

Ionizační manometry

Princip: ionizace molekul a měření počtu nabitých částic

Rozdělení podle způsobu ionizace:

- Manometry se žhavenou katodou
- Manometry se studenou katodou

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

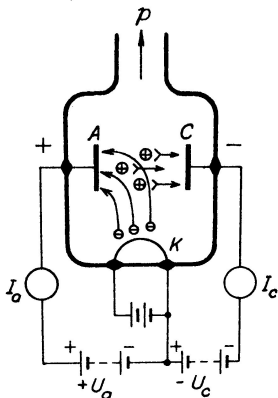
Podmínky činnosti:

- 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

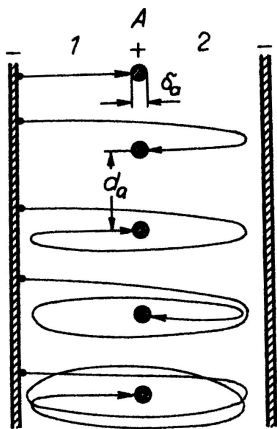
Katoda vytváří elektronový proud I_e , který ionizuje plyn. Kolektor sbírá kladné ionty. I_p - proud kladných iontů na kolektor, I_e - emisní elektronový proud na anodu, p - tlak plynu

$$I_p = K_0 I_e p \Rightarrow p = \frac{1}{K_0} \frac{I_p}{I_e}$$

$K_0[\text{Pa}^{-1}]$ citlivost manometru, liší se pro různé plyny, protože se plyny liší koeficientem specifické ionizace - ϵ

ϵ - množství iontů vytvořených jedním elektronem na dráze 1 cm v daném plynu při tlaku 133 Pa a teplotě 273 K. Závisí na energii elektronů - tedy na urychlovacím napětí.

	He	Ne	H ₂	N ₂	CO	O ₂	Ar	Hg
ϵ_{max}	1,2	3	3,7	10	11	12	13	19
$U_{max}[\text{V}]$	110	170	65	95	100	120	90	85



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.

$$I_c = I_p = K_0 I_e p$$

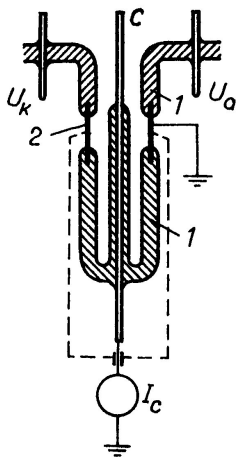
Ve skutečnosti se mohou v obvodu kolektoru projevit parazitní proudy.

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

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 desorpčí** - 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

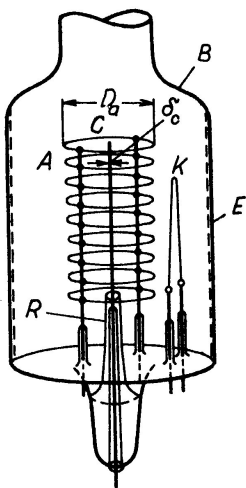
Při činnosti ionizačního manometru dochází k zachycování iontů kolektorem a tím k čerpacímu efektu.

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.

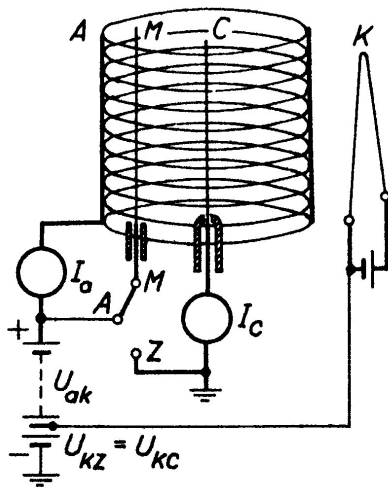
Maximální měřitelný tlak 10^0 Pa.



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

Ionizační manometry se žhavenou katodou

- Ionizační manometry mění složení i tlak měřeného plynu.
- chyba měření $\sim 15\%$.
- speciální modifikace vnořený manometr.
- řada konstrukčních modifikací



Modifikace Bayard-Alpert-Redhead, pro měření nízkých tlaků

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

Měření probíhá ve dvou krocích

- nejdříve spojíme modulátor s anodou ($M \rightarrow A$)
- pak ho spojíme s kolektorem ($M \rightarrow Z$), část iontů proudí na modulátor

