

# Piezorezystancyjne czujniki ciśnienia

## Dobrze znana technologia i jej nowe możliwości

*W artykule omówiono właściwości półprzewodnikowych piezorezystancyjnych czujników ciśnienia, technologię ich wytwarzania, zastosowania i perspektywy rozwoju tej technologii.*

Przykładem wykorzystania doskonałych własności krzemu jest zastosowanie tego materiału do budowy czujników ciśnienia, takiego jak np. na **fotografii 1**. Dzięki temu można uzyskać czujniki charakteryzujące się:

- dużą czułością,
- minimalną nieliniowością,
- znikomą histerezą mechaniczną,
- dużą stabilnością parametrów w czasie,
- odpornością na przeciążenia ciśnieniowe,
- dużą szybkością działania.

Przy wytwarzaniu piezorezystancyjnych czujników ciśnienia mają zastosowanie dwie grupy procesów:

- procesy mikroelektroniki cienkowarstwowej,
- procesy obróbki mikromechanicznej.

Oba procesy zapewniają możliwość produkcji czujników w masowej skali, przy niedużych kosztach.

Procesy technologii cienkowarstwowej pozwalają na wytworzenie w powtarzalny sposób struktur krzemowych zawierających piezorezystory połączone w mostek Wheatstone'a. Rezystywność półprzewodnika odpowiednio domieszkowanego jest uformowana przez dobór koncentracji i rozkładu domieszek. Wartość rezystancji rezystora cienkowarstwowego w praktyce zależy od rezystywności oraz długości i szerokości ścieżek. Rezystory są odpowiednio umieszczone w strukturze półprzewodnikowej (w osi krystalograficznej 100). Pod wpływem naprężenia mechanicznego struktury krzemowej zawierającej na powierzchni rezystory uzyskuje się dodatnie i ujemne zmiany rezystancji wywołane efektem piezorezystancyjnym.

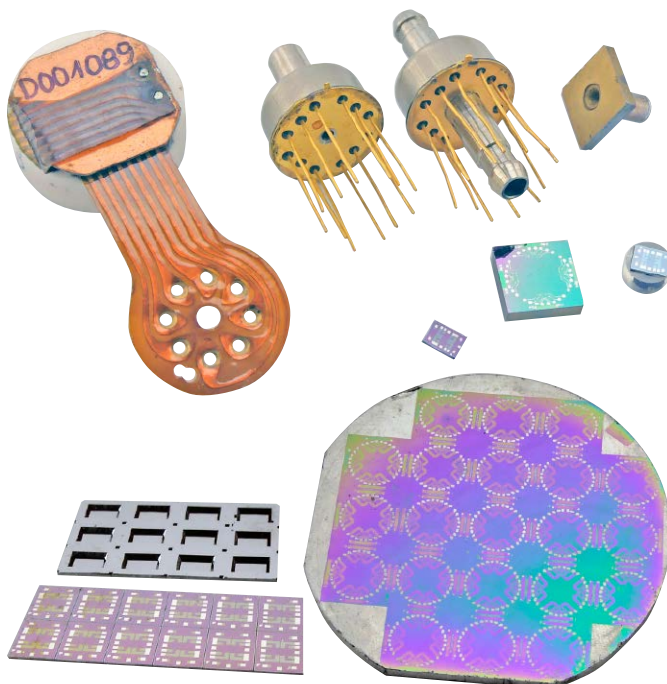
Mostek Wheatstone'a, złożony z odpowiednio połączonych piezorezystorów, zasilany stabilizowanym prądem lub napięciem, reaguje na wzrost naprężenia struktury krzemowej wzrostem napięcia niezrównoważenia. Właściwe rozmieszczenie rezystorów na membranie gwarantuje duże zmiany napięcia (50...100 mV) i małą nieliniowość. Właściwości mechaniczne krzemu zapewniają znikomą histerezę mechaniczną. Z uwagi na dość dużą zależność sygnału wyjściowego od temperatury, niektóre struktury zawierają dodatkowo rezystory, będące czujnikami temperatury. Są wykorzystywane do kompensacji błędów temperaturowych. Procesy obróbki mikromechanicznej dotyczą samych struktur (wytwarzanie membran) i elementów towarzyszących jak również operacji montażu.

