

Měření tlaku

Rozdělení měřících metod

- Měření celkových tlaků
- Měření parciálních tlaků

- **Absolutní metody** - hodnota tlaku je určena přímo z údaje měřícího přístroje, nebo výpočtem plynoucím z principu přístroje - ve vztahu nesmí vystupovat charakteristiky měřeného plynu, ale jen charakteristiky přístroje
- **Nepřímé metody** - tlak se určuje pomocí některé veličiny, která závisí na tlaku, ale i na vlastnostech měřeného plynu - vypočtený údaj závisí na druhu plynu

Rozdělení manometrů (technické provedení)

- Aktivní měrky - elektronika je součástí měrky, výstup definované elektrické napětí v závislosti na tlaku
- Aktivní-digitální měrky - RS232, RS485, USB, ...
- Neaktivní měrky - elektronika není součástí měrky připojuje se pomocí kabelu

Charakteristika měřících metod

- Měřicí obor - rozsah tlaků, v kterém je možné metodu použít
- Citlivost - poměr změny údaje přístroje ke změně tlaku
- Vliv měřícího přístroje - na hodnotu tlaku a na složení plynů v měřeném objemu
- Přesnost měření - chyba měření
- Setrvačnost údaje přístroje - rychlost reakce přístroje na změnu tlaku

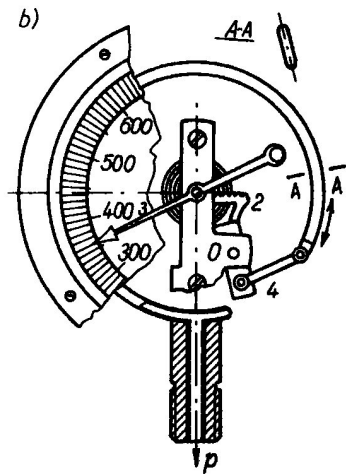
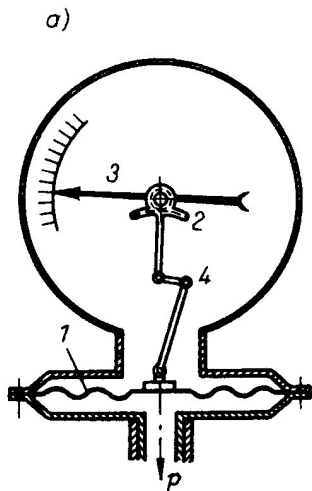
Mechanické manometry

V mechanických (deformačních) manometrech se tlak určuje z deformace pružného elementu.

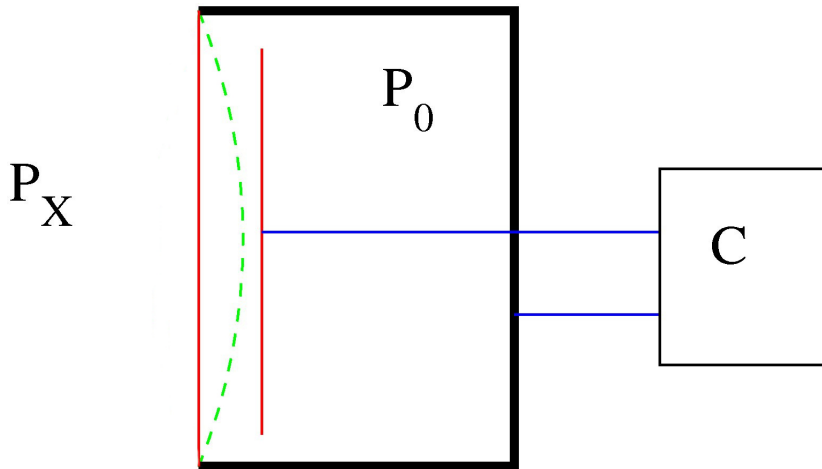
- Membránové manometry - vlivem tlaku se deformuje membrána - deformace se přenáší na mechanický ukazatel, na jedné straně membrány referenční tlak
- Trubičkové manometry
- Vlnovcové manometry

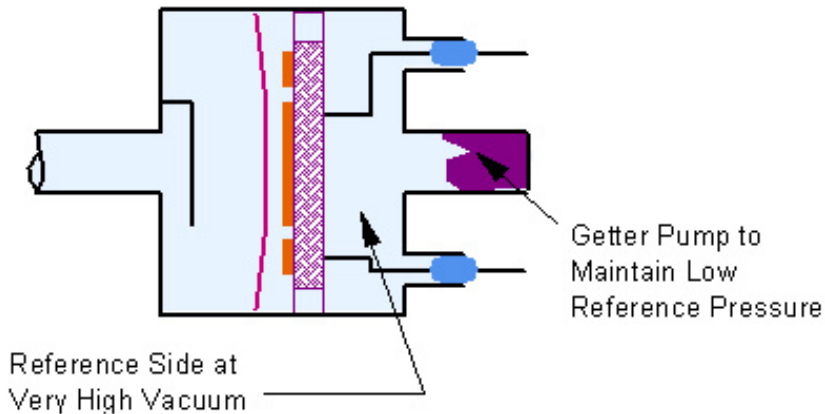
Pouze mechanika, bez elektroniky, bez napájení.

