

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ

- A – powierzchnia tensometru
- C_k – pojemności kształtki czujnika kwarcowego
- d – gęstość właściwa
- E – moduł Younga
- F – siła
- f – częstotliwość
- f_0 – częstotliwość rezonansowa
- H_v – twardość wg Knoppa
- k – wektor falowy
- K – stała piezoelektryczną
- l – długość tensometru
- R_m – wytrzymałość mechaniczna
- p – ciśnienie
- p_t – ciśnienie dynamiczne
- p_s – ciśnienie całkowite
- p_{st} – ciśnienie statyczne
- p_{am} – amplituda ciśnienia akustycznego
- R_a – rezystancja rezonansowego obwodu zewnętrznego
- Q – ładunek elektryczny
- S – powierzchnia
- t – czas
- U – napięcie
- V_0 – prędkość przepływu
- α – współczynnik rozszerzalności cieplnej
- $^*\alpha_{ij}$ – współczynnik czułości na naprężenia
- σ_{ij} – składowe naprężeń mechanicznych w układzie współrzędnych prostokątnych
- σ_r – składowa promieniowa naprężeń
- σ_r, σ_l – składowe naprężenia poprzeczną i wzdłużną.
- λ – współczynnik przewodnictwa cieplnego
- ρ – rezystywność materiału
- π_r, π_l – współczynniki w kierunku odpowiednio wzdłużnym i poprzecznym
- ν – współczynnik Poissona

1. WSTĘP

Jakkolwiek może to zabrzmieć zbyt patetycznie, to w warunkach ziemskich trudno sobie wyobrazić sytuację, w której ciśnienie nie oddziaływałoby na materię zarównożywioną, jak i nieżywioną. Fakt ten znajduje odbicie w literaturze naukowej począwszy od XVII wieku. Potwierdza to spostrzeżenie zaczerpnięte z listu Evangelisty Torricelliiego pisanego w 1664 roku do Michelangela Ricci: „Żyjemy zanurzeni w oceanie powietrza i wiemy, dzięki niepodważalnym doświadczeniom, że powietrze ma ciężar” [129]. Od tego czasu datuje się nieprzerwane zainteresowanie zjawiskiem ciśnienia – zarówno teorią, jak i metodami jego pomiaru. Obserwowany w XX wieku szybki rozwój cywilizacyjny stał się stymulatorem niezwykle dynamicznego rozwoju metod i technik pomiarowych. Szczególnie upowszechnienie elektronicznego przetwarzania informacji (technik komputerowych) wymusiło gwałtowny rozwój technologii czujników wielkości nieelektrycznych, które stały się „zmysłami” większości inteligentnych systemów pomiarowych. Zagadnienie pomiaru ciśnienia jako wielkości wskazującej na poprawność lub niepoprawność działania organizmów żywych, instalacji przemysłowych czy prognozowania zjawisk przyrodniczych stało się więc jedną z najbardziej dynamicznie rozwijających się dziedzin metrologii. W ostatnich dwóch dekadach obserwuje się duże zainteresowanie pracami badawczymi tak konstrukcyjnymi, jak i technologicznymi, dotyczącymi czujników ciśnienia, a także ich aplikacjami w takich dziedzinach jak motoryzacja, medycyna, przemysł spożywczy czy ochrona środowiska.

Z wymienionych wyżej powodów autorka podjęła próbę metodologicznego przedstawienia zagadnień związanych z przyrządami do pomiaru ciśnienia, zwłaszcza zasad ich działania, technologii wytwarzania oraz przystosowania do różnorodnych zastosowań. Niniejsza monografia składa się z sześciu rozdziałów. W rozdziale 2 przedstawiono podstawowe definicje, jednostki, rodzaje ciśnień, zjawiska (metody) wykorzystywane do pomiaru ciśnień oraz ogólną klasyfikację przyrządów do pomiarów ciśnień.

W rozdziale 3 omówiono materiały, konstrukcje i technologie stosowane do wytwarzania czujników ciśnienia, ze szczególnym uwzględnieniem najnowszych osiągnięć technologicznych m.in. mikromechaniki krzemowej. W rozdziale tym poświęcono szczególną uwagę technologiom montażu czujników ciśnienia oraz możliwościom ich zastosowań. Zostało to spowodowane faktem, że w przeciwieństwie do produkcji struktur czujników (szczególnie krzemowych), montaż czujników w obudowach własnej konstrukcji i oferowanie ich do nietypowych aplikacji nie wymaga zbyt dużych nakładów finansowych. Prace tego typu można wykonywać nawet w niedużych, specjalizowanych firmach. Jak wykazały wieloletnie obserwacje rynku, zakup czujników w postaci struktur, a następnie wykonanie montażu w specjalizowanej firmie jest metodą pozwalającą na uzyskanie najlepszych efektów ekonomicznych w tej branży, gdyż struktura czujnika stanowi na ogół nie więcej niż 10 % kosztów wytworzenia obudowanego i skalibrowanego czujnika [51].

W rozdziale 4 omówiono zagadnienia wykorzystania czujników do konstrukcji i wytwarzania przetworników ciśnienia, różnicy ciśnień i poziomu przeznaczonych do zastosowań przemysłowych. Przedstawiono konstrukcje głowic pomiarowych, układów przetwarzających, układów wejść/wyjść. Ponadto omówiono metody kompensacji błędów

przetworników, jak również metody podwyższania niektórych ich parametrów eksploatacyjnych. W rozdziale tym rozważono również problemy eksploatacyjne przetworników ciśnienia przeznaczonych do pracy w różnych obszarach zagrożeń. Zwrócono także uwagę na problemy związane z iskrobezpieczeństwem oraz ochroną czujników przed niepożądanym działaniem środowiska pomiarowego.

Rozdział 5 jest poświęcony systemom pomiarowym zawierającym przyrządy do pomiaru ciśnienia. Po krótkim omówieniu przyrządów laboratoryjnych, szczególną uwagę zwrócono na przyrządy przenośne (kalibratory ciśnienia).

W rozdziale 6 przedstawiono krótką prognozę rozwoju konstrukcji i technologii przyrządów do pomiaru ciśnienia, a także kilka uwag na temat aspektów ekonomicznych związanych z tą dziedziną. Natomiast w Załączniku autorka przedstawiła prace związane z pomiarami, w których sama brała aktywny udział.

Z uwagi na to, że literatura dotycząca montażu czujników jest publikowana głównie w języku angielskim, typowe terminy występujące w niniejszej pracy są podane w nawiasach po angielsku. Definicje polskie oraz tłumaczenia niektórych terminów oparto na wydanych przez Instytut Technologii Elektronowej słowniczku pt. „Angielskie terminy technologiczne w mikromechanice” [48].

Jak wspomniano wcześniej, intencją autorki było, aby przykłady realizacji konkretnych przyrządów pomiarowych prezentowanych w monografii były zaczerpnięte bądź z prac, w których sama brała udział, bądź z prac prowadzonych w polskich ośrodkach badawczych. Natomiast do minimum zostały ograniczone przykłady konstrukcji podobnych przyrządów wytwarzanych przez światowe firmy, gdyż są one szeroko przedstawione na powszechnie dostępnych internetowych stronach tych firm [121].

Autorka pragnie wyrazić pogląd, że ma świadomość, iż zawarte w pracy rozważania – z uwagi na interdyscyplinarność i ogromną różnorodność rozwiązań technicznych – nie wyczerpują wszystkich zagadnień tej szerokiej dziedziny. Autorka ma jednak nadzieję, że przedkładana praca okaże się interesującą i użyteczną dla osób związanych z tą tematyką badań, a może również być pomocna dla studentów odpowiednich wydziałów i kierunków szkół technicznych.

2. PODSTAWOWE DEFINICJE I METODY POMIARU CIŚNIENIA

2.1. Zarys historii pomiarów ciśnienia

W nowożytnej historii techniki pierwsze prace związane z badaniami istoty ciśnienia i metod jego pomiarów datuje się od Galileusza. W 1586 r. **Galileusz, Galileo Galilei** (1564-1642), włoski fizyk, astronom i filozof, zbudował pompę hydrostatyczną. W 1594 r. uzyskał patent na maszynę do pompowania wody z rzeki dla systemu irygacyjnego. Urządzenie działało na zasadzie strzykawki. Galileusz odkrył, że pompa może zassać wodę tylko do wysokości 10 m, jednak nie potrafił wytłumaczyć tego zjawiska.

Evangelista Torricelli (1608-1647), włoski fizyk i matematyk, uczeń Galileusza, wykazał doświadczalnie istnienie ciśnienia atmosferycznego. Rurę o wysokości 1 m hermetycznie zamkniętą z jednej strony napełnił rtęcią. Po obróceniu rury o 180 stopni, wysokość słupa rtęci zawsze opadał do tego samego poziomu (760 mm). Torricelli wytłumaczył to zjawisko siłą przyciągania ziemskiego; ponadto stwierdził, że przestrzeń nad rtęcią jest pusta i nazwał ją próżnią. Torricelli podał również prawo mówiące, że prędkości wypływu cieczy z naczynia jest zależna od wysokości słupa cieczy w tym naczyniu.

Blaise Pascal (1623-1662) w 1653 r. wytłumaczył doświadczenia Galileusza i Torricellogo, stwierdzając, że wysokość rtęci w kolumnie utrzymywana na poziomie 760 mm odpowiada ciężarowi powietrza znajdującego się powyżej. Przewidział, że wysokość słupa rtęci będzie się zmniejszać wraz ze wzrostem wysokości nad poziomem morza i na tej podstawie wyliczył ciężar powietrza.

