

CZUJNIKI MIKROELEKTRONICZNO-MECHANICZNE W ZASTOSOWANIU DO TECHNIKI WENTYLACYJNEJ, KLIMATYZACYJNEJ I CHŁODNICZEJ

David YASHAR, Piotr A. DOMANSKI^{*)}

Artykuł został opublikowany w *ASHRAE Journal*, May 2004. Jest on opracowaniem *National Institute for Standards and Technology* (instytucja federalna) i nie jest objęty prawami autorskimi.

Czujniki mikroelektroniczno-mechaniczne MEMS (ang.: *MicroElectronic Mechanical Systems*) zrewolucjonizowały rynek czujników poprzez pojawienie się na nim tanich urządzeń o szybkiej odpowiedzi. Urządzenia te znalazły zastosowanie w ogromnej ilości produktów. Przykładowo, w obecnie produkowanych samochodach stosuje się od 25 do 70 czujników MEMS do zbierania informacji, podczas gdy tradycyjne czujniki budowane w makroskali byłyby zbyt drogimi urządzeniami [1].

Wzrastająca presja na podwyższenie efektywności energetycznej oraz pewności działania systemów ogrzewania, wentylacji, klimatyzacji oraz chłodniczych, sprzyja zastosowaniu czujników MEMS w nowoczesnych układach wykrywania niesprawności oraz diagnostyki FDD (ang.: *Fault Detection and Diagnostics schemes*). Łączne zastosowanie czujników MEMS, układów FDD, a także możliwości wykorzystania połączenia sieciowego - stanowią potencjał pozwalający na zmianę dotychczasowego sposobu monitorowania pracy oraz serwisowania urządzeń chłodniczych i klimatyzacyjnych.

Przegląd czujników MEMS

Czujniki MEMS posiadają wiele cech układów scalonych. W znaczący spo-

sób różnią się one jednak od tych układów, że zawierają elementy mechaniczne, takie jak: membrany, belki wspornikowe, przekładnie, sprężyny i inne (patrz tekst towarzyszący: „Wytwarzanie czujników MEMS”). Zastosowanie tych elementów pozwala na budowę różnorodnych czujników MEMS, które zastępują tradycyjne czujniki w przemyśle samochodowym, w zastosowaniach biomedycznych, w aeronautyce, a także w technice informatycznej.

W ciągu ponad trzech ostatnich dekad rynek czujników MEMS wzrósł i aktualnie kształtuje się na poziomie dziesiątków miliardów dolarów rocznie [2]. Ten sukces należy zawdzięczać niskim jednostkowym kosztom wytwarzania tych czujników, ich dużej dokładności, małym rozmiarom, małej wadze, a także ich wysokiej niezawodności. Zwłaszcza niewielkie gabaryty czujników MEMS są niezwykle istotną ich cechą, odróżniającą je od klasycznych czujników. Pozwala to na bezinwazyjne działanie omawianych czujników: tak więc przykładowo parametry czynnika mogą być mierzone bez znaczącego zakłócenia przepływu, zaś pomiary parametrów układów zamkniętych bez wprowadzania dodatkowej masy czujnika. Mała masa oraz gabaryty tych czujników w znaczący sposób wpływają również na ich małą pojemność cieplną, oraz związana z tym ich małą bezwładność. Oznacza to,

ze omawiane czujniki wykazują o wiele krótszy czas reakcji, niż czujniki klasyczne.

Szanse zastosowania czujników MEMS w układach ogrzewnictwa, wentylacji, klimatyzacji i chłodnictwa

Jak dotąd zastosowanie czujników w urządzeniach chłodniczych sprężarkowych było ograniczone do tradycyjnych drogich czujników klasycznych (tj. budowanych w makroskali), które są z zasady stosowane w bardzo dużych układach, w których ich koszt nie jest znaczący. Można założyć, że sukces zastosowania czujników MEMS w wielu dziedzinach przemysłu jest odzwierciedlony w ich zastosowaniu w technice ogrzewnictwa, wentylacji, klimatyzacji i chłodnictwa. Obserwuje się wzrost zastosowań czujników MEMS w parowych sprężarkowych urządzeniach chłodniczych.