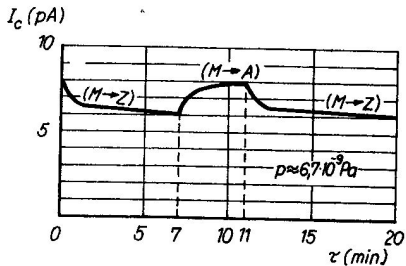
$$M \rightarrow A ; I'_c = S'p + I'_x$$

$$M \rightarrow Z ; I''_c = S''p + I''_x$$

$$S'' < S' \Rightarrow I'_c - I''_c = (S' - S'')p + (I'_x - I''_x)$$

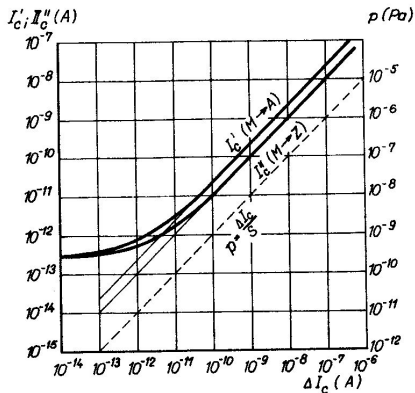
$$I'_x = I''_x \Rightarrow p = \frac{I'_c - I''_c}{S' - S''}$$

můžeme měřit tlaky $\sim 10^{-10}$ Pa (tenze par W při $T=2000$ K
 $P_p \sim 10^{-10}$ Pa)

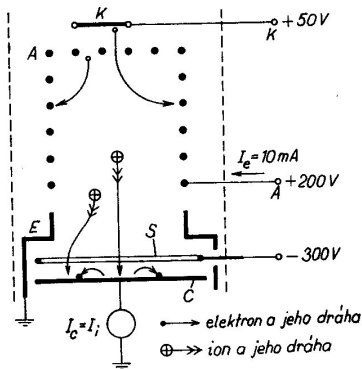


Obr. 5.49. Změny kolektorového proudu I_c při modulaci v Bayardově–Alpertově–Redheadově vakuometru. Zpomalené ustalování proudu I_c je způsobeno mezi jiným sorpčními a desorpčními procesy na modulátoru

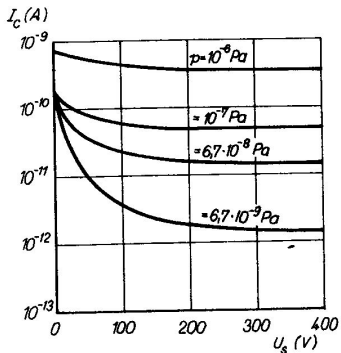
J. Groszkowski: Technika vysokého vakua, SNTL, Praha 1981



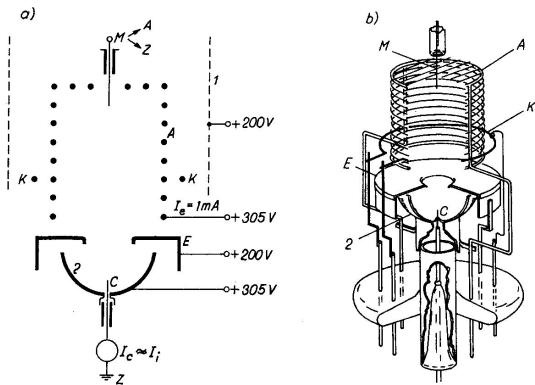
Obr. 5.48. Charakteristiky modulatorového vakuometru. Kolektorový proud: I_c' – při spojení modulatoru M s anodou ($M \rightarrow A$); I_c'' – při spojení modulatoru se zemí ($M \rightarrow Z$); závislost tlaku na rozdílovém modulačním proudu ΔI_c je vyznačena čárkovaně



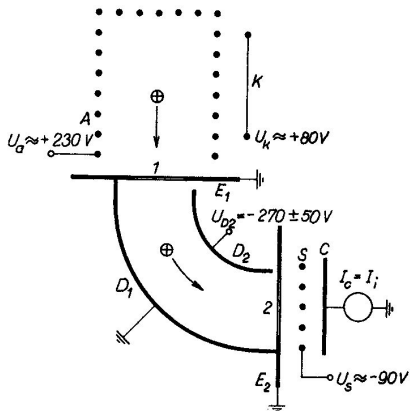
Obr. 5.51. Schuemannův vakuometr s potenciálovou bariérou
 A – mřížková anoda; K – katoda;
 C – kolektor; E – stínění; S – prstencová elektroda (supresor)



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)