Otto von Guericke (1602-1686), niemiecki fizyk i wynalazca, w 1650 r. wynalazł pompę próżniową, w 1654 r. wykonał doświadczenie z tzw. półkulami magdeburskimi wykazujące istnienie ciśnienia atmosferycznego. Doświadczenie polegało na wyszaniu przez pompę próżniową powietrza pomiędzy dwóch dużych metalowych półkul, pomiędzy którymi znajdował się tylko uszczelniający smar, następnie do każdej z półkul zaprzęgnięto po osiem koni, które nie były w stanie ich rozerwać. Guericke zbudował pierwszy barometr wodny, za pomocą którego wyznaczył ciśnienie powietrza i stwierdził jego zależność od wysokości nad poziomem morza i stanu pogody.

Robert Boyle (1627-1691), angielski chemik, fizyk i filozof; współtwórca nowoczesnej chemii, sformułował jedno z podstawowych praw gazowych, mówiące, że w ustalonej temperaturze objętość V danej masy gazu jest odwrotnie proporcjonalna do ciśnienia p . Prawo to nosi nazwę Boyle'a-Mariotte'a. Mariott odkrył je niezależnie od Boyle'a w 1676 r.

Louis Joseph Gay-Lussac (1778-1850), francuski fizyk i chemik, w 1802 r. sformułował jedno z podstawowych praw gazowych (prawo Gay-Lussaca) opisujące proces izobaryczny i głoszące, że objętość V danej masy gazu rośnie wprost proporcjonalnie do jego temperatury bezwzględnej T przy stałym ciśnieniu. Gay-Lussac sformułował również jedno z podstawowych praw chemicznych zwane prawem stosunków objętościowych.

Eugene Bourdon (1808-1884), francuski inżynier i przemysłowiec, skonstruował jedno z pierwszych mechanicznych urządzeń do pomiaru ciśnienia – metalowy manometr oraz jeden z typów barometrów metalowych. Wykorzystując opatentowany w 1843 r.

przez **Luciena Vidie** anemometr sprężynowy, opracował ciśnieniomierz oparty na odpowiednio wyprofilowanej, metalowej rurce, która nosi nazwę rurki Bourdona.

W 1930 r. zbudowano we Francji pierwszy przetwornik ciśnienia z sygnałem elektrycznym. Przyrząd działał na zasadzie ruchu mieszka, membrany lub rurki Bourdona, które połączone z suwakiem potencjometru, powodowały zmianę rezystancji tegoż potencjometru [21, 87].

W 1938 r. w Kalifornijskim Instytucie Technologicznym opracowano metalowe tensometry do pomiaru ciśnienia, siły i naprężeń. W 1958 r. firmy Kulite, Honeywell i Microsystem wprowadziły na rynek pierwsze komercyjne tensometry krzemowe. W 1966 r. firma Honeywell opracowała pierwszy krzemowy czujnik ciśnienia, którego cienka membrana była wytwarzana metodą drażenia elektronowego. Czujniki wykonywane według tej technologii były produkowane w Polsce w latach 70. i 80., w Mera Pnfał i OBREUS Toruń, na podstawie licencji firmy Honeywell [16].

W 1976 r. w USA przedstawiono pierwsze czujniki z membraną wykonaną metodą trawienia anizotropowego. W Polsce pierwsze czujniki z trawionymi membranami zostały opracowane i wdrożone do produkcji w połowie lat 80. przez Mera Pnfał i OBREUS Toruń. Prace nad nowymi technologiami czujników ciśnienia były prowadzone również w Instytucie Technologii Elektronowej w Warszawie oraz w Instytucie Technologii Elektronowej Politechniki Wrocławskiej [36, 121, 128]. W latach 80. i 90. ubiegłego stulecia obserwowano ogromny rozwój technologii czujników ciśnienia, szczególnie technologii krzemowych. Powstały serie czujników obejmujących zakresy ciśnień od 100 mbar do 1500 bar.

Obecnie pracuje się nad zintegrowanymi mikrosystemami pomiarowymi zawierającymi w jednej strukturze, oprócz wielu czujników różnych wielkości (ciśnienie, ciśnienie absolutne, temperatura) i elementów wykonawczych (zawory, pompki), również bardzo rozbudowane układy elektroniczne i oprogramowanie pozwalające na realizację różnorodnych funkcji i pomiarów.

2.2. Ciśnienie – podstawowe definicje i pojęcia

Przez ciśnienie rozumiemy proces oddziaływania jednego ośrodka na drugi poprzez powierzchnię oddzielającą. Kształt powierzchni może być dowolny, w szczególnym przypadku może być płaski [87]. Efektem oddziaływania ciśnienia jest siła jaką jeden ośrodek wywiera na drugi. Zgodnie z przyjętą definicją [21], ciśnienie rozumie się jako stosunek siły z jaką jeden ośrodek oddziałuje na drugi ośrodek przez elementarną powierzchnię tj.:

$$p = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{\Delta F}{\Delta S} = \frac{\Delta f}{\Delta s} \quad (2.1)$$

Jeżeli siła oddziaływania F jest rozłożona równomiernie na powierzchni S , to zależność (2.1) upraszcza się do postaci:

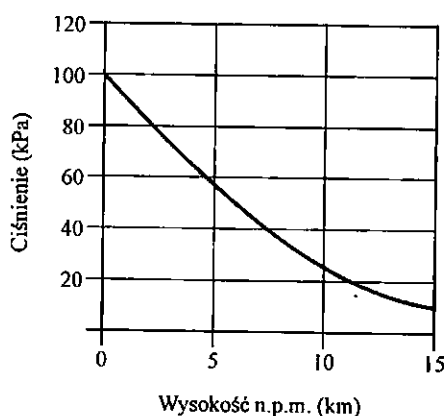
$$p = \frac{F}{S} \quad (2.2)$$

Podstawowym prawem sformułowanym dla cieczy nieściśliwych jest prawo Pascala. Zgodnie z tym prawem, ciśnienie wywierane z zewnątrz na ciecz w stanie spoczynku rozchodzi się jednakowo we wszystkich kierunkach i ma w całej objętości cieczy jednakową wartość, równą wywieranemu ciśnieniu. Parcie jest skierowane prostopadle do ścian naczynia, w którym znajduje się ciecz. Ciśnienie to nazywa się **ciśnieniem statycznym**.

Powyższa konkluzja ma również znaczenie praktyczne. Została ona wykorzystywana w wielu urządzeniach np. w hamulcach hydraulicznych czy w prasie hydraulicznej.

W warunkach ziemskich rozważania związane z ciśnieniem muszą uwzględniać powszechne oddziaływanie grawitacji. Należy w związku z tym podchodzić z rozwagą do pomiaru ciśnienia na granicy różnych ośrodków, szczególnie pamiętając, że niektóre podstawowe prawa odnoszące się do ciśnienia mogą nie uwzględniać tego zjawiska. W związku z powyższym, na ciecz znajdującą się w naczyniu, obok ciśnienia statycznego, oddziałuje również **ciśnienie hydrostatyczne** wywołane ciężarem cieczy. Jego wartość jest zależna tylko od słupa cieczy (głębokości zanurzenia) i jej ciężaru właściwego. Ciśnienie wywierane na dno naczynia nie zależy od kształtu naczynia. Stwierdzenie to nazywa się paradoksem hydrostatycznym [9, 21]. Jak stwierdzono powyżej, w pomiarach ciśnienia należy pamiętać o powszechnym działaniu siły grawitacji, co jest szczególnie istotne przy pomiarach zależnych od pomiaru ciężaru. W praktyce poprawki związane z wpływem przyciągania ziemskiego na wynik pomiaru ciśnienia muszą być brane pod uwagę jedynie przy bardzo dokładnych pomiarach wykonywanych wzorcami pierwszego rzędu.

Przedstawione wyżej rozważania dotyczyły cieczy nieściśliwych. W przypadku gazów (z uwagi na ich ściśliwość oraz zdolność do wypełniania całej objętości zamkniętych zbiorników) obliczenia są bardziej skomplikowane. Przykładem ściśliwości gazów jest nieliniowa zmiana ciśnienia atmosferycznego wraz z wysokością, co zilustrowano na rys. 2.1.



Rys. 2.1. Zmiana ciśnienia atmosferycznego zależnie od wysokości nad poziomem morza

W funkcji opisującej ciśnienie w dziedzinie czasu, można wyróżnić składową stałą (ciśnienie statyczne) i składową zmienną nazywaną **ciśnieniem dynamicznym**. W praktyce uważa się, że ciśnienie dynamiczne powstaje w płynach, w których pojawia się ruch (przepływ). Jest ono zależne od kinetycznej energii płynu:

$$p_d = \rho V_0^2 / 2 \quad (2.3)$$

gdzie: ρ jest gęstością płynu; V_0 – prędkością przepływu.

Wykorzystywane wyżej pojęcie płynu jest pojęciem ogólnym odnoszącym się zarówno do cieczy, jak i gazów. Podstawową teorią traktującą o pomiarach ciśnienia dynamicznego jest teoria Bernoulliego, zgodnie z którą dla przepływu równoległego do osi symetrii rurociągu, można podać:

$$p_s = p_{st} + p_d \quad (2.4)$$

gdzie: p_s jest ciśnieniem całkowitym; p_{st} – ciśnieniem statycznym; p_d – ciśnieniem dynamicznym.