Niektóre czujniki konieczne do monitorowania kluczowych parametrów w sprężarkowych urządzeniach chłodniczych są stosowane standardowo, zaś obecnie stosuje się w tej roli coraz częściej właśnie czujniki MEMS. Przykładowo, na rynku obecnych jest wiele **czujników temperatury MEMS**, w których zastosowano element pomiarowy w postaci cien-

^{*)} David Yashar jest inżynierem mechanikiem; dr Piotr A. Domański, member ASHRAE, jest kierownikiem Zakładu Ogrzewnictwa, Wentylacji, Klimatyzacji i Chłodnictwa (*HVAC&R Equipment Performance Group*) w National Institute for Standards and Technology, Gaithersburg, Md., USA.

kiej warstwy platynowej (czujniki RTD) lub termistory o klasycznej budowie. Omawiane czujniki MEMS charakteryzują się podobną dokładnością, jak ich makroskalowe odpowiedniki. Elementem pomiarowym jest prosty opornik, platynowy lub silikonowy, nałożony na chip. Oporność tych materiałów zmienia się wraz z temperaturą, toteż mierzona rezystancja może być stosowana jako wskaźnik temperatury. Koszt pojedynczych czujników MEMS jest bardzo niski: ceny hurtowe są niższe niż 0.50 USD za sztukę wraz z obudową. Z tego powodu czujniki te są stosowane w zestawie zawierającym również inne czujniki MEMS, zamiast wykonania ich w postaci niezależnych układów.

Czujniki ciśnienia MEMS są produkowane na szeroką skalę. Ich dokładność pomiarowa wynosi $\pm 1\%$, zaś dostępne zakresy pomiarowe wynoszą począwszy od $0 \div 34$ kPa, aż do $0 \div 34$ MPa. Urządzenia te są produkowane bez większych trudności za pomocą technologii nakładania rezystorów polisilikonowych czułych na naprężenia mechaniczne (tzw. piezorezystorów) na cienką membranę. Po przyłożeniu ciśnienia następuje odkształcenie membrany, co wywołuje naprężenia w piezorezystorach nałożonych na jej powierzchni. Wielkość odkształcenia membrany jest mierzona poprzez pomiar zmiany rezystancji piezorezystorów. Jest to najbardziej rozpowszechniony typ czujników ciśnienia z racji tego, że ich produkcja jest raczej prosta, zaś zakresy ich działania są dość elastyczne. Koszt tych urządzeń jest uzależniony od skali ich produkcji. Dla czujników MEMS o znacznych gabarytach, typowy zakres ich jednostkowych cen zawiera się w granicach od 20 do 30 USD, przy czym znaczący udział ceny przypada tu na koszty obudowy wytrzymałej mechanicznie i odpornej na wstrząsy. Wielu z producentów dostarcza również poszczególne kości elektroniczne, pozostawiając wykonanie obudowy odbiorcy końcowemu. Tak sprzedawane czujniki są dostępne nawet w cenie jednostkowej niższej niż 0.40 USD.

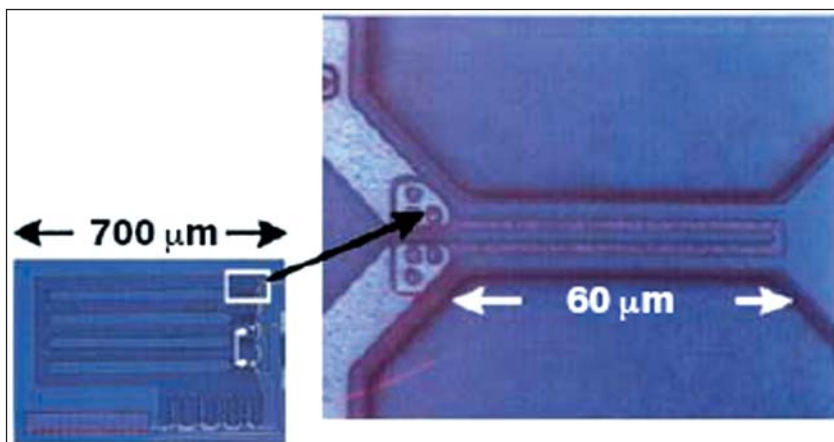
Aktualnie opracowano wiele czuj-

ników wilgotności MEMS i są one ogólnodostępne na rynku [3]. Spośród nich najpopularniejsze są pojemnościowe czujniki wilgotności. Czujniki te składają się z porowatego materiału dielektrycznego, umieszczonego pomiędzy równoległymi płytami kondensatora. Materiał ten, poddany działaniu wilgotnego środowiska, absorbuje wilgoć, co powoduje zmianę jego stałej dielektrycznej. Wobec tego miara poziomu wilgotności jest pojemnościami płytami. Czujniki wilgotności tego typu są dostępne w cenie od 15 do 85 USD, zależnie od ich wielkości oraz rodzaju obudowy.