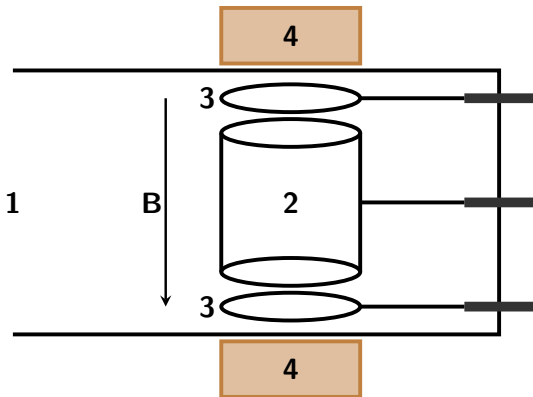
Princip: samostatný výboj

Výbojové manometry s magnetickým polem

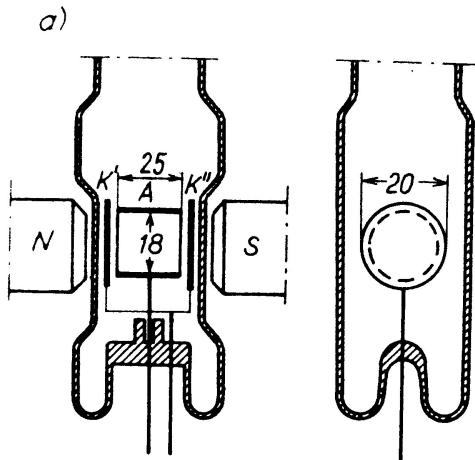
Existují dvě základní konstrukce:

- 1936 – Penningův manometr
- 1958 – Inverzní magnetron

Penningův manometr

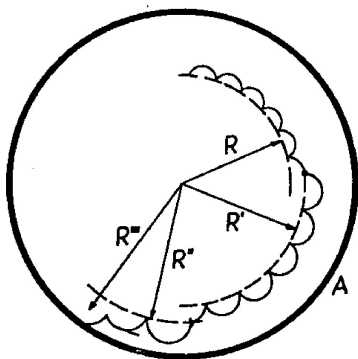


- 1 – připojení měřeného tlaku, 2 – válcová anoda, 3 – katoda,
4 – permanentní magnet



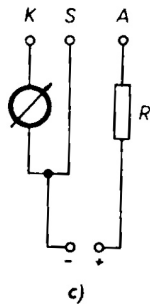
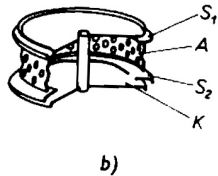
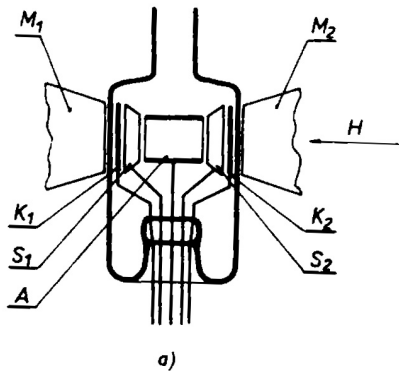
Výbojový manometr - Penning

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



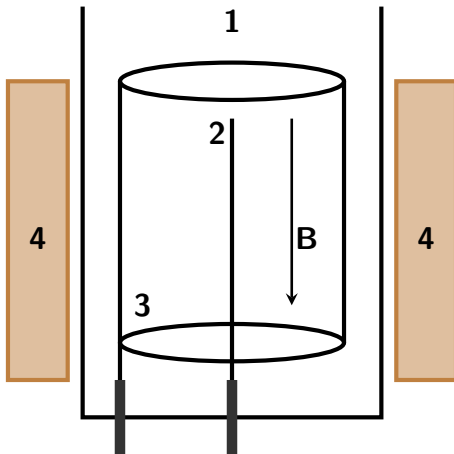
Obr. 7-26. Dráhy elektronu ve výbojovém manometru s magnetickým polem.

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

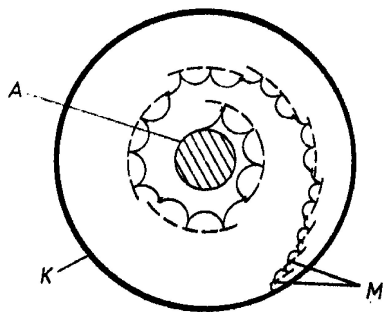


L. Pátý: Fyzika nízkých tlaků, Academia, Praha 1968

Inverzní magnetron



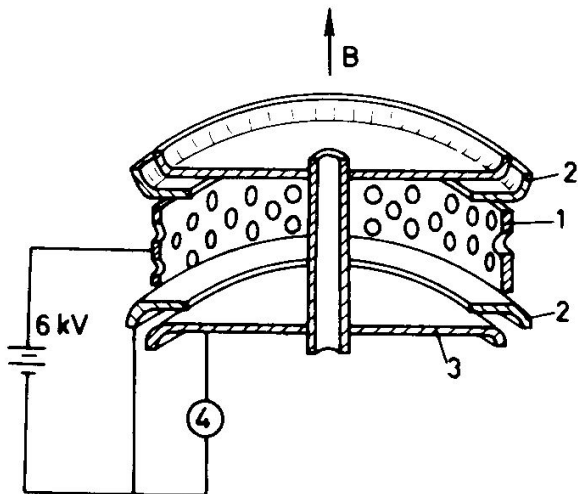
1 – připojení měřeného tlaku, 2 – anoda, 3 – válcová katoda,
4 – permanentní magnet



Obr. 7-30. Dráhy elektronu v inverzním výbojovém manometru

- A* — anoda
- K* — katoda
- M* — místa srážky.

