

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 $n_i = \gamma n$; $\gamma < 1$.

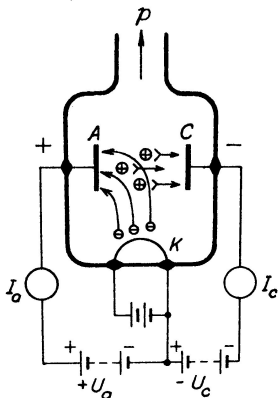
Podmínky činnosti:

- 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

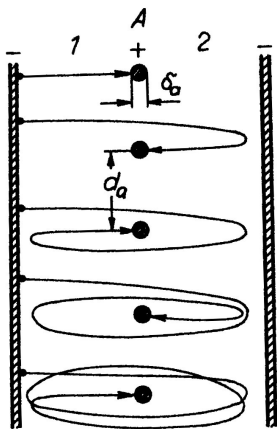
Katoda vytváří elektronový proud I_e , který ionizuje plyn. Kolektor sbírá kladné ionty. I_p - proud kladných iontů na kolektor, I_e - emisní elektronový proud na anodu, p - tlak plynu

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

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

ϵ - množství iontů vytvořených jedním elektronem na dráze 1cm 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.

$$I_c = I_p = K_0 I_e p$$

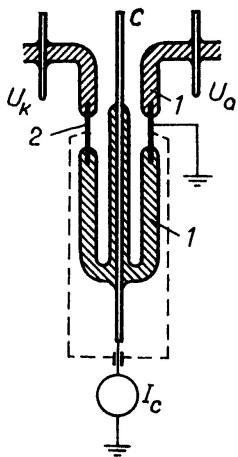
Ve skutečnosti se mohou v obvodu kolektoru projevit parazitní proudy.

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

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

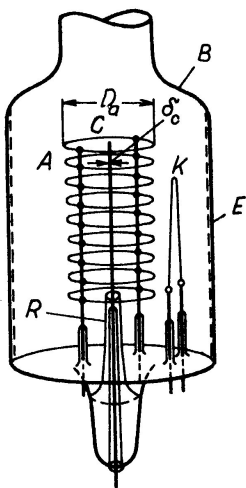
Při činnosti ionizačního manometru dochází k zachycování iontů kolektorem a tím k čerpacímu efektu.

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.

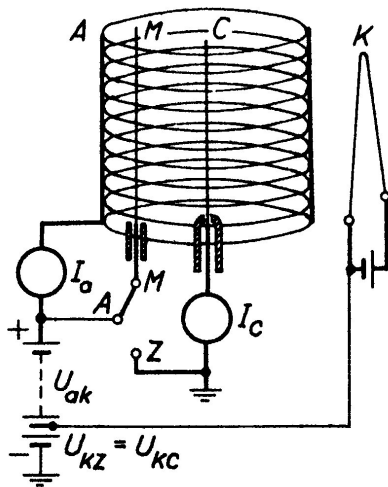
Maximální měřitelný tlak 10^0 Pa.



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

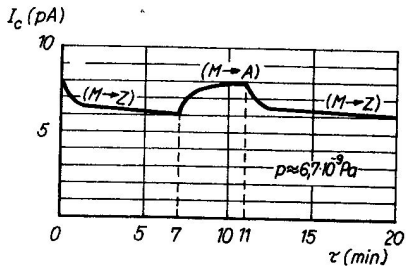
$$M \rightarrow A ; I'_c = S'p + I'_x$$

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

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

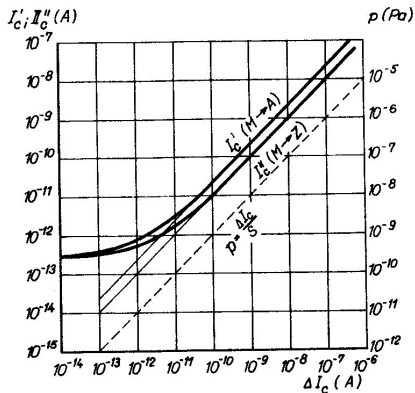
$$I'_x = I''_x \Rightarrow p = \frac{I'_c - I''_c}{S' - S''}$$

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

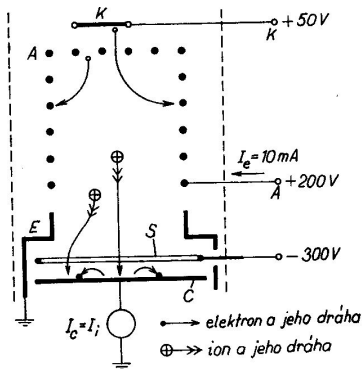


Obr. 5.49. Změny kolektorového proudu I_c při modulaci v Bayardově–Alpertově–Redheadově vakuometru. Zpomalené ustalování proudu I_c je způsobeno mezi jiným sorpčními a desorpčními procesy na modulátoru