Powyższa zależność jest wykorzystywana do określania prędkości przepływu płynów przy wykorzystaniu pomiaru różnicy ciśnień. Klasycznym przykładem pomiaru ciśnienia, w którym istotna jest jego składowa zmienna, jest pomiar ciśnienia krwi, w którym składowa zmienna ciśnienia niesie użyteczne dla lekarza informacje.

Innym przykładem ciśnienia dynamicznego jest powszechnie występujące **ciśnienie akustyczne**. Ciśnienie akustyczne jest to ciśnienie wywołane drganiami akustycznymi w ośrodku płynnym, będące różnicą między wartością chwilową ciśnienia $p(t)$ w określonym punkcie ośrodka a wartością średnią ciśnienia w stanie równowagi ośrodka, równą ciśnieniu statycznemu p_{st} .

$$p_a(t) = p(t) - p_{st} \quad (2.5)$$

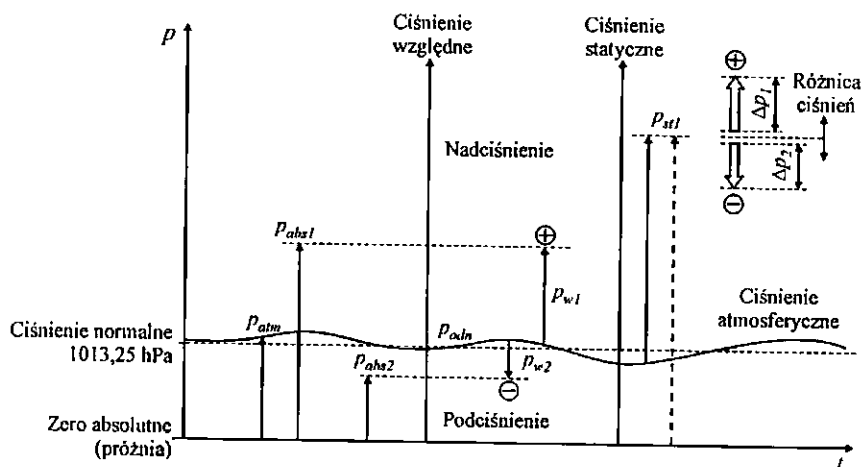
Ciśnienie akustyczne w danym punkcie ośrodka zależy od rodzaju wywołujących je drgań akustycznych. W najprostszym przypadku, tzn. dla drgań akustycznych sinusoidalnych o częstotliwości f , ciśnienie akustyczne zależy od czasu t

$$p_a(t) = p_{am} \sin 2\pi ft \quad (2.6)$$

gdzie p_{am} jest amplitudą ciśnienia akustycznego.

Relatywne pomiary ciśnień

Pomiary ciśnienia mają charakter względny (relatywny), co oznacza, że w danym punkcie pomiarowym mierzone ciśnienie jest odniesione do innego ciśnienia, zwanego ciśnieniem odniesienia. Ciśnieniem odniesienia może być ciśnienie atmosferyczne, ciśnienie absolutne lub ciśnienie w jakiejś zamkniętej objętości. Na rys. 2.2 przedstawiono różne rodzaje ciśnień zależnie od punktu odniesienia.



Rys. 2.2. Rodzaje ciśnień i związki pomiędzy nimi

W metrologii wyróżniamy następujące rodzaje ciśnień:

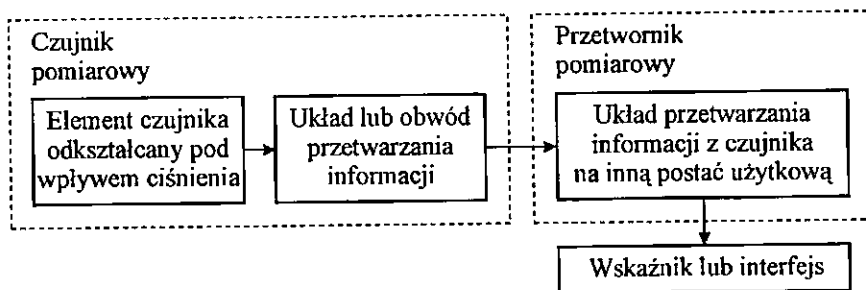
- **ciśnienie absolutne** – jest to ciśnienie wyznaczone względem próżni absolutnej;
- **ciśnienie atmosferyczne** – (barometryczne) jest to ciśnienie jakie wywiera na powierzchnię kuli ziemskiej otaczająca ją atmosfera; ciśnienie barometryczne jest zależne od położenia geograficznego, wysokości nad poziomem morza i dynamiki zmian atmosfery;
- **nadciśnienie** – jest to „nadwyżka” ciśnienia ponad ciśnienie atmosferyczne;
- **podciśnienie** – jest to niedobór ciśnienia względem ciśnienia atmosferycznego;
- **różnica ciśnień** – jest to różnica ciśnień pomiędzy ciśnieniami określonymi w dwóch punktach pomiarowych. Poziomem odniesienia jest z reguły ciśnienie niższe.

Ponadto przy niektórych rodzajach pomiarów można wyróżnić pewne, szczególne rodzaje ciśnień np. ciśnienie słupa wody przy pomiarach hydrostatycznych. Innym rodzajem specyficznego ciśnienia jest ciśnienie statyczne występujące w rurociągach i mające wpływ na pomiar przepływu w tych rurociągach.

Przez określenie **pomiar ciśnienia** rozumie się wyznaczenie wartości ciśnienia za pomocą ciśnieniomierza. Na rys. 2.3 przedstawiono ogólny schemat przyrządu do pomiaru ciśnienia.

Wyodrębnienie poszczególnych elementów składowych typowego ciśnieniomierza stwarza pewne trudności z uwagi na niejednoznaczne używanie terminów i nazw do poszczególnych jego części zarówno w literaturze, jak i katalogach handlowych. Szczególnie dotyczy to czujników krzemowych, w których istnieje możliwość integracji kilku elementów składowych czujnika w jednej strukturze czujnika. W skrajnym przypadku wszystkie przedstawione na rys. 2.3 elementy mogą być zintegrowane w jednej strukturze czujnika, a taki przyrząd przybiera nazwę mikrosystemu pomiarowego.

Na potrzeby niniejszej pracy zaproponowano schemat przyrządu do pomiaru ciśnienia składający się z następujących bloków (rys. 2.3.): czujnika ciśnienia, układów przetwarzania informacji (sygnałów) z czujnika oraz układów interfejsu i wskaźników.



Rys. 2.3. Ogólny schemat przyrządu do pomiaru ciśnienia

Podstawowym blokiem pomiarowym czujnika ciśnienia (*pressure sensor*) jest element przetwarzający ciśnienie na użyteczny sygnał pomiarowy. W większości czujników elektronicznych struktura czujnika (*chip*) składa się z elementu odkształcanego przez ciśnienie oraz układu przetwarzającego to przekształcenie na sygnał elektryczny. Przykładem takiego rozwiązania są piezorezystory zmieniające swą rezystancję pod wpływem działającego na nie odkształcenia mechanicznego. W wielu zastosowaniach bezpośredni sygnał z czujnika wymaga dodatkowego przetworzenia na inny sygnał np. związany z konkretną aplikacją (np. sygnał stałoprądowy 4 – 20 mA), tworząc przetwornik pomiarowy (*transducer* lub *transmitter*). Przetwornik ciśnienia jest z reguły wyposażony w elementy odczytowe (wskaźnik) oraz w odpowiednie interfejsy.

Na podstawie dotychczasowych rozważań można sformułować wniosek, że pomiar ciśnienia jest pomiarem porównawczym. Z reguły mierzone ciśnienie jest określane względem ciśnienia wzorcowego mierzonego za pomocą ciśnieniomierza o wyższej dokładności (etalonu). Zakłada się, że dokładność przyrządu wzorcowego powinna być co najmniej 3 razy wyższa od dokładności przyrządu wzorowanego [21].

Podstawową jednostką ciśnienia w układzie SI jest paskal: $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N}/1 \text{ m}^2$, gdzie w układzie SI: N (niuton) jest jednostką siły, m (metr) – jednostką długości. W praktyce, najczęściej są używane wielokrotności tej jednostki, m.in. hPa, kPa, MPa, GPa. W wielu

obszarach aplikacyjnych używane są nadal jednostki spoza układu SI, np. bar, mmHg przy pomiarze ciśnienia krwi. Wartość ciśnienia może być również kryterium rodzaju pomiaru [21]:

- pomiary w zakresie próżni (do 2500 Pa),
- pomiary bardzo niskich ciśnień – mikromanometria (do 6000 Pa),
- pomiary niskich ciśnień (do 0,25 MPa),
- pomiary średnich ciśnień (do 60 MPa),
- pomiary wysokich ciśnień (do 4000 MPa),
- pomiary bardzo wysokich ciśnień (powyżej 4000 MPa).

2.3. Metody pomiaru i klasyfikacja przyrządów do pomiaru ciśnienia

Metody pomiaru ciśnienia można podzielić na dwie podstawowe grupy, a mianowicie:

- metody bezpośrednie, w których ciśnienie (wielkość wejściowa) jest bezpośrednio przetwarzane na inną wielkość, bez konieczności stosowania dodatkowych źródeł zasilających,
- metody pośrednie, (parametryczne), w których czujnik pod wpływem zmian ciśnienia zmienia jeden ze swoich parametrów kosztem energii dostarczanej z zewnętrznego źródła.