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



A. Roth: Vacuum technology, Elsevier, 1990

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 měrku 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 %
- **Penningův manometr** - Anoda ve tvaru válce, dvě ploché katody, magnetické pole kolmé ke katodě
- **Inverzní magnetron** - Katoda ve tvaru válce, tyčová anoda, magnetické pole rovnoběžné s anodou

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

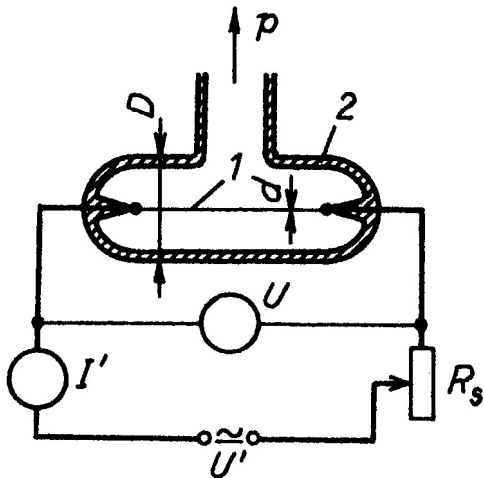
- čerpací efekt
- závislost na druhu plynu
- chyba měření
- špatně startuje při nízkých tlacích (10^{-7} Pa \sim 5 minut)

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 termočlánku - termočláňkové manometry
- z deformace bimetalu - dilatační manometry

Odporové manometry - Pirani



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

Odpor vlákna $R = f(T)$

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

$$P_e = P_c + P_z + P_p$$

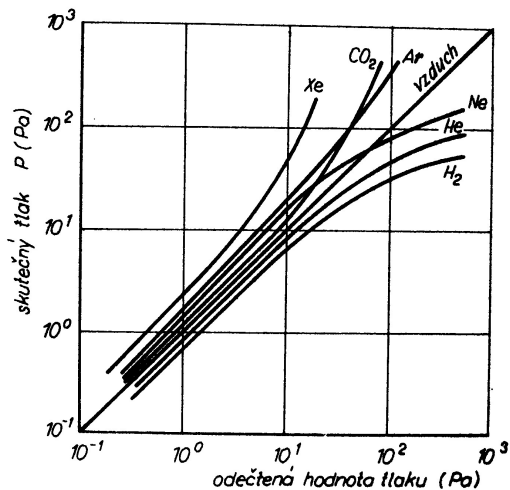
- P_c - výkon odváděný molekulami plynu
- P_z - výkon odváděný zářením vlákna
- P_p - výkon odváděný přírůdky vlákna

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

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

α - akomodační koeficient

$\lambda_T(p)$ - tepelná vodivost



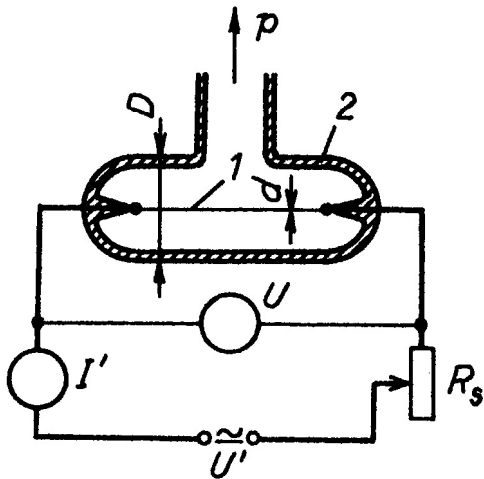
Závislost na druhu plynu, na ose x je tlak z Piraniho manometru.

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

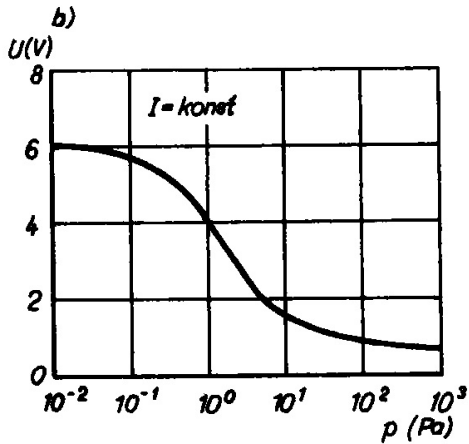
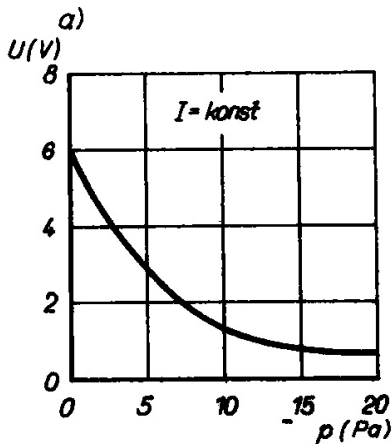
Metody měření