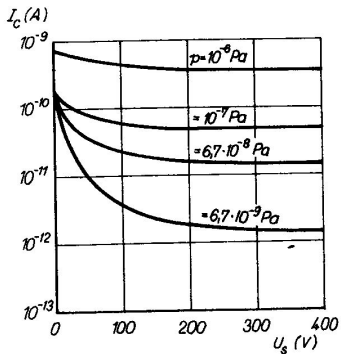
J. Groszkowski: Technika vysokého vakua, SNTL, Praha 1981



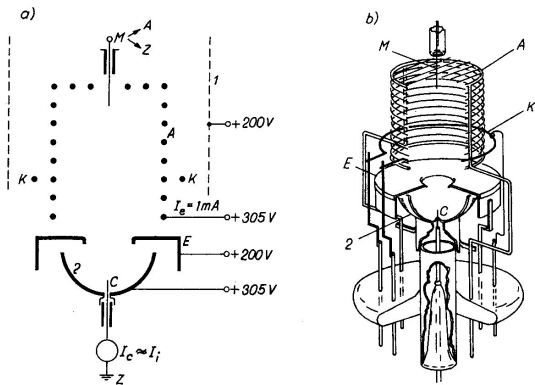
Obr. 5.48. Charakteristiky modulatorového vakuometru. Kolektorový proud: I_c' – při spojení modulatoru M s anodou ($M \rightarrow A$); I_c'' – při spojení modulatoru se zemí ($M \rightarrow Z$); závislost tlaku na rozdílovém modulačním proudu ΔI_c je vyznačena čárkovaně



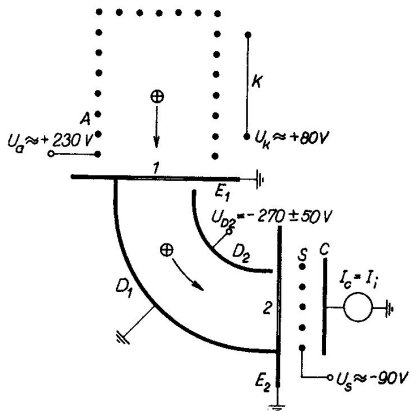
Obr. 5.51. Schumannův vakuometr s potenciálovou bariérou
 A – mřížková anoda; K – katoda;
 C – kolektor; E – stínění; S – prstencová elektroda (supresor)



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)

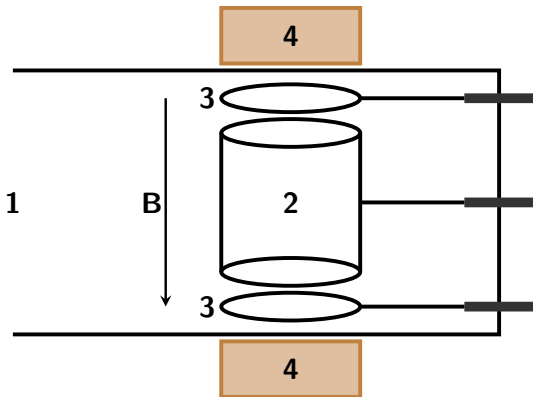
Princip: samostatný výboj

Výbojové manometry s magnetickým polem

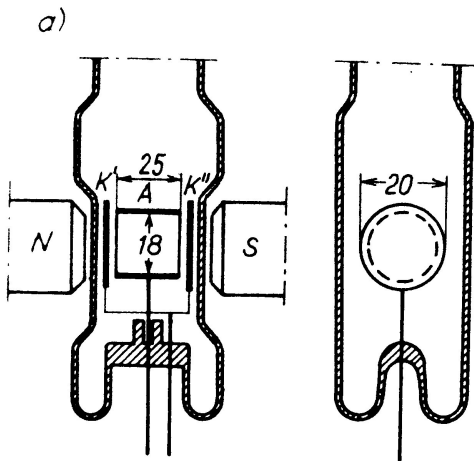
Existují dvě základní konstrukce:

- 1936 – Penningův manometr
- 1958 – Inverzní magnetron

Penningův manometr

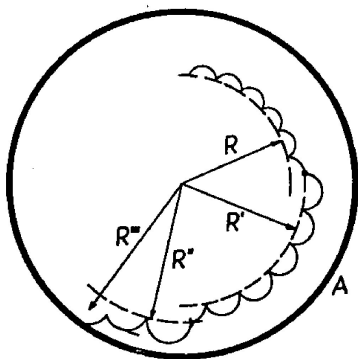


- 1 – připojení měřeného tlaku, 2 – válcová anoda, 3 – katoda,
4 – permanentní magnet