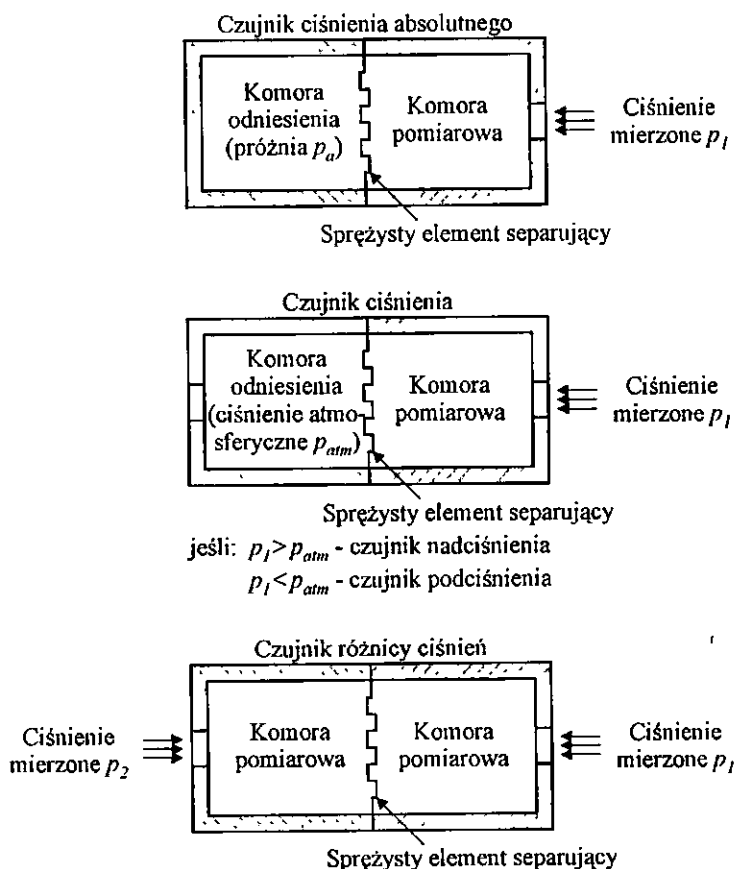
Podstawowym elementem wykorzystywanym do pomiaru ciśnienia jest czujnik (*pressure sensor*), który wywierane na niego ciśnienie przekształca na odpowiedni, użyteczny sygnał; najczęściej jest to sygnał elektryczny. Sygnał ten może być następnie traktowany jako źródło informacji w układach pomiarowych lub sygnalizacyjnych. Ze względu na dużą różnorodność czujników wykorzystywanych w różnego rodzaju urządzeniach i systemach pomiarowych, ich klasyfikacja jest zadaniem dość złożonym. Klasyfikację tę najczęściej przyprawdza się według następujących kryteriów:

- kryterium rodzaju mierzonego ciśnienia (m.in. czujniki ciśnienia, różnicy ciśnień, ciśnienia absolutnego),
- kryterium wykorzystywanego zjawiska fizycznego (m.in. zjawisko piezorezystancji, piezoelektryczne, pojemnościowe),
- kryterium technologii wykonania (mikromechaniczne półprzewodnikowe, cienko- i grubo warstwowe, kwarcowe),
- kryteria metrologiczne (wzorcowe, techniczne itp.).

2.3.1. Kryterium rodzaju mierzonego ciśnienia

Struktury czujników stosowanych do pomiaru zależnie od rodzaju mierzonego ciśnienia pokazano na rys. 2.4.

Czujnik ciśnienia można przedstawić schematycznie w postaci dwóch oddzielonych hermetycznie od siebie komór, tj. komory pomiarowej i komory odniesienia. Elementem oddzielającym jest na ogół element sprężysty, który ugina się pod wpływem działającego ciśnienia.



Rys. 2.4. Schemat budowy czujników ciśnienia zależnie od rodzaju mierzonego ciśnienia

Rodzaj czujnika ciśnienia można w tym przypadku określić zależnie od rodzaju ciśnienia działającego na komorę lub komory czujnika:

- czujnik ciśnienia absolutnego, w którym p_1 jest ciśnieniem mierzonym, p_2 – ciśnieniem absolutnym,
- czujnik nadciśnienia, w którym p_1 jest ciśnieniem mierzonym, p_2 – ciśnieniem atmosferycznym,
- czujnik podciśnienia, w którym p_1 jest ciśnieniem atmosferycznym, p_2 – ciśnieniem mierzonym,
- czujnik różnicy ciśnień, w którym mierzona jest różnica pomiędzy dwoma ciśnieniami p_1 i p_2 . W przypadku czujników różnicy ciśnień, z reguły przyjmuje się, że ciśnienie mierzone wywierane na komorę pomiarową ma większą wartość od ciśnienia wywieranego na komorę odniesienia.

2.3.2. Kryterium wykorzystywanego zjawiska fizycznego

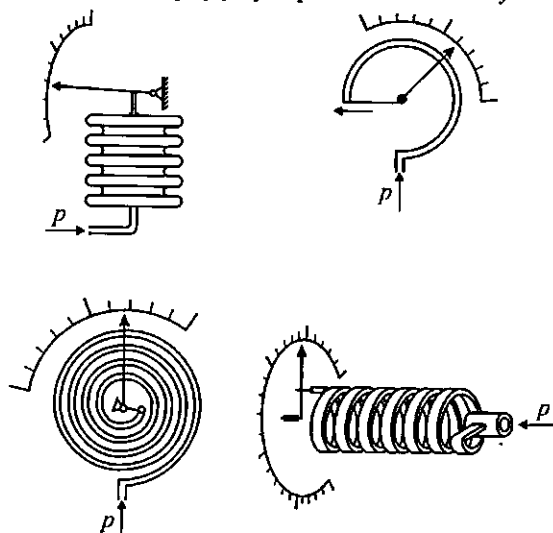
Zjawiskami fizycznymi najczęściej wykorzystywanymi do pomiaru ciśnienia są odkształcenia mechaniczne, zjawisko piezorezystancji, zjawisko piezoelektryczne, zmiana częstotliwości drgań. Odpowiednio czujnikami wykorzystującymi te zjawiska są:

- czujniki mechaniczne, w których zmiana położenia elementu sprężystego pod wpływem działania ciśnienia powoduje przesunięcie wskazania przyrządu,
- czujniki piezoelektryczne,
- czujniki piezorezystancyjne,
- czujniki pojemnościowe,
- czujniki częstotliwościowe,
- czujniki ultradźwiękowe.

Poniżej omówiono najczęściej wykorzystywane rodzaje czujników i przedstawiono charakterystyczne dla każdej grupy przykłady rozwiązań konstrukcyjnych.

2.3.2.1. Czujniki mechaniczne

Zasadniczym elementem konstrukcyjnym czujników mechanicznych jest element sprężysty, który pod wpływem działania ciśnienia ulega przesunięciu lub odkształceniu. Wielkość powstającego odkształcenia lub przesunięcia jest miarą ciśnienia. Według tej zasady działają: membrany, rurki Bourdona i różnego rodzaju mieszki. Elementy sprężyste powinny być wytwarzane z materiałów o odpowiedniej sprężystości oraz charakteryzujących się znikomym pełzaniem i małą histerezą. Ponadto efekty procesu starzenia powinny być niezauważalne w okresie eksploatacji. Przykładami takich materiałów są m.in. stal martenzytyczna, stopy miedzi (brąz, mosiądz), a także kwarc [94]. Przykłady typowych konstrukcji mechanicznych elementów sprężystych przedstawiono na rys. 2.5.



Rys. 2.5. Typowe konfiguracje konwencjonalnych mechanicznych elementów sprężystych [21]

Najprostszym przykładem czujnika mechanicznego zintegrowanego z mechanicznym układem przekazywania informacji jest szeroko wykorzystywany w pomiarach ciśnienia aneroid. W przyrządzie tym nie występuje elektroniczny blok przekazywania informacji, a rolę wskaźnika spełnia wskazówka z odpowiednią podzielną. Innym przykładem elementów sprężystych jest membrana, która może być zintegrowana z kondensatorem różnicowym, którego wartość pojemności zależy od odkształcenia membrany spowodowanego zmianą działającego na nią ciśnienia. Kolejnym sposobem wykorzystania odkształcenia membrany jest zmiana kąta odbicia padającego na nią promienia świetlnego.

2.3.2.2. Czujniki piezoelektryczne

Zjawiskiem fizycznym wykorzystywanym w czujnikach piezoelektrycznych jest efekt piezoelektryczny polegający na pojawieniu się ładunku elektrycznego na elektrodach, pomiędzy którymi znajduje się deformowany kryształ (np. pod wpływem zmian ciśnienia). Efekt ten tłumaczy się przesunięciem ładunku jonowego spowodowanego odkształceniami siatki krystalograficznej materiału wykazującego właściwości piezoelektryczne. Zjawisko piezoelektryczne jest odwracalne, to znaczy, że pojawienie się na ściankach materiału piezoelektrycznego napięcia spowoduje powstanie w tym materiale mechanicznych odkształceń.

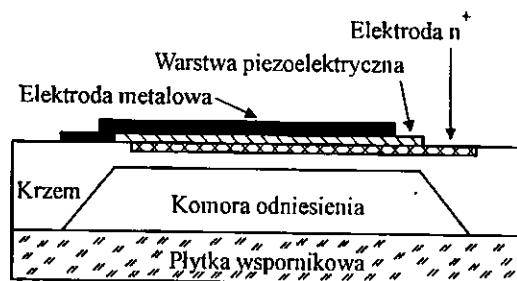
Materiałami, które wykazują właściwości piezoelektryczne są kryształy tytanianu baru (BaTiO_3) stosowane do wytwarzania czujników niskich ciśnień, soli Seignette'a ($\text{NaKC}_4\text{H}_4\text{O}_6$) – do czujników bardzo wysokich ciśnień. Jednak najczęściej używanym w technice materiałem jest kwarc (SiO_2).