- Metoda konstantního proudu
- Metoda konstantní teploty (odporu)

Metoda konstantního proudu

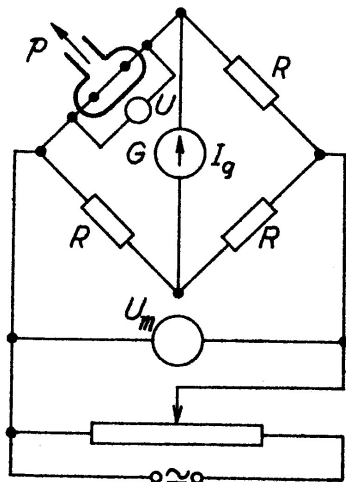


J. Groszkowski: Technika vysokého vakua, SNTL, Praha 1981

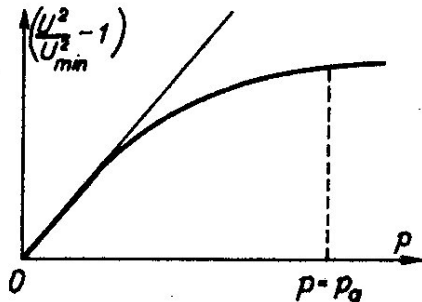


Obr. 5.19. Závislost $U = f(p)$ u manometru měřícího při $I = konst$
 a) lineární stupnice, b) semilogaritmická stupnice

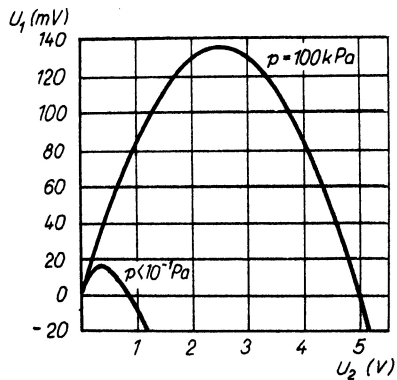
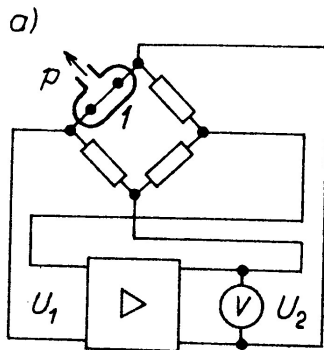
Metoda konstantní teploty (odporu)



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

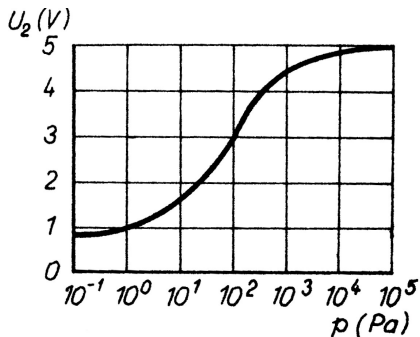


Obr. 5.18. Závislost $\frac{U^2}{U_{\min}^2} - 1 = f(p)$.
 Při nízkých tlacích je lineární



Tepelný vakuometr s konstantním odporem

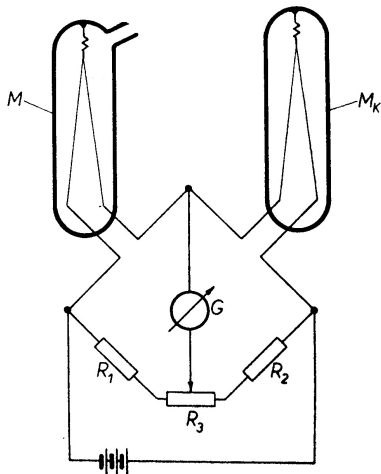
J. Groszkowski: Technika vysokého vakua, SNTL, Praha 1981



Vlákno $d = 50 \mu\text{m}$, $L = 50 \text{ mm}$, teplota $T = 470 \text{ K}$,
 měřící obor $10 - 5000 \text{ Pa}$