Mając do dyspozycji gotowe płytki krzemowe z piezorezystorami w dalszym procesie wytwarzania czujnika ciśnienia, można wyróżnić typowe operacje technologiczne:

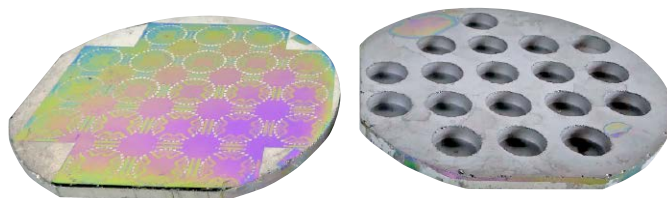
- drążenie mechaniczne otworów w krzemie,
- trawienie anizotropowe krzemu,
- łączenie struktury krzemowej z elementami wytworzonymi z odpowiedniego szkła,

- łączenie struktury krzemowej z innymi elementami wytworzonymi z krzemu,
- cięcie elementów wytworzonych z krzemu,
- klejenie.

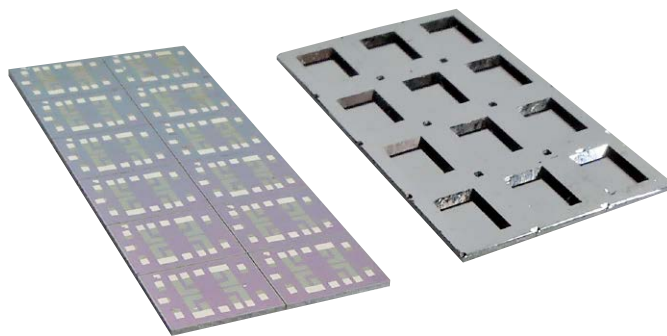
Wygląd struktury czujnika po niektórych etapach wymienionych procesów pokazano na **fotografii 2** i **fotografii 3**.



**Fotografia 1. Czujniki piezorezystancyjne i elementy**



**Fotografia 2. Struktury czujnika – po operacji drążenia i trawienia**



**Fotografia 3. Struktury czujnika – po operacji trawienia**

Dwie pierwsze operacje służą uzyskaniu membran o określonym kształcie i odpowiedniej grubości. Dobierając odpowiednie grubości membran można łatwo uzyskiwać różne zakresy mierzonego ciśnienia. Pozostałe operacje umożliwiają powstanie przestrzennej struktury czujnika. Wykonanie połączeń elektrycznych (bondowanie) i zamknięcie w obudowie kończą proces wytwarzania samego czujnika ciśnienia. W zależności od sposobu montażu, czujniki mogą mierzyć: nadciśnienie, ciśnienie absolutne, różnicę ciśnień. Oczywiście, sam sensor półprzewodnikowy może być montowany wraz z innymi modułami półprzewodnikowymi, tworząc zintegrowany układ o znacznie szerszych możliwościach. Takie rozwiązanie może zapewnić bezprzewodową komunikację, sygnalizację przekroczeń zadanych wartości ciśnienia itp. Tego typu układy mogą być produkowane w skali masowej. Charakteryzują się dużą niezawodnością, a koszty ich wytworzenia są stosunkowo niskie.

Sposób montażu i dalszego postępowania w dużej mierze jest uzależniony od przeznaczenia czujnika. Zastosowanie czujnika w przemysłowych przetwornikach ciśnienia i innych układach o dużej dokładności, wymaga przeprowadzenia precyzyjnych pomiarów w celu wyznaczenia szeregu parametrów.