Właściwości czujnika piezoelektrycznego zależą od rodzaju cięcia kryształu kwarcu, dzięki czemu zależnie od zastosowania można maksymalizować czułość czujników lub minimalizować wpływ temperatury na jego parametry. Czujniki piezoelektryczne mogą pracować w różnych układach: przy działaniu dużych sił kryształ poddaje się naprężeniom ściskającym, przy mniejszych siłach stosuje się zginanie lub skręcanie płytek [21]. Należy jednak pamiętać, aby naprężenia w płytce kwarcowej były tak wytwarzane, aby nie tłumiły jej drgań.

Typowy czujnik piezoelektryczny składa się z dwóch grzebieniowych (międzypalczastych) przetworników (*interdigital transducer*). Jeden z nich przekształca energię elektryczną na mechaniczną energię fal, a drugi z powrotem przekształca mechaniczną energię fal na energię pola elektrycznego.

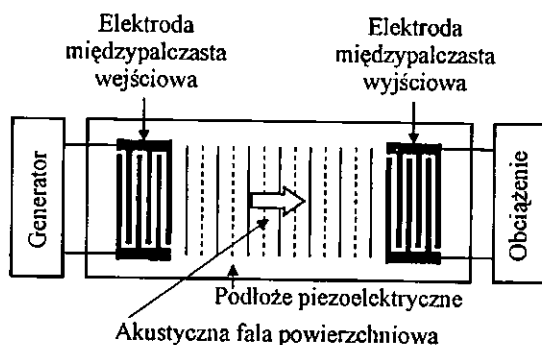
Generalnie można wyróżnić dwa rodzaje czujników piezoelektrycznych: czujniki z objętościowymi falami akustycznymi i czujniki z powierzchniowymi falami akustycznymi. W pierwszym przypadku propagacja fali odbywa się pomiędzy górną a dolną powierzchnią płytki. Zmiany napięcia pomiędzy elektrodami umieszczonymi pomiędzy tymi powierzchniami są spowodowane zmianami naprężeń generowanych w płytce. Zaletami czujników z objętościową falą akustyczną jest dobra stabilność temperaturowa, dobra odporność na oddziaływanie środowiska pomiarowego (w tym cieczy). Typowo czujniki takie mogą pracować w zakresie częstotliwości 5 – 30 MHz. Zwiększenie częstotliwości można uzyskać poprzez zmniejszanie grubości płytek piezoelektrycznych,

jednak poniżej pewnych grubości płytki stają się zbyt delikatne mechanicznie, co znacznie utrudnia ich produkcję i montaż. Problem ten rozwiązuje się poprzez wykorzystanie technologii mikromechaniki krzemowej. Na rys. 2.6 przedstawiono konstrukcję piezoelektrycznego czujnika ciśnienia wykonanego w takiej technologii. Na cienkiej membranie krzemowej została naniesiona warstwa piezoelektryczna, na której naniesiono metodą napylania elektrodę grzebieniową służącą do pobudzenia fal akustycznych w czujniku.



Rys. 2.6. Przykład konstrukcji piezoelektrycznego czujnika ciśnienia wykonanego w technologii mikromechaniki krzemowej

Czujniki w zakresie większych częstotliwości (25 – 500 MHz) wytwarza się obecnie przy wykorzystaniu akustycznych fal powierzchniowych (SAW – *surface acoustic wave*). Akustyczne fale powierzchniowe (AFP) zostały odkryte przez lorda Rayleigha w 1887 r. Uzyskanie fal Rayleigha na powierzchni płytki wymaga pobudzenia tej powierzchni w taki sposób, aby zostały wytworzone dwie składowe fale: poprzeczna i podłużna, które są przesunięte wzajemnie o 90°. Warunki takie można stworzyć za pomocą pola elektrycznego przyłożonego w odpowiedni sposób do powierzchni płytki piezoelektrycznej, odpowiednio wyciętej do osi krystalograficznych [97]. Na rys. 2.7 przedstawiono schematycznie konstrukcję piezoelektrycznego czujnika z akustyczną falą powierzchniową zbudowanego na podłożu kwarcowym.



Rys. 2.7. Zarys konstrukcji piezoelektrycznego czujnika z akustyczną falą powierzchniową zbudowanego na podłożu kwarcowym

Podstawowym elementem konstrukcyjnym jest kształtka wykonana z materiału o silnych właściwościach piezoelektrycznych. Odkształcenie kształtki powoduje powstanie ładunku na elektrodach czujnika $Q = KF$ oraz napięcia $U = KF/C$, gdzie: K jest stałą piezoelektryczną, C – sumą pojemności kształtki (C_k) i obwodu połączonego z elektrodami kształtki (C_p). Naładowane podczas odkształcenia elektrody rozładowują się przez rezystancję obwodu zewnętrznego tak, że mimo dalszego działania siły napięcie po odpowiednio długim czasie zanika. W związku z tym czujniki te mogą pracować jedynie w warunkach działania ciśnień dynamicznych [21]. Warunkiem prawidłowego wykonania pomiaru jest separacja elektryczna czujnika od współpracującego z nim przetwornika. Innymi słowy, dołączenie układu przetwornika nie powinno wpływać na wielkość i rozkład ładunków na jego elektrodach. Używając terminologii układów elektronicznych, współpracujący z czujnikiem piezoelektrycznym układ elektroniczny powinien charakteryzować się nieskończenie dużą impedancją wejściową. Typowym przykładem elementu elektronicznego stosowanego w takim przypadku jest tranzystor polowy z izolowaną bramką typu MOS.

Zaletami czujników piezoelektrycznych są: duża częstotliwość odpowiedzi, duży sygnał wyjściowy, niewielkie wymiary, zwarta i lekka konstrukcja, odporna na oddziaływanie środowiska pomiarowego. Ponadto, czujniki piezoelektryczne mogą pracować bez zakłóceń nawet do 500 °C. Ważną zaletą wyżej opisanych rezonatorów jest ich stosunkowo prosta konstrukcja mechaniczna oraz fakt, że struktura rezonatora znajduje się tylko po jednej stronie płytki kwarcowej. Dzięki temu druga strona płytki może być poddawana działaniu czynników zewnętrznych bez groźby uszkodzenia rezonatora. Sam kwarc jako materiał czujnika ma niewątpliwe zalety takie jak doskonałe właściwości mechaniczne i wysoka odporność chemiczna. [96, 97].

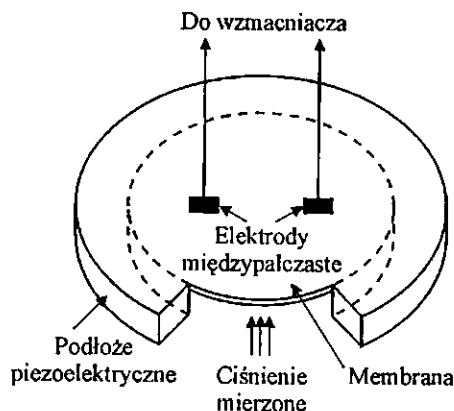
Wykorzystanie rezonatorów do budowy czujników umożliwia fakt, że akustyczna fala powierzchniowa (AFP) jest wrażliwa na warunki fizyczne panujące na powierzchni piezoelektryka. Można tę właściwość wykorzystać do skonstruowania czujników takich wielkości jak: temperatura, ciśnienie, siła czy przyspieszenie. Można również, po naniesieniu odpowiedniej warstwy chemoczułej, konstruować różnego rodzaju czujniki chemiczne lub bioczujniki. Zmiana warunków propagacji fali powierzchniowej prowadzi do zmiany jej prędkości rozchodzenia, co może być mierzone jako zmiana opóźnienia sygnału odbitego lub zmiana częstotliwości rezonansowej rezonatora.

Przykładową konstrukcję czujnika ciśnienia wykonanego w postaci okrągłej membrany kwarcowej, na powierzchni której naniesiono dwie struktury rezonatorowe przedstawiono na rys. 2.8 [97, 130].

Częstotliwość drgań rezonatora AFP zależy między innymi od występujących w podłożu naprężeń mechanicznych. Zależność tę można wyrazić wzorem:

$$\frac{\Delta f}{f_0} = \sum \alpha_{ij} \sigma_{ij} \quad (2.7)$$

gdzie α_{ij} jest współczynnikiem czułości na naprężenia, σ_{ij} – składowymi naprężeń mechanicznych w układzie współrzędnych prostokątnych



Rys. 2.8. Geometria okrągłej płytki z rezonatorami AFP

Wartość naprężeń w membranie sztywno zamocowanej, obciążonej ciśnieniem statycznym wyraża się wzorem [124]:

$$\sigma_r = q \left(\frac{1}{8}(2+\nu) \frac{z^3}{c^3} - \frac{3}{32}(3+\nu) \frac{r^2}{c^3} - \frac{3}{40}(2+\nu) \frac{z}{c} + \frac{3}{32}(3+\nu) \frac{a^2 z}{c^3} \right) \quad (2.8)$$

gdzie σ_r – składowa promieniowa naprężeń, $2c$ – grubość płytki, $2a$ – średnica płytki, q – jednorodne ciśnienie hydrostatyczne prostopadłe do powierzchni płytki, ν – współczynnik Poissona, z – odległość od środkowej powierzchni przekroju płytki (dla powierzchni płytki $z = c$)

Czujniki typu AFP są czujnikami pasywnymi (nie wymagają zasilania), mają niewielkie wymiary, koszty ich wytwarzania są stosunkowo niskie. Ponadto nie wymagają żadnych szczególnej ochrony przed oddziaływaniem środowiska pomiarowego. Jednak największą ich zaletą jest możliwość pracy bezprzewodowej, dzięki czemu są obecnie szeroko stosowane w ruchomych obiektach, których klasycznym przykładem jest pomiar ciśnienia w oponach samochodowych.