Měří tlak v rozsahu $133 - 10^5$ Pa



Kapacitní manometr





firční materiály firmy MKS

Princip: deformace membrány a měření její kapacity

Dolní hranice měřených tlaků je $\sim 10^{-3}$ Pa.

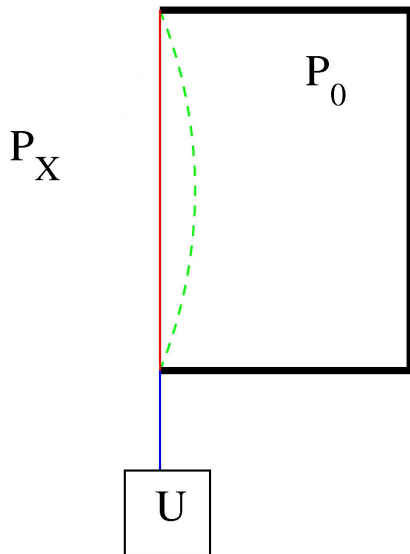
Horní hranice měřených tlaků je $\sim 10^5$ Pa.

Měřící rozsah nejčastěji 4 řády.

Výhody: absolutní měření, kalibrace ostatních manometrů, velká přesnost, chyba měření $< 1\%$

Nevýhody: nutnost kalibrovat nulu

Piezo-manometr



Princip: deformace membrány s piezo-prvkem

Dolní hranice měřených tlaků je $\sim 10^1$ Pa.

Horní hranice měřených tlaků je $\sim 10^5$ Pa.

Výhody: absolutní měření, kalibrace ostatních manometrů, velká přesnost,
chyba měření $< 1\%$

Nevýhody: malý měřicí rozsah

Viskózní manometr s rotující kuličkou

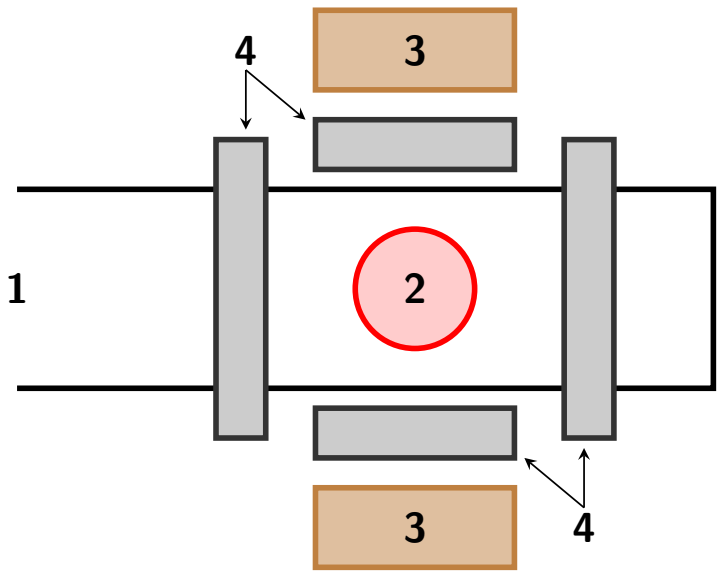
Měří se zpomalení rotující kuličky, která levituje v magnetickém poli. Měření je závislé na akomodačním koeficientu pro přenos tečné složky hybnosti pro daný plyn a kuličku. Akomodační koeficient je nutné určit experimentálně. Hodnota akomodačního koeficientu je v čase velmi stabilní.

$$-\frac{1}{\omega} \frac{d\omega}{dt} = \alpha \frac{10}{\pi} \frac{1}{\rho r} \frac{P}{v_a}$$

Malé kompaktní zařízení.

Rozsah 100 Pa - 10^{-5} Pa. Chyba měření pro tlaky 1 Pa - 100 Pa asi 10%.

Chyba měření pro nízké tlaky asi 1%.



Krystalový manometr

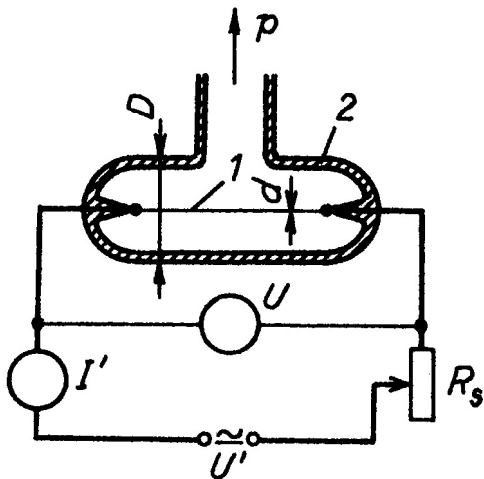
- princip: změna frekvence kmitů krystalu
- rozsah: 0,1 Pa – 10^5 Pa
- přesnost: $\sim 15\%$
- na podobném principu velmi přesné barometry $\sim 0,01\%$

Tepelné manometry

Princip je založen na závislosti tepelné vodivosti plynu na tlaku.
Podstatnou částí manometru je nějaký citlivý element, který je elektrickým příkonem P vyhříván na teplotu T , vyšší než je teplota okolí T_0 .
Nejčastěji měříme teplotu T :