Jak wspomniano, jedną wadą czujników piezorezystancyjnych jest zależność niektórych parametrów od zmian temperatury. Temperatura ma wpływ na następujące parametry:

- przesunięcie zera,
- przesunięcie zakresu,
- histerezę temperatury,

Wpływ temperatury jest szczególnie niekorzystny, gdy czujniki muszą pracować w szerokim zakresie temperatury. Najczęściej ma to miejsce w systemach automatyki i w przemyśle motoryzacyjnym.

Prawidłowa budowa i właściwy montaż czujnika, pozwalają na uzyskanie dużej powtarzalności charakterystyk temperaturowych i minimalizację histerezy termicznej. Dzięki temu można redukować błędy temperaturowe stosując ich kompensację metodą analogową lub cyfrową. Technologia piezorezystancyjnego czujnika ciśnienia w połączeniu z użyciem układów mikroprocesorowych zapewnia dokładność porównywalną z dokładnością przyrządów referencyjnych.

Obecnie, stosowanie półprzewodnikowych czujników ciśnienia jest powszechne w takich dziedzinach jak: przemysł motoryzacyjny, medycyna, lotnictwo, automatyka przemysłowa. Operacje technologiczne stosowane w produkcji czujników ciśnienia są wykorzystywane również w produkcji innego rodzaju czujników: przyśpieszenia, siły itd.

Warto pamiętać, iż w Polsce w latach osiemdziesiątych ubiegłego wieku, istniał i realizował omawiane operacje technologiczne Ośrodek Badawczo-Rozwojowy Elektronicznych Układów Specjalizowanych OBREUS w Toruniu. Zespół młodych ludzi opracował szereg nowatorskich technologii, umożliwiających produkcję piezorezystancyjnych czujników ciśnienia. Produkcja czujników i struktur odbywała się na dużą skalę. Zespół naukowców i inżynierów opracował i zrealizował specjalistyczne urządzenia do: obróbki mechanicznej krzemu, łączenia struktur krzemowych z elementami konstrukcyjnymi wykonanymi z krzemu, łączenia struktur krzemowych ze szkłem. Uruchomiono linię technologiczną wytwarzającą struktury półprzewodnikowe i umożliwiającą wytrawianie membran krzemowych. Opracowano i zrealizowano zintegrowany system pomiarowy do selekcji struktur i gotowych czujników. System pomiarowy mierzył parametry ciśnieniowo-temperaturowe, a końcowym wynikiem pomiarów było wyznaczenie elementów kompensujących błędy temperaturowe. Dzięki analizie danych pomiarowych uzyskanych ze zintegrowanych komputerowych systemów pomiarowych, w powiązaniu z parametrami wytwarzania, można było korygować parametry procesów technologicznych w celu osiągnięcia oczekiwanych własności temperaturowych czujników. Na skalę masową wytwarzane były dwie grupy czujników ciśnienia: E 55 i PS.

Czujnik **E 55 (fotografia 4)** przeznaczony do przemysłowych przetworników ciśnienia produkowanych w Polsce na licencji firmy Honeywell.

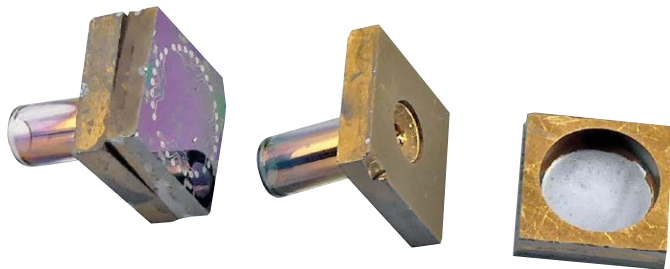
**Poznaj cały proces edycji zdjęć:** od sortowania materiału, poprzez kolorystyczną i tonalną korektę oraz techniki retuszerskie, po bardziej zaawansowane metody fotomontażu, konwersji mono, a także tworzenia całego wachlarza efektów!



