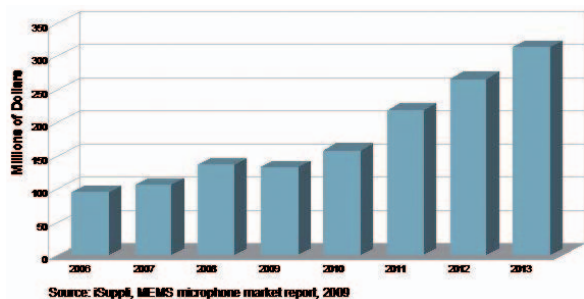
Rys. 3. Ogólna idea budowy mikrosystemów

zu. Na rynku istnieją także inne zastosowania MEMS-ów związane z wyświetlaniem. Firma Qualcomm zbudowała niewielkie matryce o nazwie „Mirasol”, które wykorzystują zjawisko odbijania i wygaszania światła o konkretnych długościach fal. Budowane w ten sposób wyświetlacze pozwalają na uzyskiwanie kolorowych obrazów poprzez poruszanie miniaturowymi lusterkami, bez potrzeby instalacji dodatkowych elementów podświetlających.

Innymi ciekawymi układami wykonywanymi w technologii MEMS są kompasy. Buduje się je np. poprzez zastosowanie zintegrowanych czterech czujników halotronowych. Ostatnio zastosowano je w telefonach komórkowych, w celu wzbogacenia możliwości zintegrowanych odbiorników GPS.

Rośnie też popularność mikrofonów MEMS. Dzięki integracji cyfrowych układów przetwarzających dane, świetnie nadają się one do pracy w miejscach, gdzie występują znaczące zakłócenia elektromagnetyczne. Są stosowane przede wszystkim w laptopach, gdzie sygnał prowadzony jest za wyświetlaczem, tam gdzie narażony jest na zakłócenia generowane przez lampę podświetlającą ekran. Coraz częściej instaluje się je także w telefonach komórkowych. Ostatnio nawet krystalizuje się nowy standard przesyłu cyfrowego dźwięku z tego typu mikrofonów, określany jako SLIMBus. Jego popularyzacja powinna ułatwić implementację czujników dźwięku MEMS, a tym samym zwiększyć ich popularność.

Potwierdzają to liczne prognozy rynkowe. Według iSuppli, światowa wartość sprzedaży mikrofonów wykonanych w technologii MEMS



Rys. 4. Prognoza sprzedaży mikrofonów wykonanych w technologii MEMS

powinna przekroczyć 300 mln dol., podczas gdy obecnie wynosi około 130 mln rocznie. Niewiele gorsze są przewidywania co do sprzedaży żyroskopów. Z obecnych 800 mln dolarów, powinny one wzrosnąć do 1,4 mld dol. w 2013 roku.

### Mikrosystemy

W technologii MEMS można wykonywać również kompletne systemy. Dzięki możliwości integracji przetworników i elementów przetwarzających dane, wraz z sensorami i aktuatorami w jednej obudowie, możliwe jest uzyskanie tzw. mikrosystemów, nazywanych też SoC (System-On-Chip). Mikrosystemy mogą realizować najróżniejsze funkcje, w zależności od rodzaju wbudowanych sensorów. Ponieważ charakteryzują się bardzo niewielkimi wymiarami i małym zużyciem energii, możliwe jest tworzenie całych sieci mikrosystemów, komunikujących się ze sobą za pomocą fal radiowych. Ogólna zasada działania mikrosystemów została przedstawiona na rys. 3.

Mikrosystemy mogą nie tylko przetwarzać informacje i analizować otaczające je środowisko, ale także wpływać na nie, dzięki zintegrowanym aktuatorom. Jako przykład można podać głowice drukarek atramentowych, które są jednym z najbardziej rozpowszechnionych typów MEMS-ów. Są one wykonywane na dwa sposoby. W jednej z nich komora napełniona mikroskopijną kroplą atramentu zostaje podgrzana, co powoduje zwiększenie panującego w niej ciśnienia i wydostanie się płynu z głowicy. Druga odmiana wykorzystuje zjawisko piezoelektryczne. Pod wpływem podania napięcia, ścianka komory wygina się, wypychając tym samym zawartą w niej ciecz na powierzchnię zadrukowywanej kartki.