- z velikosti odporu - odporové manometry
- pomocí termočládku - termočládkové manometry
- z deformace bimetalu - dilatační manometry

Odporové manometry - Pirani



J. Groszkowski: Technika vysokého vakua, SNTL, Praha 1981

Odpor vlákna $R = f(T)$

$$P_e = UI = I^2R = \frac{U^2}{R} ; \quad R = R_0(1 + \beta(T - T_0))$$

$$P_e = P_c + P_z + P_p$$

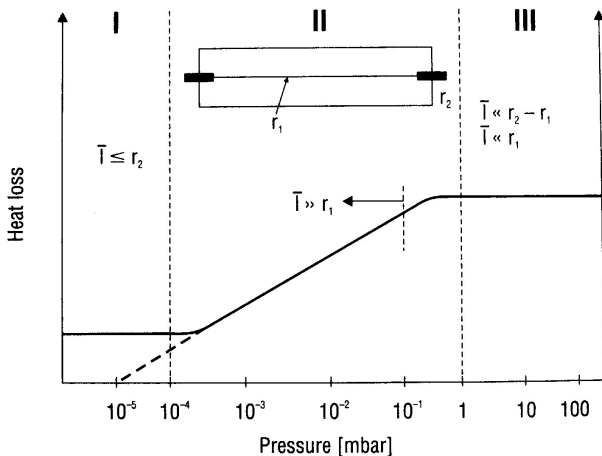
- P_c - výkon odváděný molekulami plynu
- P_z - výkon odváděný zářením vlákna
- P_p - výkon odváděný přírůdky vlákna

$$P_z = S_0\sigma\varepsilon(T^4 - T_0^4)$$

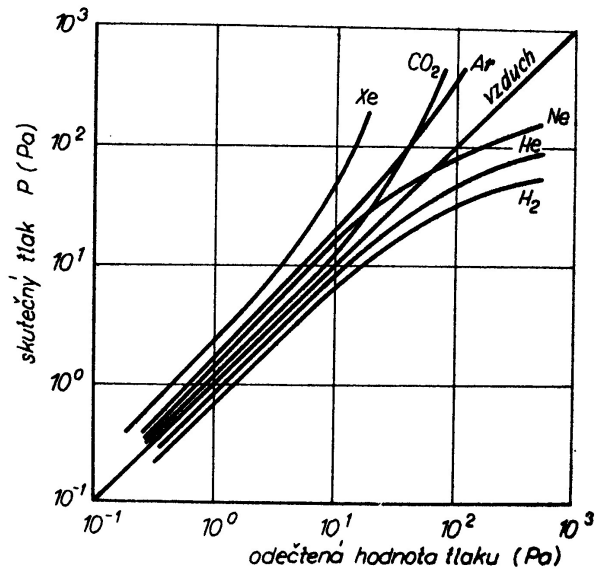
$$P_c = [\alpha\lambda_T(p)]S_0(T - T_0)$$

α - akomodační koeficient

$\lambda_T(p)$ - tepelná vodivost



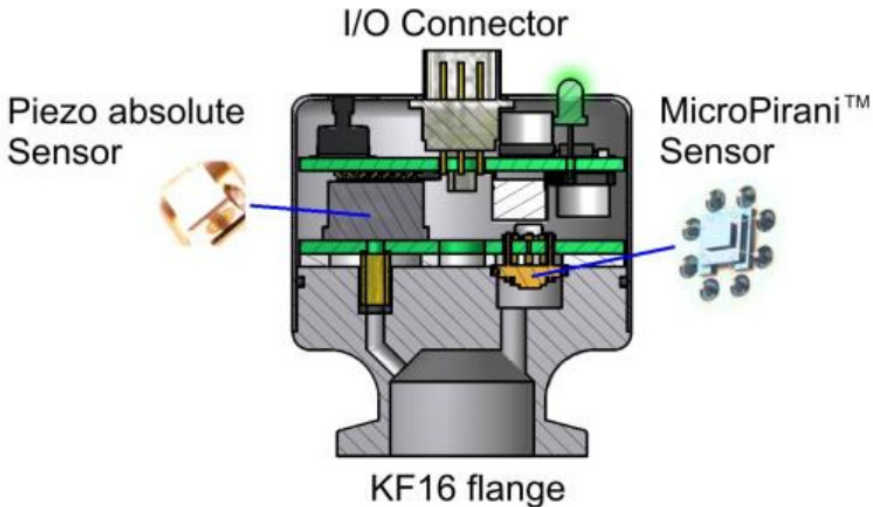
- I Thermal dissipation due to radiation and conduction in the metallic ends
- II Thermal dissipation due to the gas, pressure-dependent
- III Thermal dissipation due to radiation and convection



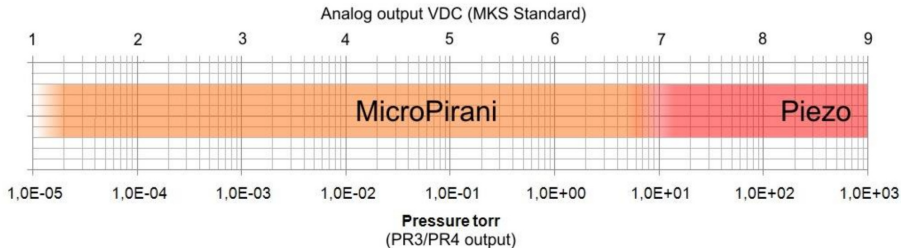
Pirani manometr

- velmi jednoduchá konstrukce
- měřící rozsah $10^{-2} - 10^5$ Pa
- chyba měření asi $\sim 15\%$
- závisí na druhu plynu a na okolní teplotě