**SZUKAJ W SALONACH PRASOWYCH ORAZ NA WWW.ULUBIONYKIOSK.PL (PRZESYŁKA GRATIS)**



**NOTATNIK KONSTRUKTORA**



**Fotografia 4. Elementy czujnika E55**

Czujnik E 55 był montowany w nietypowej obudowie ceramicznej z wyprowadzonym obwodem elastycznym i był dokładnym odpowiednikiem czujnika amerykańskiego. Czujniki były wykonywane na różne zakresy ciśnienia, w tym do wartości aż 700 Atm.

Struktury czujników E 55 były wykonywane na nietypowych, grubych płytkach krzemowych. Każda struktura zawierała 4 niezależne mostki Wheastone'a wraz z rezystorami do pomiaru temperatury. Po pomiarach ostrzowych zautomatyzowany system pomiarowy eliminował mostki niespełniające parametrów i wybierał 2 najlepsze. W pierwszej fazie płytki ze strukturami poddawano mechanicznej operacji drążenia okrągłych otworów. Drążenie było wykonywane przy użyciu specjalnie opracowanej drążarki ultradźwiękowej. Następnie płytki poddawano operacji trawienia anizotropowego w celu uzyskania właściwej grubości membrany. W ten sposób usuwano mikropęknięcia i dobierano odpowiedni zakres ciśnienia czujnika.

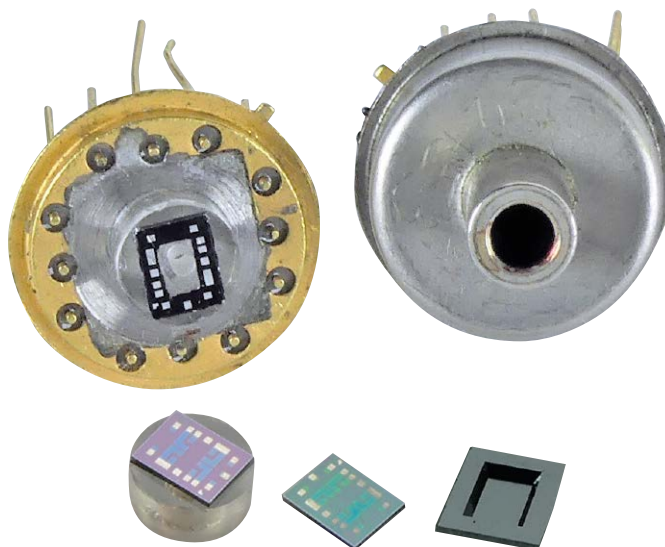
Po operacji cięcia płytek na pojedyncze struktury przystępowano do wykonania szeregu operacji technologicznych w celu uzyskania klasycznego mieszka pomiarowego. Jedną z ciekawszych operacji było połączenie dwóch elementów krzemowych za pomocą złącza eutektycznego (bez użycia kleju). Tak wykonane połączenie musiało wytrzymać podwojoną wartość maksymalnego mierzonego ciśnienia (1400 Atm). Na uwagę zasługuje również operacja łączenia rurki szklanej z elementem krzemu – również bez użycia kleju.

Po zakończeniu montażu wszystkie czujniki były poddawane procedurze pomiarowej w zautomatyzowanym systemie pomiarowym. Pomiary polegały na wyznaczeniu charakterystyki ciśnieniowej w przewidzianym zakresie, wyznaczeniu histerezy mechanicznej, odporności na przeciążenia. Wyznaczano również błędy temperaturowe w zakresie temperatury -30...+80°C. Końcowym etapem badań było:

- sprawdzenie czy parametry mostków czujnika odpowiadają wymaganiom stawianym przez układ elektroniczny przetwornika.
- wyznaczenie elementów kompensujących błędy temperaturowe i przesunięcia zera mostka.
- wyznaczenie wartości elementu poprawiającego nieliniowość.
- wybór jednego( lepszego) z dwóch mostków Wheastone'a.