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

Kompenzace teploty



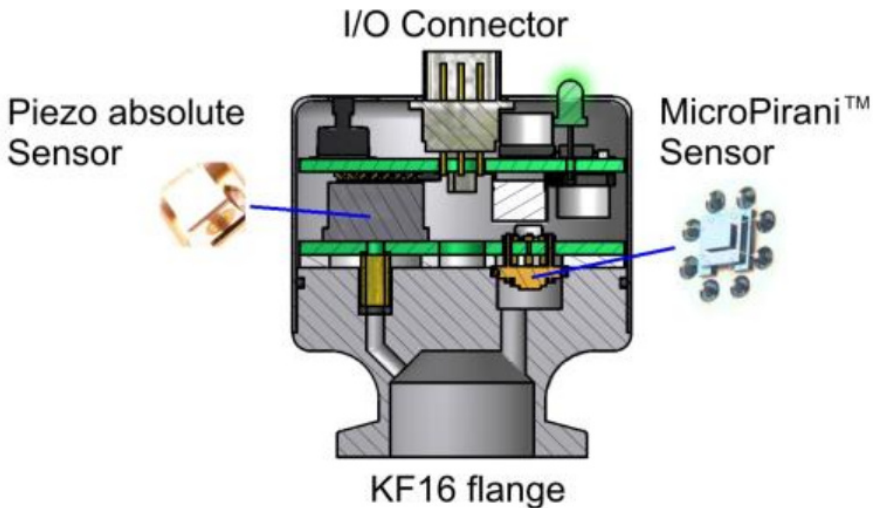
Stará metoda kompenzace teploty, dnes se používají teplotní čidla - termistor, Pt1000,...

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

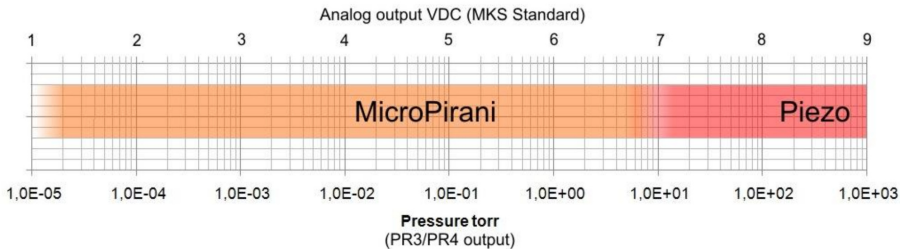
Pirani manometr

- velmi jednoduchá konstrukce
- měřicí rozsah $10^{-2} - 10^5$ Pa, v rozsahu $10^4 - 10^5$ Pa měří s velkou chybou
- chyba měření asi $\sim 15\%$, typicky v rozsahu $10^{-2} - 10^4$ Pa
- 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

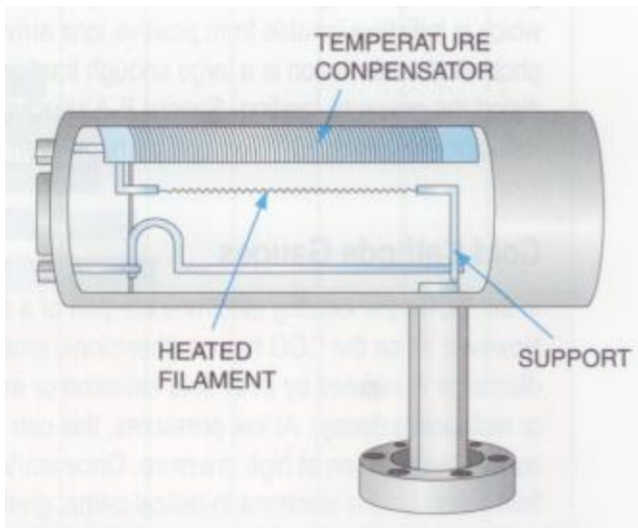
Accuracy Piezo ⁽¹⁾	0.1 to 10 Torr:	±1% of reading
	10 to 1000 Torr:	± 0.75% of reading
	1000 to 1500 Torr:	± 2% of reading
Repeatability ⁽¹⁾ (N ₂):	10 to 800 Torr	± 0.2% of reading

Supply Voltage: 9 – 30 VDC

Power consumption: < 1.2 Watt

Fuse (thermal recoverable): 200 mA

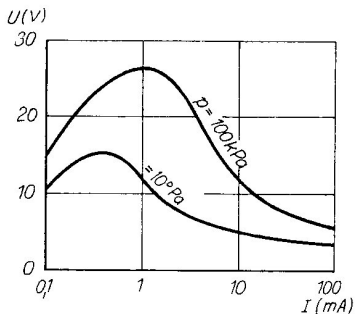
Convectron



firemní materiály firmy Kurt J. Lesker

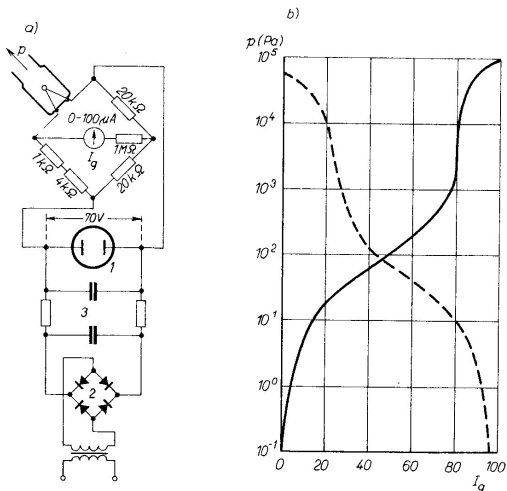
- využívá i tepelnou konvekci plynu
- předepsaná orientace
- měřicí rozsah $10^{-2} - 10^5$ Pa
- chyba měření asi $\sim 15\%$