2.3.2.3. Czujniki tensometryczne i piezorezystancyjne

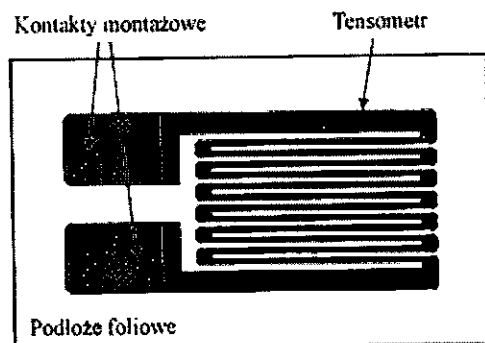
Jednym z najczęściej wykorzystywanych efektów w czujnikach ciśnienia jest zmiana rezystancji rezystora pod wpływem naprężeń powstających pod wpływem zmian ciśnienia w elemencie sprężystym, na którym ten rezystor jest umieszczony. Rezystancję rezystora wyraża klasyczna zależność:

$$R = \rho l / A \quad (2.9)$$

gdzie: ρ jest rezystywnością materiału, l – długością rezystora, A – jego powierzchnią.

Jeżeli zmiana rezystancji jest spowodowana głównie zmianami wymiarów geometrycznych rezystora, to zjawisko takie nosi nazwę: tensometryczne, a rezystor przyjmuje nazwę tensometr. Jeżeli przy zmianie rezystancji dominuje zmiana rezystywności materiału, to mamy do czynienia ze zjawiskiem piezorezystancji, a rezystor przyjmuje nazwę: piezorezystor.

Zjawisko tensometryczne najsilniej występuje w niektórych metalach. Typowy tensometr jest wykonany w postaci cienkiej warstwy metalowej w formie grzebieniowej naniesionej na podłoże sprężyste (rys. 2.9). Tensometry można umieszczać bezpośrednio na elementach sprężystych o dowolnych kształtach. W czujnikach ciśnienia jest to najczęściej cienka membrana wykonana z folii, metalu lub ceramiki.

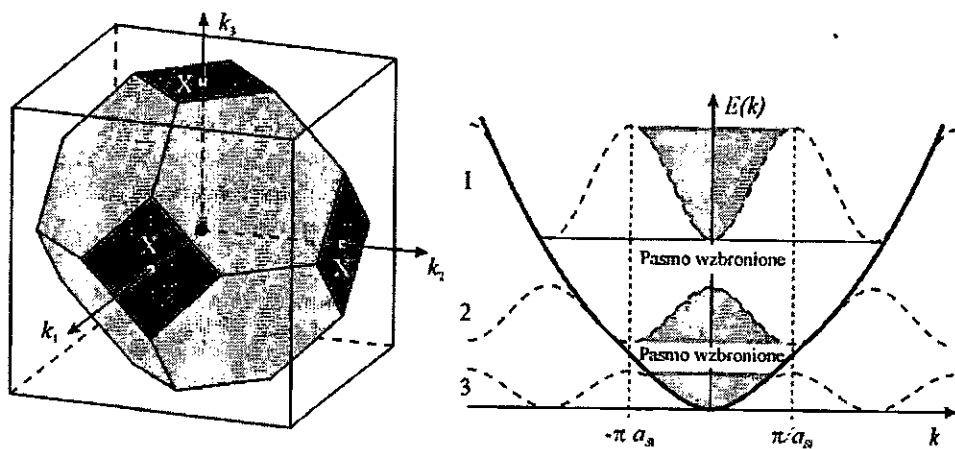


Rys. 2.9. Metalowy tensometr umieszczony na foliowym podłożu izolacyjnym [69]

Czułość tensometru oporowego jest ilorazem względnego przyrostu rezystancji ($\Delta R/R$) i względnego wydłużenia ($\Delta l/l$). Z kolei względne wydłużenie jest proporcjonalne do mechanicznego naprężenia, wyrażonego ilorazem siły przez pole powierzchni przekroju poprzecznego (F/A) i odwrotnie proporcjonalne do modułu Younga (E) materiału danej konstrukcji.

W monokrystalicznych materiałach półprzewodnikowych zmiana geometryczna piezorezystorów jest pomijalnie mała w porównaniu ze zmianami rezystywności materiału, dlatego też w tych materiałach na zmianę rezystancji rezystorów ma decydujący wpływ zjawisko piezorezystancji. Zjawisko to zostało odkryte przez Smitha z Bell Laboratories w 1954 roku [1]. Od tego czasu pojawiło się szereg prac dotyczących charakteru tego zjawiska w różnych materiałach półprzewodnikowych, przede wszystkim w krzemie [2, 3]. Szczegółowy opis zjawiska piezorezystancji wymaga szerokiego omówienia modelu pasmowego półprzewodników, co wykracza poza ramy niniejszej monografii. Poniżej zostaną przedstawione jedynie te problemy, które są niezbędne przy konstruowaniu piezorezystancyjnych czujników ciśnienia.

Na rys. 2.10 przedstawiono podstawowy wykres zależności energii elektronu E w funkcji wektora falowego k .



Rys. 2.10. Energia $E(k)$ w funkcji wektora falowego k dla krystalu krzemu

Paraboliczny przebieg funkcji energii elektronu ulega zakłóceniu przy zbliżaniu się do wartości wektora $\pm\pi/a$, gdzie a jest stałą sieciową krystalu. Zakres od $-\pi/a$ do $+\pi/a$ nazywa się pierwszą strefą Brillouina. Model pasmowy dla krzemu, w przestrzeni falowej zawartej w pierwszej strefie Brillouina ma sześć węzłów, w których występują najgłębsze minima energetyczne pasma przewodnictwa. Przy braku oddziaływania czynnika mechanicznego, minima energetyczne mają jednakową głębokość, a nośniki prądu są między nimi równo podzielone. Symetria rozkładu nośników prądu w węzłach sprawia, że mimo istnienia anizotropii ruchliwości związanej z przynależnością do określonego minimum energetycznego, sumaryczna ruchliwość nośników prądu jest wielkością izotropową. W konsekwencji, rezystancja półprzewodnika wolnego od mechanicznego naprężenia jest niezależna od kierunku sieci krystalicznej [10, 11]. Pod wpływem mechanicznego naprężenia sieć krystaliczna ulega deformacji, a wraz z nią zmieniają się wartości energii pasm w poszczególnych węzłach przestrzeni falowej. Nośniki prądu dążąc do zajęcia stanu o najniższej energii, przemieszczają się z węzłów o relatywnie wyższych energiach do węzłów o energiach relatywnie niższych. To powoduje, że pewne węzły zostają bardziej wypełnione nośnikami, a inne mniej. Konsekwencją tego zjawiska jest większy udział w przewodzeniu prądu nośników związanych z danym węzłem i ujawnienie się związanej z tym węzłem anizotropii ruchliwości. Matematyczny model oparty na pasmowej teorii ciała stałego, opisujący zjawisko piezorezystancji został zaproponowany przez Bira i Pikusa, który szczegółowo jest omówiony w [11]. Wykorzystanie tego modelu w konkretnych przykładach mechanicznego obciążenia krzemu przedstawiono w [128]. Jak stwierdzono w [128] model Bira i Pikusa z inżynierskiego punktu widzenia dostatecznie dobrze opisuje fizyczne podstawy piezorezystancji i pozwala na

zrozumienie jego istoty, a także na oszacowanie współczynników piezorezystancji dla konkretnych technologii wytwarzania czujników. Znajomość współczynników piezorezystancji jest niezbędna do projektowania czujników piezorezystancyjnych. Określają one zależność pomiędzy zmianą rezystywności materiału a naprężeniami powodującymi te zmiany. Dla membranowego piezorezystancyjnego czujnika ciśnienia, wykonanego na podłożu krzemowym o orientacji krystalograficznej (100) i typie przewodnictwa rezystorów p, uproszczona zależność czułości ma postać:

$$\Delta V/V = \pi_{44}/2 (1 - \nu)(a/h)^2 \Delta P \quad (2.10)$$

gdzie: $\Delta V/V$ jest czułością czujnika wyrażoną przez względną zmianę jego napięcia wyjściowego, ν – modułem Poissona, a wyraża połowę wymiaru boku membrany, h jest grubością membrany, natomiast ΔP jest różnicą ciśnień oddziałujących z przeciwnych stron na membranę czujnika.

Z równania tego, dla konkretnego czujnika, można wyznaczyć współczynnik π_{44} . Konkretnie dane związane z obliczaniem współczynników piezorezystancji dla konstrukcji i technologii piezorezystancyjnych czujników ciśnienia i przyspieszenia wytwarzanych w Instytucie Technologii Elektronowej w Warszawie są podane w [128].