Czujniki z serii **PS** były wykonywane w wersji czujników różnicy ciśnień, nadciśnienia, ciśnienia absolutnego. Miniaturowy czujnik ciśnienia serii **PS** (fotografia 5). Konstrukcja czujnika ciśnienia serii **PS** jest znacznie prostsza. Materiałem wyjściowym jest płytka krzemowa o standardowej grubości. Membrana krzemowa ma kształt prostokąta. Odpowiedni kształt i grubość uzyskuje się stosując operację trawienia anizotropowego. Ciekawą operacją technologiczną jest łączenie wytrawionej struktury ze słupkiem szklanym metodą bondingu anodowego. W tym celu opracowano specjalne urządzenie. Po końcowym montażu czujniki były poddawane podobnej procedurze pomiarowej, jak czujniki z serii E 55. Gotowy czujnik był sprzedawany z dołączoną metryczką (fotografia 6) zawierającą podstawowe parametry i wyznaczone elementy kompensacyjne.

Obecnie wytwarzane przez wiodących, światowych producentów czujniki ciśnienia wykonane w technologii piezorezystancyjnej nie różnią się znacząco od przedstawionych w artykule.



**Fotografia 5. Elementy czujnika PS**

Różnią się jedynie kształtem obudowy, sposobem mocowania struktur. Często zawierają też układy towarzyszące, zwiększające ich funkcjonalność. Popularne obecnie układy MEMS są właśnie klasycznym przykładem takiego rozwiązania. Połączenie czujnika z mikrokontrolerem i modułem komunikacji bezprzewodowej znacznie poszerza możliwości zastosowania takiego układu. Takie właśnie rozwiązanie jest stosowane np. w czujnikach mierzących ciśnienie w oponach samochodowych.

Gwałtowny rozwój modułów komunikacyjnych umożliwiających korzystanie z systemów Wi-Fi, Bluetooth, ZigBee, stosowanie układów o obniżonym poborze energii i transmisja danych w paśmie 2,4 GHz lub 5 GHz przyczyniają się do rozszerzenia zastosowań rozmaitych sensorów w systemach ostrzegania i kontroli. Takie systemy mogą być stosowane w diagnostyce medycznej, maszyn lub pojazdów. Coraz powszechniej stosuje się zintegrowane czujniki ciśnienia w tzw. Internecie Rzeczy i instalacjach inteligentnego domu. Pojawiające się nowatorskie ogniwa umożliwiające pozyskiwanie energii elektrycznej ze swojego otoczenia, mogą zapewnić „wieczne działanie” urządzeń diagnostycznych. Szczególnie interesujące wydaje się pozyskiwanie energii elektrycznej z drgań mechanicznych.

Oczywiście, korzystanie z sieci internetowej niesie klasyczne zagrożenia również dla pracy tych urządzeń, jednak gwałtowny postęp w budowie urządzeń diagnostycznych wydaje się nieunikniony. Wykorzystanie i realizacja przedstawionych technologii i omówionych rozwiązań technicznych jest dalszym ciągiem przedsięwzięciem całkowicie możliwym do realizacji w naszych, polskich warunkach.

**Paweł Polak**  
pawel.polak@unitor.com.pl

Miniaturowy czujnik ciśnienia serii PS			
Nr czujnika : 4074			
Zakres		kPa	250
Nap.niezrown. Up/Un	mV		-30.50/-30.70
Rezyst.mostka Rm	Ω		4971
Hist.tera. Ht	mV		0.06
Szer.zakresu F.S.D.			
prad./nap.	mV		59.9/ 60.5
Bład temp.zera 0951/0953	mV		0.94/ 0.02
Bład temp.zakresu 551/593	mV		
	% F.S.D.		2.3 / 1.1
Nieliniowosc	% F.S.D.		0.07
Hist.mech. Hm	% F.S.D.		-0.03
Rezystory kompensacyjne:			
Rp1	369.5	kΩ	Rp2 = kΩ
Rs1	51.2	Ω	Rs2 0 Ω
Rz	108.6	kΩ	



**Fotografia 6. Gotowy czujnik PS z dołączoną metryczką**