Czujniki drgań mogą być zastosowane w celu wczesnego wykrycia problemów ze sprężarką lub wentylatorem. Odchylenie od stanu normalnych drgań może wskazywać na obecność potencjalnego problemu w instalacji. Podstawowa, tania konstrukcja czujnika drgań może być na tyle prosta, że obejmuje belkę wspornikową zamocowaną na chipie. Takie urządzenie było przedmiotem prac w National Institute of Standards and Technology (NIST) [4]. Jeżeli omawiany chip zostanie poddany pionowemu przyspieszeniu, wówczas następuje ugięcie belki wspornikowej. Z kolei informacja o ugięciu tej belki jest uzyskiwana poprzez pomiar rezystancji piezorezystora zainstalowanego na podstawie belki. Na Rys. 1 przedstawiono fotografię badanego urządzenia.

Dostępne są również bardziej skomplikowane typy czujników ruchu MEMS, które mogą być stosowane do pomiaru drgań sprężarek i wentylatorów. Drgania poprzeczne mogą być mierzone za pomocą akcelerometrów podobnych do tych, jakie są stosowane w systemach kontroli samochodowych poduszek powietrznych (są one dostępne komercyjnie w cenie od 4 do 20 USD). Urządzenia te działają na zasadzie stabilizacji próbnej masy zawieszonoj w ustalonym położeniu za pomocą sprężyn. Na Rys. 2 przedstawiono schemat ideowy typowego czujnika przyspieszenia poziomego. Masa próbna wykonuje ruchy względem zakotwiczonego chipu w sytuacji, gdy prędkość tego chipu ulega zmianom. Zasada działania tego urządzenia opiera się na pomiarze pojemności; zatem - zmierzona pojemność pomiędzy dwoma elementami jest funkcją odległości pomiędzy nimi.

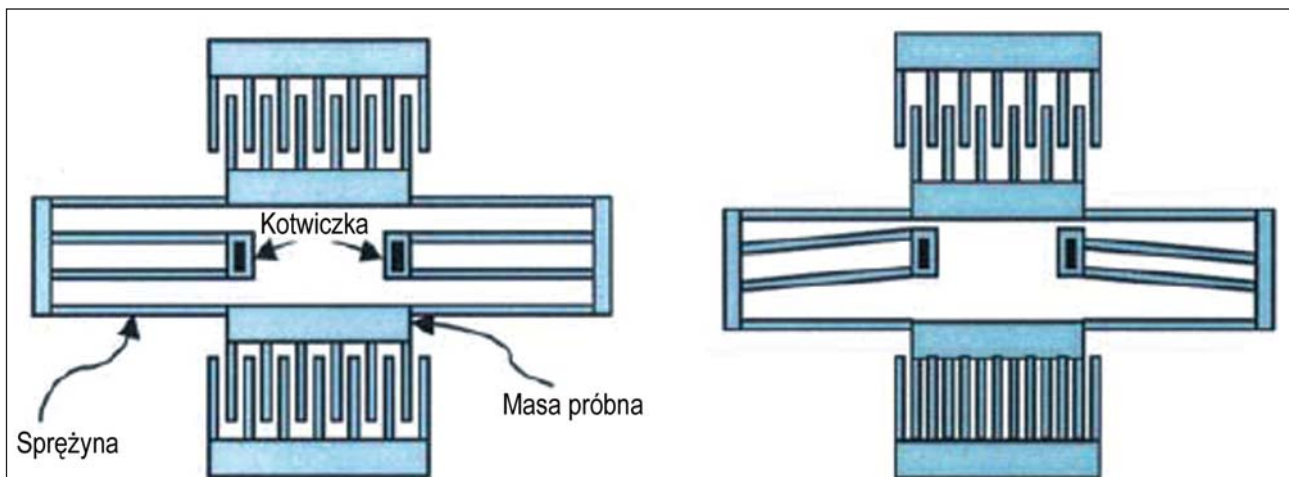
Czujniki lepkości mogą wskazywać warunki, w jakich znajdują się roztwory czynników chłodniczych z olejami w instalacji, jak również mogą umożliwiać obsługę instalacji w oparciu o te warunki. Makroskalowe czujniki lepkości zawierają wiskozymetry kapilarne, Hoppera (z opadającą kulka), rotacyjne oraz z oscylatorem kwarcowym. Żaden z tych czujników nie może być jednak zastosowany dla większości sprężarek z uwagi na niezgodność ich rozmiarów z ograniczeniami dostępnej przestrzeni, a także z