MicroPirani – MKS 910



MKS 910



manuál MKS - 910

MKS 910

Specifications

Measuring range (N₂ and Air): 1×10^{-5} to 1500 Torr

MicroPirani

Accuracy ⁽¹⁾ (N ₂)	5×10^{-4} to 1×10^{-3} Torr:	±10% of reading
	1×10^{-3} to 100 Torr:	± 5% of reading
	100 Torr to Atm.:	± 25% of reading
Repeatability ⁽¹⁾ (N ₂):	1×10^{-3} to 100 Torr:	± 2% of reading

Piezo absolute

Accuracy Piezo ⁽¹⁾	0.1 to 10 Torr:	±1% of reading
	10 to 1000 Torr:	± 0.75% of reading
	1000 to 1500 Torr:	± 2% of reading
Repeatability ⁽¹⁾ (N ₂):	10 to 800 Torr	± 0.2% of reading

Supply Voltage: 9 – 30 VDC

Power consumption: < 1.2 Watt

Fuse (thermal recoverable): 200 mA

Ionizační manometry

Princip: ionizace molekul a měření počtu nabitých částic

Rozdělení podle způsobu ionizace:

- Manometry se žhavenou katodou
- Manometry se studenou katodou
- Manometry s radioaktivním zářičem

Při ionizaci plynu o koncentraci n nejsou ionizovány všechny molekuly, ale jenom část z nich $n_i = \gamma n$; $\gamma < 1$.

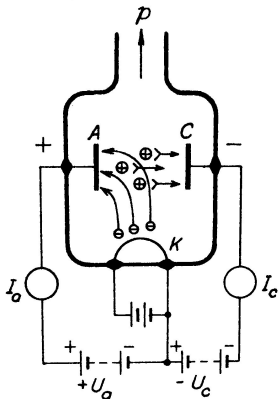
Podmínky činnosti:

- je nutné pracovat při stejné teplotě, při které byl manometr cejchován.
- koeficient γ musí být konstantní v celém oboru měřených tlaků
- měřený iontový proud musí být tvořen pouze ionty molekul plynu - vyloučit parazitní proudy
- měřit všechny vzniklé ionty

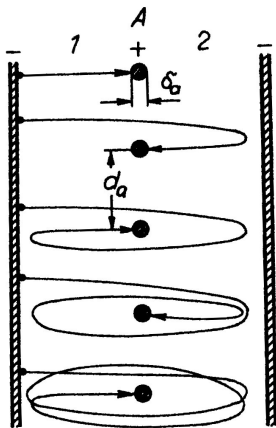
Nevýhody:

- čerpací efekt - sorpce plynů vlivem elektrického náboje
- desorpce plynů z elektrod vlivem velké teploty

Ionizační manometr se žhavenou katodou



J. Groszkowski: Technika vysokého vakua, SNTL, Praha 1981



Kmity elektronů při použití mřížkové anody. J. Groszkowski: Technika vysokého vakua, SNTL, Praha 1981

Dopad iontů na kolektor závisí na

- potenciálu kolektoru
- na tvaru kolektoru
- na poloze kolektoru vzhledem k prostoru, kde dochází k ionizaci

Pravděpodobnost ohybu dráhy iontů se zvyšuje s rostoucí počáteční rychlostí iontů a se zmenšováním průměru kolektoru. Pokud nejsou v obvodu kolektoru žádné další proudy je iontový kolektorový proud mírou tlaku.

$$I_c = I_p = K_0 I_e p$$

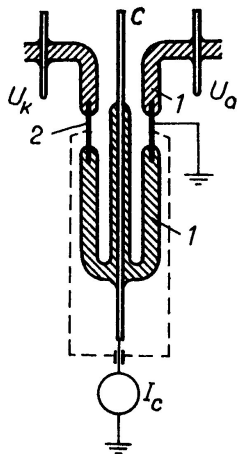
Ve skutečnosti se mohou v obvodu kolektoru projevit parazitní proudy.

$$I_c = I_p + \sum_i I_i = K_0 I_e p + \sum_i I_i$$

Parazitní proudy omezují možnost měření nízkých tlaků.

Parazitní proudy

- Proudy vyvolané rentgenovým a ultrafialovým zářením - Anoda se vlivem dopadu elektronů s velkou energií stává zdrojem měkkého rentgenového záření. V důsledku elektromagnetického ozáření povrchu kolektoru vzniká fotoemise z kolektoru. Je nutné pracovat s nízkou teplotou katody. Parazitní proud $I_1 \sim A_c I_e \frac{1}{D_{AC}}$, A_c - plocha kolektoru, I_e - anodový proud, D_{AC} - vzdálenost anoda-kolektor.
- Proudy vyvolané elektronovou desorpcí - při bombardování povrchu elektrony se mohou uvolňovat neutrální atomy a molekuly, ionizované atomy a molekuly, disociované molekuly.
- Iontový proud ze žhavené katody - katoda může emitovat i ionty, používat nízkou teplotu katody, projevuje se pouze při velmi nízkých tlacích.
- Svodové proudy - nedokonalá izolace kolektoru od ostatních elektrod.