Dobrym przykładem niezbyt zaawansowanych systemów są wspomniane wcześniej akcelerometry w poduszkach powietrznych, w których zintegrowano elektronikę wyzwalającą napełnienie poduszki.

Z czasem na rynku pojawiają się coraz bardziej złożone mikrosystemy. Ich przegląd, a także tych prostszych układów MEMS zostanie opublikowany w drugiej części artykułu o technologii mikroelektromechanicznej.

### Wyzwania MEMS

O ile technologia MEMS jest już powszechnie wykorzystywana w niektórych zastosowa-

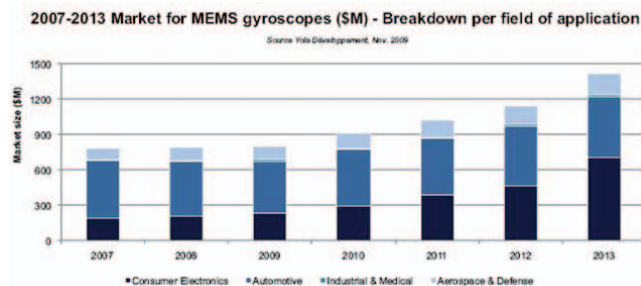
niach, aby rozszerzyć spektrum elementów i układów mikroelektromechanicznych, konieczne jest pokonanie kilku problemów, jakie stoją na drodze projektantom.

Pierwszym z nich jest dostępność technologii produkcji. Na rynku powstało dziesiątki, jeśli nie setki firm, które zainteresowały się MEMS-ami i opracowują własne projekty. Jednakże wytworzenie prototypów jest bardzo kosztowne, gdyż wymaga skorzystania z usług fabryk układów scalonych. Znacząco ogranicza to tempo tworzenia nowych produktów, sprawiając, że każdy błąd w projekcie może zrujnować producenta.

Drugim problem również dotyczy technologii, a konkretnie – wiedzy na jej temat. O ile projektowanie klasycznych układów scalonych może odbywać się niemalże w oderwaniu od technologii, w której zostaną zbudowane, to w przypadku MEMS-ów wybór technologii stanowi o ewentualnym sukcesie produktu. W przypadku układów CMOS procesy, poszczególne technologie produkcji różnią się przede wszystkim liczbą dostępnych warstw oraz wielkościami i wymiarami ograniczającymi precyzję wykonania. W przypadku MEMS-ów sposób projektowania układu zależy od wybranej technologii. Co więcej, to właśnie jej wybór może być najbardziej czasochłonnym elementem projektu, gdyż to od niej zależy, czy dany element może w ogóle powstać.

Trzecią przeszkodą na drodze do zwiększenia dostępności i popularności MEMS-ów jest obudowa, w jakiej są one zamykane. Ponieważ bardzo często elementy MEMS muszą mieć bezpośredni kontakt z otaczającym je środowiskiem, nie mogą być szczelnie zalewane, tak jak klasyczne układy scalone. Obecnie tworzy się specjalizowane obudowy przystosowane do umieszczenia w nich poszczególnych MEMS-ów, co dodatkowo wydłuża czas projektowania i wdrażania produkcji. Statystycznie, jest to także najbardziej czasochłonny i najdroższy etap produkcji układu. Dlatego też ważne jest, by powstały uniwersalne obudowy, które będą przystosowane do kilku lub kilkunastu typów układów. Projektant będzie mógł je wtedy wybierać z katalogu, co pozwoli znacząco skrócić czas produkcji. Przydatne byłyby też narzędzia do modelowania i symulacji obudowy MEMS-ów, które jak dotąd jeszcze nie powstały.

Marcin Karbowniczek, EP  
marcin.karbowniczek@ep.com.pl



Rys. 5. Prognoza sprzedaży żyroskopów wykonanych w technologii MEMS, z podziałem na dziedziny, w których są stosowane