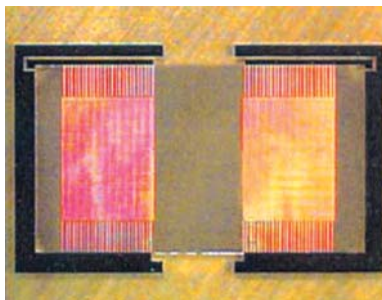
Fotografia 4 niezależnych urządzeń

Powiększenie uginającej się belki; widoczny zamontowany piezorezystor

Rys. 1. Fotografia belkowego akcelerometru pionowego



Rys. 2. Typowa konstrukcja czujnika przyspieszenia poziomego



Rys. 3. Czujnik fali zginania, wyprodukowany przez Boston Microsystems

uwagi na wymagana ilość środka smarnego niezbędną do pomiaru. W ciągu kilku ostatnich lat podejmowano prace badawcze nad opracowaniem spełniającym wymagania konstrukcyjne czujnika lepkości MEMS [5]. Ostatnio przeprowadzone badania wstępne mikro-rezonatora typu SAW (ang.: *surface acoustic wave*), oraz typu FPW (ang.: *flexural plate wave*) wykazały [6], że urządzenie typu FPW może być uznane za obiecujące dla pomiarów w zakresie lepkości środka smarnego w sprężarce od 1 cP do 15 cP (czyli od 1 mPa·s do 15 mPa·s).

Czujniki typu FPW działają na zasadzie wytworzenia fali zginania (ang.: *flexural wave*) wędrującej wzdłuż cienkiej membrany. Ponieważ prędkość propagacji fali zginania jest niższa od prędkości dźwięku w ośrodku płynnym, zatem ruch tejże fali ogranicza się raczej do płytki, niż do cieczy znajdującej się z nią w kontakcie. Miara lepkości ośrodka jest częstotliwość oraz tłumienie fal. Urządzenie działające na omówionej zasadzie przedsta-

wiono na Rys. 3. Urządzenia typu FPW pozwalają na około 20-krotne zmniejszenie wymiarów czujnika, przy docelowej cenie rynkowej 8 USD za sztukę.

Przetworniki typu ISFET lub typu CHEMFET (skrótów pochodzą od nazw angielskich, odpowiednio: *Ion Sensitive Field-Effect Transistors*, oraz: *Chemical Field Effect Transistors*) mogą być zastosowane do monitorowania odczynu pH lub do wykrywania obecności niepożądanych składników w roztworze czynnikowo-olejowym. Szczegółowe informacje o działaniu czujników pierwszego typu są dostępne na stronach internetowych firmy *Sentron7*.

Czujniki przepływu dostarczają informacji o masowym natężeniu przepływu czynnika chłodniczego, a także natężeniu przepływu po stronie powietrznej lub wodnej skraplaczy oraz parowników, które są bardzo istotnymi parametrami. Większość czujników przepływu MEMS znajduje się aktualnie w stadium prac eksperymentalnych. Jedynie gazowe