Termistorový manometr



Obr. 5.22. Voltampérová charakteristika termistorového měřicího elementu

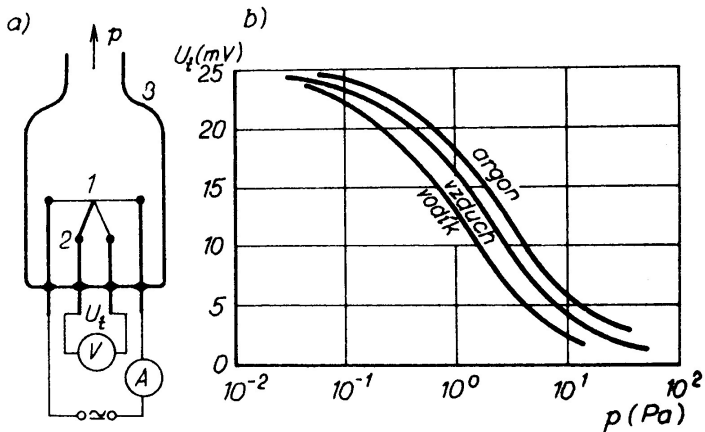
J. Groszkowski: Technika vysokého vakua, SNTL, Praha 1981



Obr. 5.23. Termistorový vakuometr (podle Pytkowského, 1955)

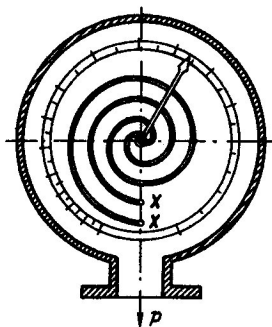
- a) elektrické schéma: 1 – výbojový stabilizátor napětí; 2 – usměrňovač proudu; 3 – filtr;
 b) kalibrační křivky pro vzduch při můstku v rovnováze: můstek vyrovnán při tlaku $p \ll 10^{-1}$ Pa (plně); můstek vyrovnán při atmosférickém tlaku (čárkovaně)

Termočlánkový-manometr



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

Dilatační manometr

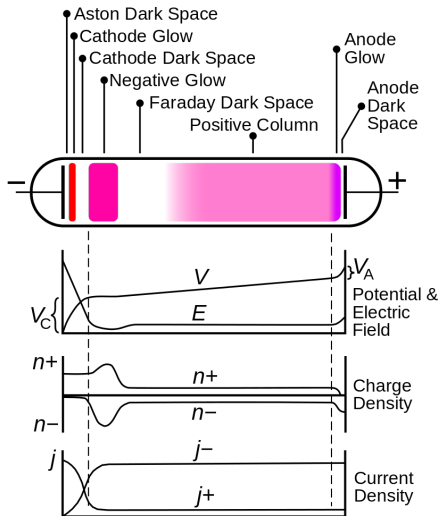


Obr. 5.26. Dvojkovový dilatační vakuometr (dle Klumba a Haase, 1936). Dvě dvojkovové (bimetalové) spirály jsou upevněny na svých koncích xx a jejich druhé konce jsou spojeny s ručičkou. Spirálami prochází proud, který je zahřívá. Ručička se otáčí v závislosti na tlaku

5W; 0,1-100 Pa

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

Indikace tlaku podle výboje



Pouze přibližná metoda.

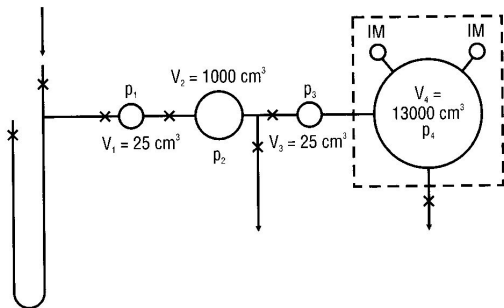
P[Pa]	Tvar výboje
$5 \times 10^3 - 10^3$	hadovitý výboj
$10^3 - 5 \times 10^2$	elektrody se pokryjí doutnavým světlem
10^2	kladný sloupec vyplní 2/3 trubice
5×10^1	vrstvy v kladném sloupci
10	vrstvy mizí, záporné světlo 1/2 trubice
5	záporné světlo v celé trubici, fluorescence skla
1	fluorescence mizí