Zjawisko piezorezystancji występuje nie tylko w monokryształach krzemu, ale również w warstwach polikrystalicznych i amorficznych. Materiał polikrystaliczny jest zbudowany z małych ziaren o budowie kryształu odseparowanych od siebie poprzez granice tych ziaren. Całkowita rezystancja warstwy składa się z rezystancji ziaren i rezystancji powstałej na ich granicy. Zaletą warstw polikrystalicznych jest możliwość uzyskania małego wpływu temperatury na parametry czujnika. Właściwości piezorezystancyjne, oprócz krzemu wykazują również inne materiały półprzewodnikowe m.in.: german typu n, antymonek galu typu p, antymonek indu typu p [3, 10].

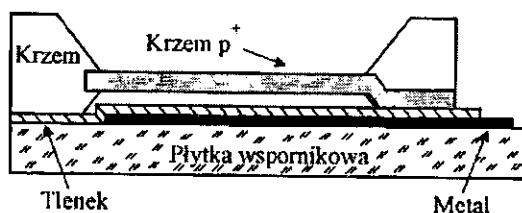
2.3.2.4. Czujniki pojemnościowe

Podstawowym elementem konstrukcyjnym czujnika pojemnościowego jest kondensator, którego pojemność zmienia się pod wpływem zmian naprężeń mechanicznych np. siły lub ciśnienia. Zmiana pojemności kondensatora może nastąpić na skutek:

- zmian położenia dielektryka względem nieruchomych okładek kondensatora,
- zmian położenia ruchomej okładki kondensatora względem drugiej, nieruchomej,
- zmian przenikalności elektrycznej dielektryka na skutek pojawiających się w nim naprężeń (tzw. czujnik elektrosprężysty).

W praktycznych zastosowaniach najczęściej jest wykorzystywana konstrukcja z odkształcanymi okładkami kondensatora. Okładki ruchome są najczęściej wykonywane jako cienka membrana uginająca się względem jednej nieruchomej elektrody (czujnik ciśnienia) lub umieszczona pomiędzy dwoma, nieruchomymi elektrodami (czujnik różnicy ciśnień) [63, 74]. Membrany czujników pojemnościowych mogą być wykonane z metalu, ceramiki lub krzemu. W czujnikach mikroelektronicznych pomiędzy elektrodami naj-

częściej jest próżnia, natomiast elektrody nieruchome są wykonywane ze szkła, na które są nanoszone cienkie warstwy elektrycznych wyprowadzeń.



Rys. 2.11. Zarys konstrukcji pojemnościowego krzemowego czujnika ciśnienia do pomiaru niskich ciśnień [131]

W porównaniu z czujnikami piezorezystancyjnymi, czujniki pojemnościowe charakteryzują się znacznie większą czułością, nawet ponad 10-krotną [121]. Dzięki temu mogą być używane do pomiaru bardzo niskich ciśnień, nawet w zakresie zbliżonym do próżni. Niestety, charakterystyki ciśnieniowe czujników pojemnościowych są nieliniowe, zwłaszcza przy większych odkształceniach. Wymaga to stosowania dodatkowych układów kompensacyjnych. Kolejnym problemem konstrukcyjnym w czujnikach pojemnościowych, jest konieczność eliminacji pojemności pasożytniczych, zarówno występujących w samej strukturze, jak i w zewnętrznych układach przetwarzających, przez co czujniki pojemnościowe wymagają dość skomplikowanych układów przetwarzających. W przypadku czujników pojemnościowych bardzo korzystna jest integracja w jednej obudowie, a w przypadku technologii krzemowych integracja nawet na jednej strukturze czujnika i układu przetwarzania informacji, charakteryzującego się dobrą stabilnością i niskim poziomem szumów własnych. W przeciwnym przypadku trudno jest uzyskać czujniki o parametrach zadowalających użytkowników. Czujniki pojemnościowe mogą być stosowane do pomiaru ciśnień zarówno statycznych, jak i dynamicznych.

2.3.2.5. Przykłady innych rozwiązań konstrukcyjnych czujników ciśnienia

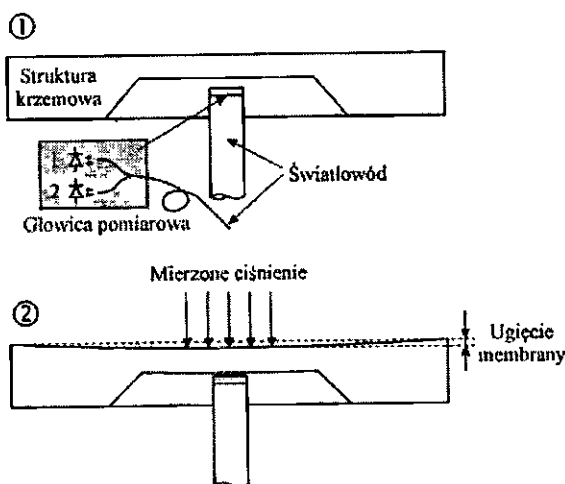
Opisane powyżej zjawiska są najczęściej wykorzystywane w czujnikach ciśnienia, jednak w wielu laboratoriach i firmach prowadzone są badania nad wykorzystaniem innych zjawisk fizycznych czy właściwości materiałów do pomiaru ciśnień. W ramach tych prac powstały m.in. czujniki światłowodowe, indukcyjne, wykorzystujące tensometry strunowe czy wykonane z materiałów magnetycznych wykorzystujące efekt Halla. Do najnowszych prac należy zaliczyć badania nad zjawiskami, które umożliwiłyby zbudowanie czujników pracujących poza atmosferą ziemską, tj. niewrażliwych na promieniowanie kosmiczne lub silne zmiany pola magnetycznego [26].

Czujniki rezonatorowe

Pod pojęciem czujnika rezonatorowego rozumie się element sprężysty, którego właściwości rezonansowe są identyfikowane przez sprzężony z nim obwód przetwarzania informacji. Innymi słowy, zmiana częstotliwości rezonansu mechanicznego może być potraktowana jako informacja o oddziaływającym ciśnieniu. W ogólnym przypadku układ sprężysty może być pobudzany bezpośrednio przez oddziaływanie ciśnienia lub pośrednio przez zewnętrzny obwód wymuszający [64]. Wykorzystanie zmiany częstotliwości rezonansowej w drgającym elemencie kwarcowym pozwoliło na wytworzenie jednego z najbardziej precyzyjnych przyrządów do pomiaru ciśnienia. Firma Paroscientific przedstawiła czujniki ciśnienia wykonane z kwarcu w postaci rurek Bourdona pobudzanych kwarcowym generatorem drgań. Zmiana ciśnienia, powodująca zmiany naprężeń w rurce, powoduje zmiany częstotliwości rezonansowej układu pomiarowego. Tak skonstruowany czujnik pozwala mierzyć ciśnienia w zakresie od 0,1 MPa do 270 MPa z dokładnością 0,01 % górnej granicy zakresu pomiarowego i rozdzielczością 0,0001 % tej granicy [121]. Rezonatorowe czujniki ciśnienia charakteryzują się bardzo małym zużyciem mocy i z tego powodu są atrakcyjne dla zastosowań bezprzewodowych. Ponadto, połączone z technologią czujników piezoelektrycznych mogą stać się jednymi z pierwszych czujników, w których zarówno sygnał zasilający, jak i odbiorczy są przesyłane metodą bezprzewodową.

Czujniki optyczne

Opisane w literaturze czujniki optyczne można podzielić na dwie podstawowe grupy. W pierwszej z nich promień świetlny odgrywa rolę wskaźnika. Do tej grupy można zaliczyć czujniki, których zasada działania polega na pomiarze zmiany kąta odbicia promienia świetlnego od elementu sprężystego np. membrany ugiętej się pod wpływem ciśnienia (rys. 2.12).

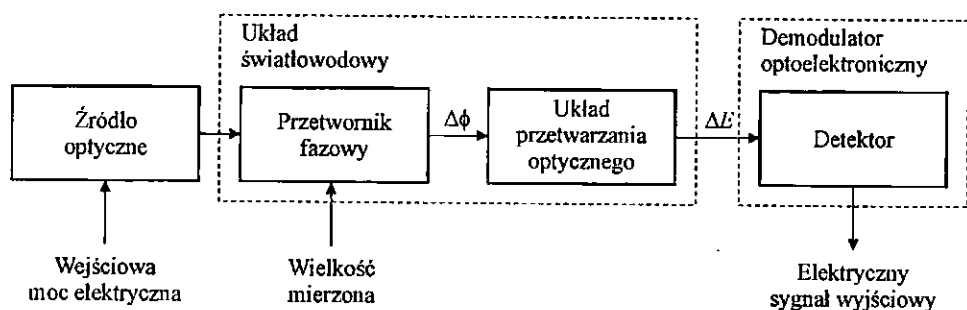


Rys. 2.12. Krzemowy czujnik światłowodowy z uginającą się membraną

Czujnik ciśnienia składa się z trzech głównych elementów: głowicy zawierającej membranę uginającą się pod wpływem ciśnienia, kabla światłowodowego oraz optycznego układu zawierającego m.in. źródło światła (np. diodę LED) oraz odbiornik światła (np. fotodiodę). Miarą ciśnienia działającego na membranę jest zmiana kąta odbicia światła od niej.

Membrany można wykonywać zarówno z metalu, jak i krzemu. Na rys. 2.12 przedstawiono schemat optoelektronicznego czujnika ciśnienia wykonanego w technice mikromechaniki krzemowej. W tym przypadku na powierzchnię cienkiej membrany krzemowej nanosi się ciekłą warstwę lustrzaną spełniającą rolę zwierciadła odbijającego [26, 35, 83].