Odstranění svodových proudů. J. Groszkowski: Technika vysokého vakua, SNTL, Praha 1981

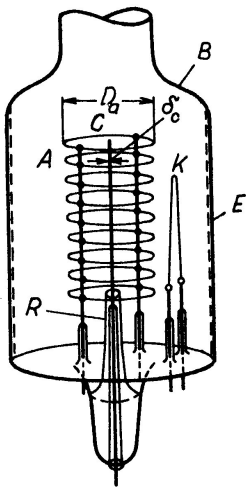
Při činnosti ionizačního manometru dochází k zachycování iontů kolektorem a tím k čerpacímu efektu.

Konstrukce manometru

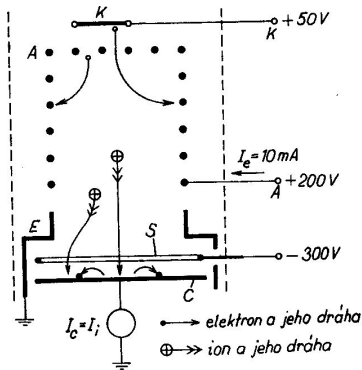
- s vnějším kolektorem - kolektor válcový, anoda válcová mřížka, katoda uvnitř anody
- s vnitřním kolektorem Bayard-Alpert - kolektor tenký drátek uprostřed, anoda válcová mřížka, katoda vně mřížky

Uspořádání Bayard-Alpert měří do nižších tlaků (10^{-9} Pa) než uspořádání s vnějším kolektorem. Spodní hranice měřitelného tlaku je dána zejména parazitním foto-proudem.

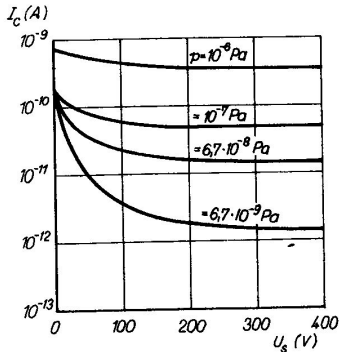
Maximální měřitelný tlak 10^0 Pa.



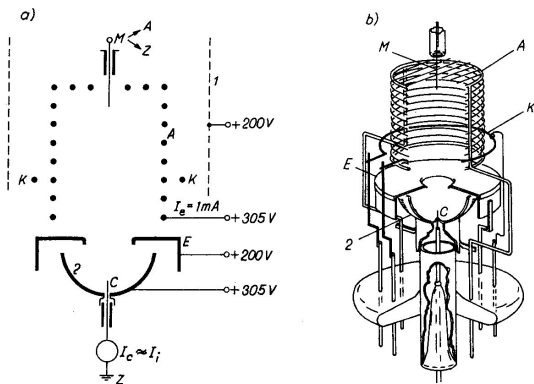
J. Groszkowski: Technika vysokého vakua, SNTL, Praha 1981



Obr. 5.51. Schuemannův vakuometr s potenciálovou bariérou
 A – mřížková anoda; K – katoda;
 C – kolektor; E – stínění; S – prstencová elektroda (supresor)

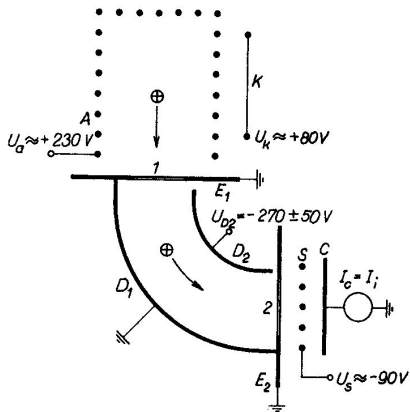


Obr. 5.52. Závislost kolektorového proudu I_c na potenciálu (záporném) supresoru U_s a tlaku p



Obr. 5.53. Redheadův extraktorový vakuometr: a) schéma, b) konstrukční provedení. Stínění a baňka jsou na potenciálu katody (200 V), reflektor iontů je spojen s anodou (305 V)

A – mřížková anoda jedné strany otevřená; *E* – stínění; *K* – prstencová katoda (thoriovaný wolfram); *C* – kolektor; *M* – modulátor; *1* – baňka s pokoveným vnitřním povrchem; *2* – reflektor iontů



Obr. 5.56. Helmerův–Haywardův
vakuometr se zakřiveným svazkem
iontů
A – anoda; K – katoda;
 E_1, E_2 – clony; D_1, D_2 – elektrody
deflektoru; C – kolektor;
S – supresorová mřížka;
1, 2 – otvory v clonách

J. Groszkowski: Technika vysokého vakua, SNTL, Praha 1981

Ionizační manometr se studenou katodou (Výbojový manometr)