czujniki przepływu zostały przebadane w największym zakresie i znalazły zastosowanie w aeronautyce. Aktualnie rozwijane są konstrukcje anemometrów oraz czujników przepływu opartych na pomiarze naprężeń stycznych w warstwie przyściennej [8]. Charakterystyczne dla czujników MEMS małe gabaryty sprawiają, że nie jest możliwy bezpośredni pomiar przepływu w skali makroskopowej. Jednakże w przypadku wielu zastosowań, informacja dostarczana przez tego typu czujniki może być użyteczna. Anemometry działają na zasadzie dostarczenia ciepła do przepływającego ośrodka poprzez zastosowanie grzanego elementu w warstwie przyściennej. W urządzeniu tym dokonuje się pomiaru ilości ciepła dostarczonego drogą konwekcji do przepływającego ośrodka, co jest z kolei miarą prędkości przepływu. Czujnik naprężeń stycznych jest umieszczony w warstwie przyściennej. W tym czujniku dokonywany jest pomiar wielkości naprężeń stycznych spowodowanych ruchem płynu, najczęściej poprzez zastosowanie rucho-

meo, zamocowanego w sposób elastyczny, elementu pomiarowego [9].

Czujniki różnicy ciśnień (ang.: *differential pressure sensors*) mogą być zastosowane dla powietrza, wody lub filtrów w przewodach cieczowych. Ten typ czujników jest podobny pod wieloma względami do opisanych powyżej czujników ciśnienia. Zasadnicza różnica polega na tym, że pomiar odnosi się do porównywania ciśnienia po obydwu stronach chipu, zaś w przypadku czujników ciśnienia z jednej strony tego elementu jest próżnia. Są one wykonywane z obudową posiadającą niewielkie kapilary po obu stronach czujnika i mogą one być zainstalowane za pomocą kapilarnych odbiorów ciśnienia po obydwu stronach filtra. Osiągnięcie zadanego spadku ciśnienia wskazuje na optymalny czas wymiany filtra. Czujniki różnicy ciśnień MEMS mogą być również zastosowane do wykrycia zasrzenia oraz inicjacji cyklu odszraniania. Pomiar spadku ciśnienia po stronie powietrznej stanowi najbardziej bezpośredni sposób oceny, kiedy należy rozpocząć cykl odszraniania.

Podsumowanie

Należy uznać za oczywiste, że sukces, jaki odniosło zastosowanie czujników MEMS w wielu dziedzinach, zostanie w pewnym stopniu powtórzony w zakresie techniki ogrzewania, wentylacji, klimatyzacji i chłodnictwa. Siłą napędową zastosowań czujników MEMS jest obniżenie kosztów, zwiększenie ich funkcjonalności, a także zwiększenie świadomości, jakie korzyści mogą wynikać z zastosowania monitoringu pracy instalacji oraz współczesnych systemów FDD.

Aktualnie korzyści wynikające z zastosowania układów FDD nie są jeszcze w pełni ocenione. Aktualnie prowadzony projekt zainicjowany przez Komitet Techniczny ASHRAE, nr 7.510, pozwoli na uzyskanie tych informacji. Niezależne badania wskazują, iż wpływ zastosowania układów

FDD może być znaczący. Jedno z niezależnych źródeł badawczych dotyczące badań 1 500 agregatów dachowych wykazuje, iż średnia efektywność energetyczna wynosi zaledwie 80% wartości oczekiwanej, najczęściej ze względu na niewłaściwe napełnienie czynnikiem [11]. Wedle innego z kolei źródła dotyczącego badań ponad 55 000 agregatów w zastosowaniach mieszkalnych oraz handlowych, niewłaściwe napełnienie czynnikiem stwierdzono w ponad 60% jednostek [12].

Breuker and Braun [13] wykazała, że niewłaściwe napełnienie czynnikiem chłodniczym, a także inne cztery najczęstsze usterki, mogą zostać zdiagnozowane za pomocą zastosowania zaledwie pięciu czujników temperatury oraz dwóch czujników różnicy ciśnień. Pomiar innych parametrów zwiększa możliwości układów FDD. Bardziej rozbudowane układy FDD, nakierowane na uzyskanie większej niezawodności sprzętu, zawierają czujniki drgań oraz lepkości i mogą znaleźć zastosowanie w aplikacjach, w których awaria sprzętu jest niedopuszczalna z uwagi na znaczną wartość ładunku lub sprzętu.