Zasada działania innego typu czujników optycznych polega na zmianie parametrów promienia świetlnego przechodzącego przez światłowód. W tym przypadku ciśnienie oddziałuje bezpośrednio na światłowód. Pod wpływem zmian ciśnienia, naprężenia powstające w światłowodzie zmieniają modulację fazy światła przechodzącego przez ten światłowód. Zmiana ta jest odczytywana przez układ pomiarowy na wyjściu światłowodu i stanowi miarę ciśnienia. Na rys. 2.13 przedstawiono ideowy schemat interferencyjnego czujnika światłowodowego [53].



Rys. 2.13. Schemat ideowy interferencyjnego czujnika światłowodowego

Światłowodowy czujnik interferencyjny składa się ze źródła światła, które zmienia energię elektryczną na energię optyczną, układu światłowodowego oraz układu detektora zamieniającego energię świetlną z powrotem na elektryczną. Układ światłowodowy zawiera element czujnikowy, w którym wielkość mierzona wywołuje zmiany fazy transmitowanej wiązki świetlnej. Uzyskanie informacji o mierzonej wielkości odbywa się w demodulatorze optoelektronicznym integralnie związanym z układem detektora. Do pomiaru ciśnienia są wykorzystane typowe konfiguracje interferometrów, takie jak Michelsona czy Macha-Zehndera [13, 26, 53]. Niewątpliwą zaletą czujników optycznych jest możliwość bezkontaktowego i zdalnego (nieingerencyjnego) odczytu. Dzięki tej właściwości czujniki te są odpowiednie do pomiarów w procesach technologicznych przeprowadzanych np. w obszarach zagrożonych wybuchem. Do innych zalet czujników optycznych należą: duża odporność na oddziaływanie środowiska pomiarowego oraz na

działanie wysokich temperatur, dzięki możliwości znacznego odsunięcia elementów czujnika czułych na temperaturę od strefy wysokich temperatur. Dlatego też czujniki optyczne doskonale nadają się do ciągłego pomiaru bardzo wysokich ciśnień (powyżej 300 bar), również w podwyższonych temperaturach (powyżej 300 °C). Kolejną zaletą omawianych czujników jest długoterminowa praca bez znaczącej zmiany parametrów, nawet do 10 lat, oraz wytrzymałość na setki tysięcy cykli ciśnieniowych [99].

Osobnym zagadnieniem jest pomiar ciśnienia w zakresach zbliżonych do próżni, który jest wykorzystywany głównie w urządzeniach technologicznych, takich jak napyłarki próżniowe czy implantatory. Do pomiaru w tych warunkach używa się głównie próżniomierzy wśród których można wyróżnić: próżniomierze próżni wstępnej o zakresie pomiarowym poniżej 1000 hPa, próżniomierze kompresyjne np. McLeoda lub Edwardsa o zakresie pomiarowym poniżej 100 – 10⁻⁴ Pa, próżniomierze jonowe o zakresie pomiarowym poniżej 10⁻⁶ Pa oraz próżniomierze radiometryczne o zakresie pomiarowym poniżej 10⁻⁷ Pa [21].

Jak zaznaczono wcześniej, kryteriów podziału czujników może być bardzo wiele. Czujniki można również podzielić zależnie od stopnia zintegrowania z innymi elementami układów pomiarowych na: czujniki bez kompensacji, czujniki z kompensacją wewnętrzną oraz czujniki inteligentne (*smart*), w których w jednej strukturze jest scalona struktura czujnika, elementy kompensujące, wzmacniacze A/D, układy mikroprocesorowej obróbki danych i interfejsowe. Takie czujniki mogą być już traktowane jako pełne mikrosystemy pomiarowe [119].

Często w branżowej literaturze spotyka się podziały według innych kryteriów, np. ze względu na zastosowania: czujniki do zastosowań w medycynie (pomiar ciśnienia krwi), w motoryzacji (czujniki do pomiaru ciśnienia oleju) czy w sprzęcie powszechnego użytku (czujniki do pomiaru siły ciągu odkurzacza). Można również dokonać podziałów według kryteriów metrologicznych związanych z zakresami pomiarowymi i dokładnością, zakresami temperatury pracy itp.

3. CZUJNIKI CIŚNIENIA – PROBLEMY KONSTRUKCYJNE, TECHNOLOGICZNE I APLIKACYJNE

Zgodnie z konwencją przyjętą na rys. 2.3 czujnik ciśnienia składa się następujących bloków funkcjonalnych: elementu czujnika oraz układu przetwarzania sygnału nieelektrycznego na sygnał elektryczny. Natomiast ze względów konstrukcyjnych w czujniku ciśnienia można wyróżnić dwie podstawowe części składowe: strukturę wewnętrzną czujnika (*chip*) i obudowę (*package*). W niniejszym rozdziale omówiono konstrukcje i technologie stosowane do wytwarzania wewnętrznych struktur czujników (ze szczególnym uwzględnieniem technologii krzemowych), technologie montażu wraz z przykładowymi rozwiązaniami konstrukcyjnymi obudów oraz niektóre aspekty aplikacji czujników ciśnienia.

3.1. Krzemowe czujniki ciśnienia

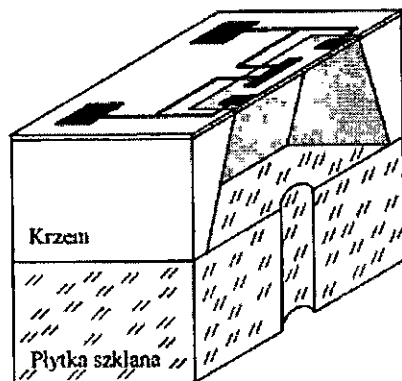
3.1.1. Konstrukcja krzemowych czujników ciśnienia

Krzem jako materiał półprzewodnikowy jest znany i szeroko stosowany w mikroelektronice od ponad pół wieku. Właściwości krzemu jako materiału do wytwarzania elektronicznych przyrządów półprzewodnikowych są znane i dostatecznie dobrze opisane w dostępnej literaturze [1, 2, 11, 14, 75, 122, 128].

Właściwości krzemu szczególnie przydatne przy konstruowaniu czujników są następujące:

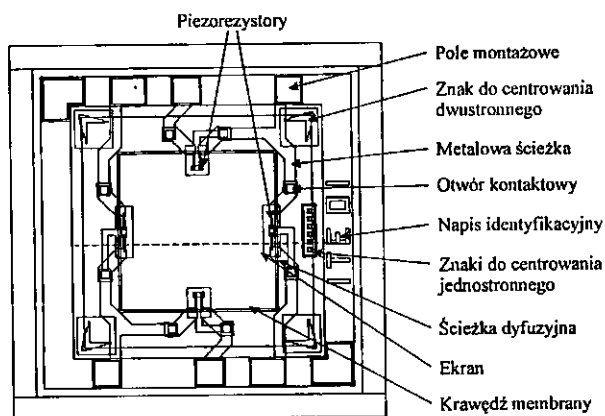
- struktura krystalograficzna krzemu i zdolność do anizotropowego trawienia pozwala na wytwarzanie skomplikowanych trójwymiarowych kształtów geometrycznych z dokładnością nawet $1\ \mu\text{m}$;
- duży współczynnik piezorezystancji pozwala na wytwarzanie czujników ciśnienia, siły, przyspieszenia o sygnale wyjściowym do 100 razy większym niż czujników wytworzonych np. z warstw metalicznych,
- duża odporność na naprężenia;
- dobre właściwości sprężyste krzemu w szerokim zakresie temperatury, co pozwala na wykorzystanie cienkich elementów np. membran czujników do pracy w szerokim zakresie temperatury, właściwość ta może być wykorzystywana ponadto do wytwarzania ruchomych elementów krzemowych sterowanych termicznie;
- duża odporność mechaniczna i korozyjna warstw związków krzemu m.in. azotku krzemu, co umożliwia wytwarzanie czujników odpornych na oddziaływanie środowiska pomiarowego. [11]

Parametrem materiałowym, który ogranicza zastosowania krzemu, jest jego stosunkowo niewielka odporność na kruche pękanie – zaledwie $0,9\ \text{MPa m}^{-1/2}$. Zestawienie parametrów mechanicznych krzemu i innych materiałów konstrukcyjnych używanych w technologii czujników są podane w [52, 128]. Typowa konstrukcja krzemowego czujnika ciśnienia jest przedstawiona na rys. 3.1.



Rys. 3.1. Zarys konstrukcji czujnika piezorezystancyjnego czujnika ciśnienia

Krzemowy czujnik ciśnienia składa się z krzemowej płytki, w której jest wytworzona cienka membrana. W membranie są wytworzone piezorezystory połączone najczęściej w konfigurację typowego mostka Wheatstone'a. Ponadto na membranie znajdują się połączenia pomiędzy elementami mostka oraz kontakty do wyprowadzeń montażowych, tworząc tzw. obszary metalizacji. W celu wzmocnienia konstrukcji mechanicznej płytki membranowej, a także w celu odseparowania cienkiej membrany od niepożądanych naprężeń mechanicznych powstających w trakcie montażu, płytkę membranową łączy się z płytką wspornikową, najczęściej wykonaną ze szkła. Na rys. 3.2 przedstawiono widok z góry (*layout*) płytki membranowej czujnika ciśnienia wykonanego w Instytucie Technologii Elektronowej (ITE) [128, 131].



Rys. 3.2. Widok z góry (*layout*) piezorezystancyjnego czujnika ciśnienia wykonanego w ITE [128]