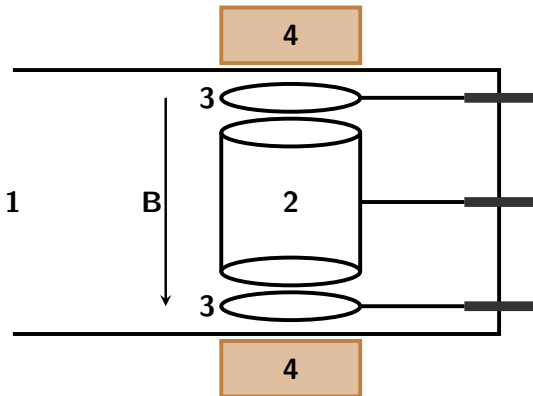
Princip: samostatný výboj

Výbojové manometry s magnetickým polem

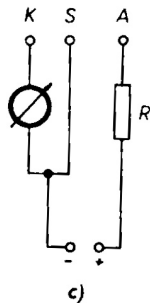
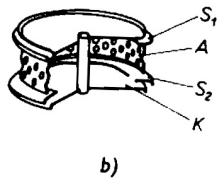
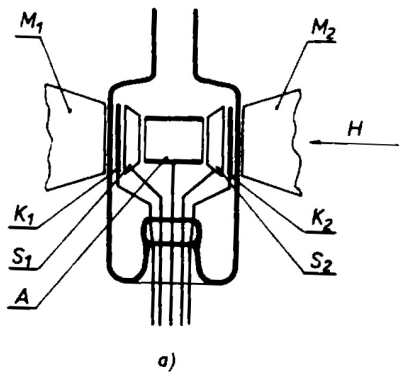
Existují dvě základní konstrukce:

- 1936 – Penningův manometr
- 1958 – Inverzní magnetron

Penningův manometr

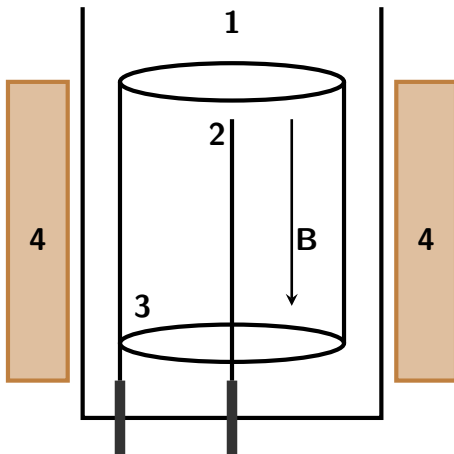


- 1 – připojení měřeného tlaku, 2 – válcová anoda, 3 – katoda,
4 – permanentní magnet

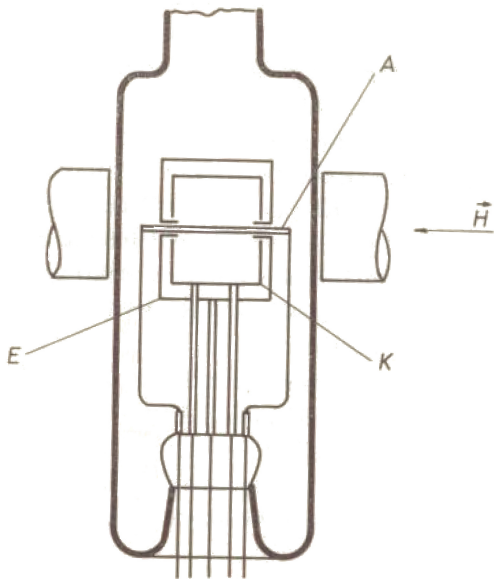


L. Pátý: Fyzika nízkých tlaků, Academia, Praha 1968

Inverzní magnetron



1 – připojení měřeného tlaku, 2 – anoda, 3 – válcová katoda,
4 – permanentní magnet



Parametry manometrů

Proud procházející výbojem je mírou tlaku $I = f(p)$.

$$I \sim N_e L_i d_0^2 p e^{-\frac{U_i d_0}{k T E}}$$

- N_e - počet elektronů emitovaných katodou za 1 s
- L_i - dráha na které dochází k ionizaci
- d_0 - efektivní průměr molekuly plynu
- U_i - ionizační potenciál plynu
- E - intenzita elektrického pole mezi K–A
- p - tlak plynu

výbojový proud můžeme aproximovat:

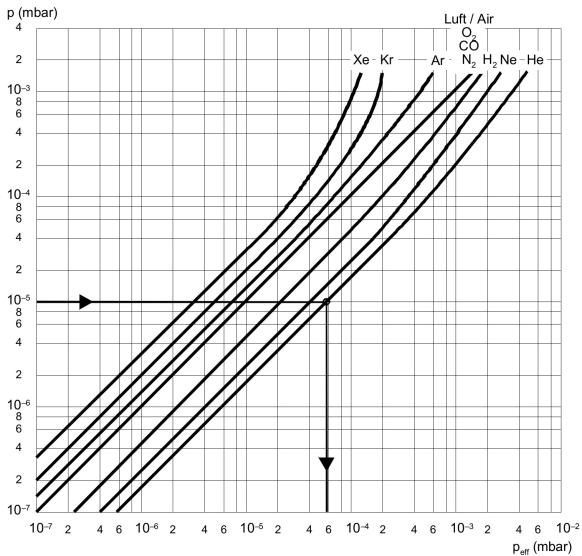
$$I = K_1 p^u$$

pro většinu plynu v oboru tlaků 10^{-2} až 10^{-7} Pa platí $1,10 \leq u \leq 1,15$