Spoglądając w przyszłość, połączenie czujników MEMS, metod FDD, a także technologii sieciowych - zmieni sposób serwisowania instalacji chłodniczych i klimatyzacyjnych. Dla przykładu, zdalny monitoring, który jest aktualnie dostępny jedynie dla instalacji obsługujących duże budynki, będzie mógł być zastosowany do indywidualnych klimatyzatorów w budynkach mieszkalnych. Aktualna praktyka dokonywania przeglądów sezonowych będzie mogła być zastąpiona systemem obsługi opartym na sygnalizacji niesprawności kierowanej drogą elektroniczną do personelu obsługi, który będzie czuwał w sposób ciągły. Wizja przyszłego sprzętu grzewczego, wentylacyjnego, klimatyzacyjnego i chłodniczego jest taka, iż będzie to sprzęt sprawniejszy, bardziej niezawodny, oraz lepszy jakościowo. Technologia czujników MEMS stanowi jeden z kluczy do spełnienia tej wizji.

Podziękowania

Praca została wsparta przez U.S. Department of Energy, Building Technologies Program, Contract Number DE-AI01-97EE23774; kierownik projektu: Arun Vohra.

Literatura

1. Freiburghouse A.: The MEMS microcosm: transportation, *Forbes*, April 2, 2001, www.forbes.com/asap/2001/0402/051.html.
2. Grace R.H.: *Commercialization Issues of MEMS/MST/ Micromachines: An Updated Industry Report Card on the Barriers to Commercialization*. NSF Nanotechnology Manufacturing Workshop, Birmingham, Ala. Jan. 5, 2003, www.nano.neu.edu/pdf/NSF_Workshop_pdf/Grace_RogerGraceAssociates.pdf
3. Rittersma Z.M.: Recent achievements in miniaturized humidity sensors — a review of transduction techniques, *Sensors and Actuators A96*, 2002, str.196–207.
4. Payne W.V.: Personal communication. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Md., 2004.
5. Martin B.A., Wenzel S.W., White R.M.: Viscosity and density sensing with ultrasonic plate waves, *Sensors and Actuators A21–A23*, 1990, str. 704–708.
6. Chan J.: Private communication. Boston Microsystems, Inc., Woburn, Mass., 2003.
7. Sentron, Integrated Sensor Technology. 2003. *General Information about ISFET Technology*. www.sentron.nl/index.php?iRubrikID=4218&exthov=0311100206.
8. Breuer K.: *MEMS Sensors for Aerodynamic Applications — the Good, the Bad (and the Ugly)*. AIAA 2000-0251, 38th Aerospace Sciences Meeting & Exhibition, Reno, 2000.
9. Padmanabhan A.: *Silicon Micromachined Sensors and Sensor Arrays for Shear-Stress Measurements in Aerodynamic Flows*.

- Ph.D. Thesis, Department of Mechanical Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Mass., 1997, http://raphael.mit.edu/Technical_Reports/Padmanabhan_Thesis.pdf.
10. ASHRAE. 2004, *Field performance assessment of package equipment to quantify the benefits of proper service (1274-TRP)*, Research Project, TC 7.5, Smart Building Systems.
 11. Rossi T.: Personal communication. Field Diagnostic Services, Inc. Langhorn, Pa., 2004.
 12. Proctor J.: Residential and small commercial central air conditioning; rated efficiency isn't automatic, Presentation at the *Public Session. ASHRAE Winter Meeting*, Anaheim Calif. Jan. 26, 2004.
 13. Breuker M.S., Braun J.E.: Common faults and their impacts for rooftop air conditioners, *International Journal of HVAC&R Research*. 4(3), 1998, str. 303–318.

Tłumaczenie z języka angielskiego:
Dariusz J. BUTRYMOWICZ

WYTWARZANIE CZUJNIKÓW MEMS

Układy, które tworzą czujniki MEMS, są wytwarzane dzięki możliwościom technologii mikroobróbki silikonów oraz innych materiałów, zachodzącej począwszy od skali rzędu milimetrów do mikroskali (od 10^{-3} m do 10^{-6} m), przy wykorzystaniu procesów stosowanych w przemyśle elektronicznym. Dzięki zastosowaniu tych technologii możliwe jest zbudowanie, rozrost, cięcie oraz łączenie bardzo małych elementów, które mogą zostać zintegrowane tak, że utworzą urządzenie wykonujące określone zadania.