Kalibrace manometrů

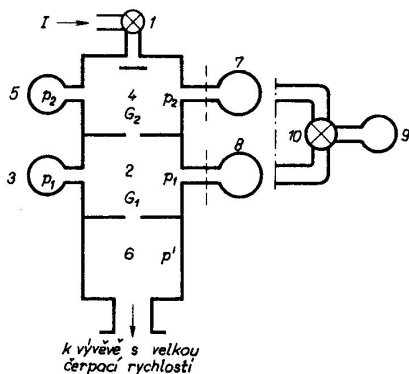
- Přímé porovnání
- Redukce tlaku
 - metody statické
 - metody dynamické

Statická expanze

$$p_n = p_1 \cdot \frac{V_1}{V_1 + V_2} \cdot \frac{V_2}{V_2 + V_3} \cdots \frac{V_{n-1}}{V_{n-1} + V_n}$$



Dynamická expanze



Obr. 5.92. Aparatura pro kalibraci vakuometrů metodou s konstantním proudem. Místo dvou vakuometrů (7, 8) je možno použít jen jeden (9) s dvoucestným kohoutem (10);
1, 10 – kohouty; 2, 4, 6 – komory;
3, 5, 7, 8, 9 – vakuometry;
 G_1 , G_2 – vodivosti otvorů mezi příslušnými komorami

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

$$I = G_2(p_2 - p_1) = G_1(p_1 - p')$$

$$\frac{p_2}{p_1} = 1 + \frac{G_1}{G_2} \left(1 - \frac{p'}{p_1}\right)$$

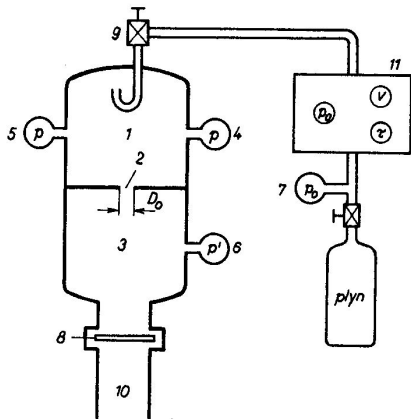
pro velkou čerpací rychlost $p' \ll p_1$

$$p_1 = \frac{1}{1 + \frac{G_1}{G_2}} p_2$$

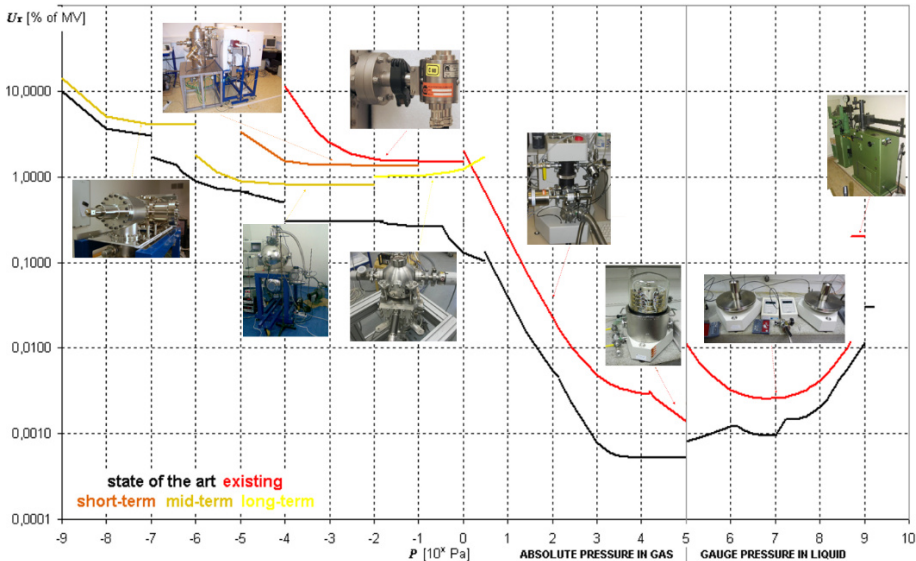
pro $G_2 \ll G_1$

$$p_1 = \frac{G_2}{G_1} p_2$$

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



Obr. 5.93. Standardní metoda
cejchování vakuometrů v oboru
tlaků 10^{-1} až 10^{-5} Pa
1, 3 – komory; 2 – kalibrovaný
otvor; 4 – kalibrační (přesný)
vakuometr; 5, 6, 7 – vakuometry;
8 – regulační ventil (záklopka);
9 – vpuštěcí ventil; 10 – difúzní
vývěva; 11 – volumetrické zařízení



Přehled etalonů metrologického institutu a jejich nejistot měření v závislosti na tlaku.
materiály ČMI