Manometry se studenou katodou jsou závislé na druhu plynu.
Například pro měрку IKR 050 (Pfeiffer) platí pro tlaky $< 10^{-3}$ Pa

$$p_{\text{eff}} = C \times p_r$$

plyn	C
vzduch (N ₂ , O ₂ , CO)	1,0
Xe	0,4
Kr	0,5
Ar	0,8
H ₂	2,4
Ne	4,1
He	5,9



Parametry

- velikost magnetického pole 0,02 – 0,1 T
- velikost napětí 2 – 6 kV
- výbojového proudu < 2 mA
- rozsah měřených tlaků $10^{-1} - 10^{-7}$ Pa (10^{-9} Pa)
- typická chyba měření 15 – 30 %

Parametry ukázek

VC2T - TESLA Rožnov

- rozsah měření: $1 \times 10^{-1} - 1 \times 10^{-4}$ Pa
- napětí ~ 2 kV
- mag. pole: $\sim 0,04$ T

IKR 020 - Balzers

- rozsah měření: $5 \times 10^{-1} - 1 \times 10^{-7}$ Pa
- napětí ~ 3 kV
- mag. pole: $\sim 0,1$ T

Provoz a použití

- aktivní, nebo pasivní provedení
- libovolná orientace
- magnetické pole
- rozprašování elektrod
- čištění manometrů
- teplota odplynění 150 – 250 °C

Výhody a nevýhody

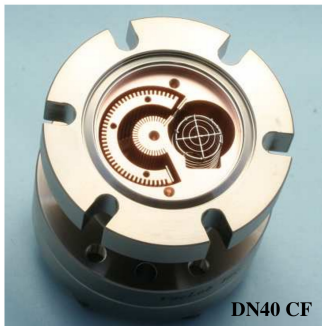
Výhody

- robustní konstrukce
- jednoduchý měřicí obvod
- rozsah měřených tlaků
- vydrží prudké zavzdušnění

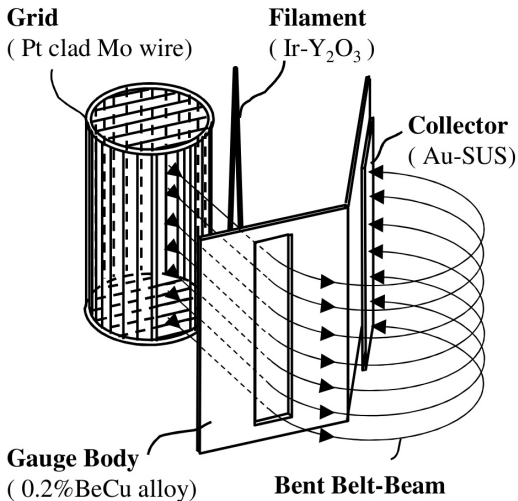
Nevýhody

- čerpací efekt
- závislost na druhu plynu
- chyba měření
- špatně startuje při nízkých tlacích (10^{-7} Pa \sim 5 minut)

Měrka pro XHV vakuum



Top view of the 3BG-03, without the cover on the deflector and collector. The flanged mounting surface of the deflector can be seen in the picture, with its 3 mounting holes. Within the functional volume of the gauge, the deflector is an open array of bars and slots.



Měřka pro XHV vakuum

Bent Belt-Beam - ionizační manometr

- 3BG-03
- citlivost $5 \sim 8 \times 10^{-2} \text{ Pa}^{-1}$
- min. tlak $5 \times 10^{-12} \text{ Pa}$

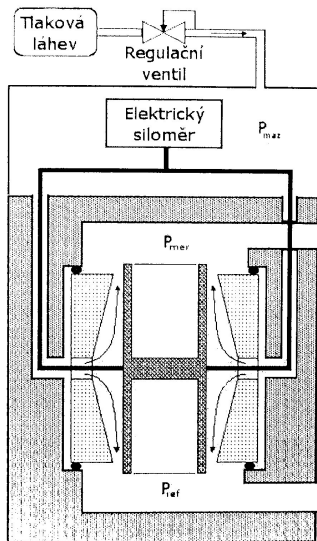
pro porovnání ionizační manometr z vak. praktika PBR 260

- rozsah měření $5 \times 10^{-10} - 1000 \text{ hPa}$

Konická tlaková měřka

Patří do kategorie pístových měřidel tlaku. Tlak se měří jako síla působící kolmo na efektivní plochu pístu. Tento manometr měří tlakovou diferenci mezi prostorem nad pístem a prostorem pod ním. Typ FPG8601 - měřící rozsah 0,5 Pa - 15 kPa. Nejpřesnější manometr pro tento tlakový rozsah (státní etalon), rozlišení 10 mPa, reprodukovatelnost 20 mPa. Nutno započítat opravy na vztlakovou a třecí sílu mazacího plynu, tepelnou roztažnost pístu, ... Je nutné provádět kalibrace pomocí přesných závaží a nulování manometru.