Przemysł silikonowy koncentruje się na uzyskaniu zdolności do produkcji ogromnych ilości sztuk w postaci

układów zawierających całe serie jednostek. Czujniki są wytwarzane jednocześnie poprzez wykonanie wielu operacji jednostkowych na silikonowym wafle. Po zakończeniu procesu produkcyjnego, wafel ów zostaje pocięty na poszczególne jednostki sekcyjne, zwane kośćmi, z których każda zawiera indywidualne urządzenie (przetwornik). Zakres średnic tych wafli wynosi od 50 mm do 450 mm. Zazwyczaj mniejsze wafle, o średnicach z zakresu od 50 do 100 mm, są stosowane w celach badawczych, zaś wafle o większych średnicach – są stosowane w masowej produkcji przetworników. Wymagane procesy produkcyjne mogą być często bardzo kosztowne, jednak koszty te rozkładają się na ogromną ilość kości zawartych na jednym wafle. W rezultacie – koszt jednostkowy poszczególnych przetworników jest bardzo niski przy produkcji ogromnej ich ilości.

Najbardziej rozpowszechnione procesy produkcyjne obejmują fotolitografię, mikroobróbkę powierzchni, mikroobróbkę objętościową oraz spajanie. Fotolitografia należy do najważniejszych dostępnych procesów. Jest to proces, w którym wzór jest przenoszony na wafel poprzez wykorzystanie światła i materiałów światłoczułych. Podstawy tego procesu są znane od stuleci. Wymaga on jedynie źródła światła, maski (czyli obiektu składającego się z przezroczystych oraz nieprzezroczystych sekcji) oraz materiału światłoczułego. W zaawansowanym procesie produkcyjnym, światło o określonej długości fali jest przepuszczane przez maskę na wafel pokryty światłoczułym polimerem, zwanym fotomaską. Jeśli fotomaska zostanie poddana ekspozycji światła, wówczas w miejscach naświetlonych będzie ona cieńsza niż w miejscach niepoddanych ekspozycji, i w ten sposób może ona zostać całkowicie usunięta.

Mikroobróbka powierzchni polega na zbieraniu lub dodawaniu cienkich warstw materiału drogą wytrawiania lub osadzania. Z kolei mikroobróbka objętościowa polega na usuwaniu znacznie obszerniejszej oraz głębszej warstwy materiału. Realizuje się ją po-

przez ekspozycję materiału na reaktywną cieć, gaz lub plazmę. Proces ten można prowadzić izotropowo lub dokonywać jego modyfikacji w określonym kierunku (tj. anizotropowo). Wytrawianie anizotropowe jest procesem najczęściej stosowanym, w którym w sposób selektywny usuwa się atomy silikonu z sieci krystalicznej w zależności od ich w niej orientacji; rezultatem tej obróbki jest powierzchnia, której gładkość osiąga doskonałość na poziomie atomowym. Równie często jest stosowane wytrawianie za pomocą plazmy, gdzie następuje anizotropowe cięcie promieniem światła.

Warstwy wykonane z różnych materiałów (metali, azotków, tlenków oraz polimerów) mogą być osadzane na wafle. Również można wprowadzać domieszki do silikonu poprzez zastosowanie różnych technologii implantacji oraz dyfuzji, aby selektywnie oraz lokalnie zmienić mechaniczne lub elektryczne własności silikonu. Innym materiałem powszechnie stosowanym jest powstały w sposób naturalny dwutlenek krzemu (SiO_2), który charakteryzuje się innymi własnościami mechanicznymi, elektrycznymi, chemicznymi oraz cieplnymi niż silikon i może być z łatwością formowany oraz usuwany z silikonu.

Spajanie jest również ważnym procesem stosowanym w produkcji czujników MEMS. Bez możliwości spajania, praktycznie nie byłaby możliwa produkcja skomplikowanych trójwymiarowych układów. Technologia spajania pozwala również na wytwarzanie niezależnych części układów na różnych kościach oraz ich łączenie w celu uzyskania układów bardziej złożonych.

Połączenie tych procesów (oraz innych bardziej specyficznych technologii) pozwala na produkcję wielu różnorodnych mikroskopowych układów niezbędnych do budowy czujników MEMS o pożądanym funkcjach.