Tlak na referenční straně vlivem mazacího plynu neklesá pod 0,15 Pa. Pro přesná měření v oblasti nízkých tlaků nutno měřit jiným manometrem.

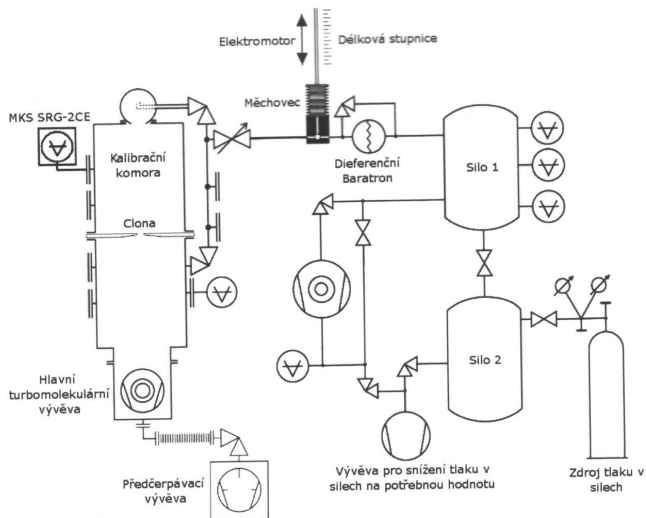


Manometr na principu dynamické expanze

Do kalibrační komory vpouštíme známý proud plynu a komoru čerpáme známou čerpací rychlostí. Pak platí

$$p = \frac{I}{S}$$

Mezi vývěvu a kalibrační komoru se zařazuje kruhová clona se známou vodivostí. Vodivost clony je řádově menší než čerpací rychlost (eliminace fluktuací čerpací rychlosti). Nutno zajistit izotermičnost měření. Je nutné udržet konstantní proud plynu I , konstantní čerpací rychlost vývěvy, molekulární režim proudění plynu clonou.



P.Klenovský, bakalářská práce, MU, 2006

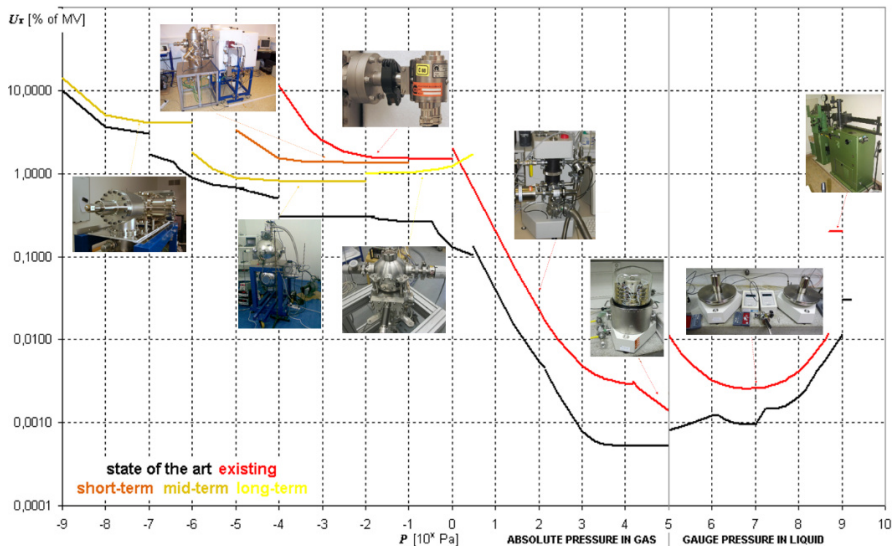
Etalon na principu dynamické expanze

rozsah $1, 10^{-1} - 10^{-6}$ Pa , chyba měření 0,6% – 2%

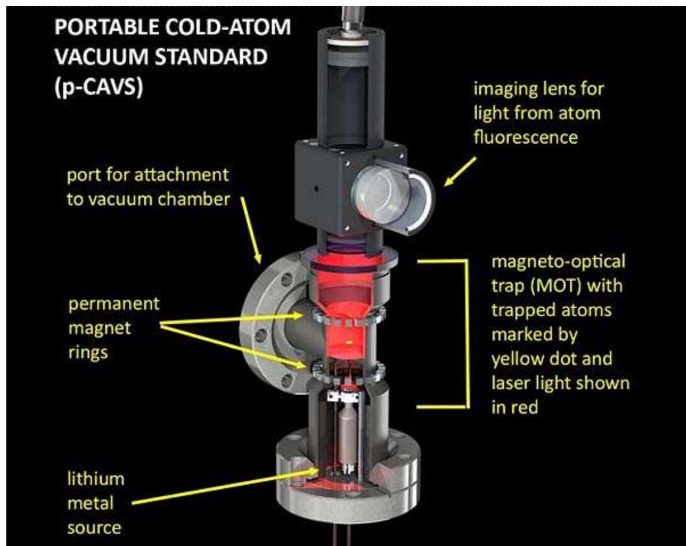
$$p_{\text{ref}} = I \left(\frac{1}{S} + \frac{1}{G} \right)$$

$$I = p \frac{V_1 - V_2}{t_1 - t_2}$$

ČMI - etalony



MOT



U-trubice