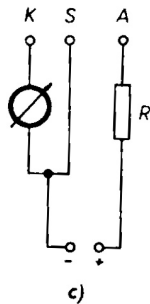
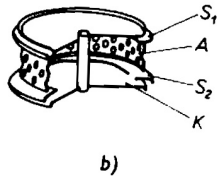
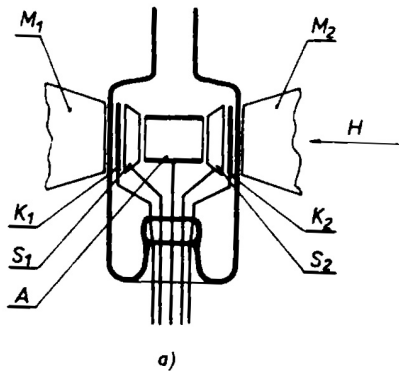
Výbojový manometr - Penning

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



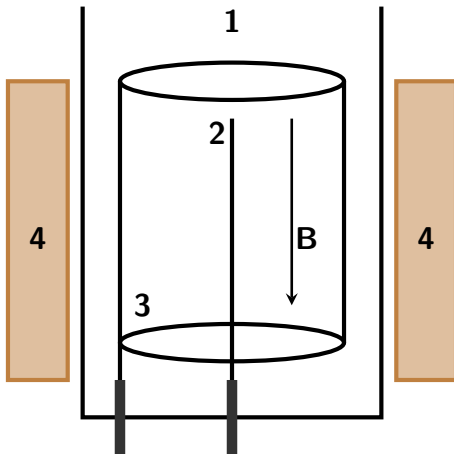
Obr. 7-26. Dráhy elektronu ve výbojovém manometru s magnetickým polem.

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

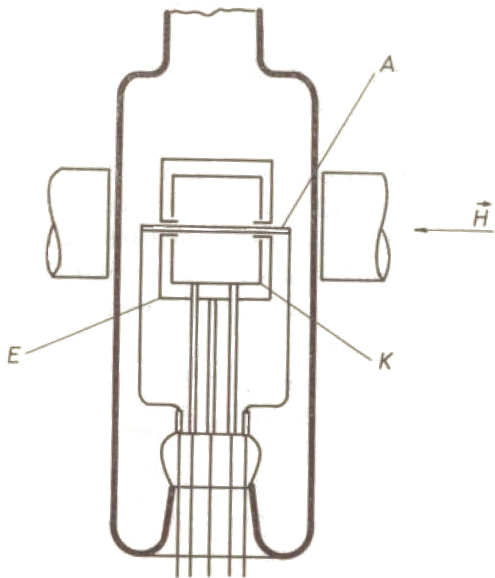


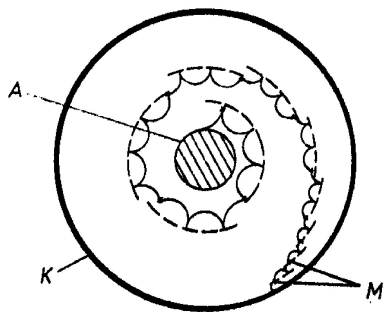
L. Pátý: Fyzika nízkých tlaků, Academia, Praha 1968

Inverzní magnetron



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

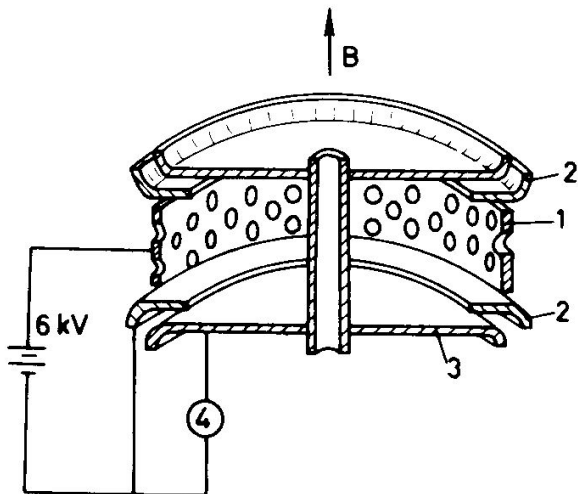




Obr. 7-30. Dráhy elektronu v inverzním výbojovém manometru

- 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:

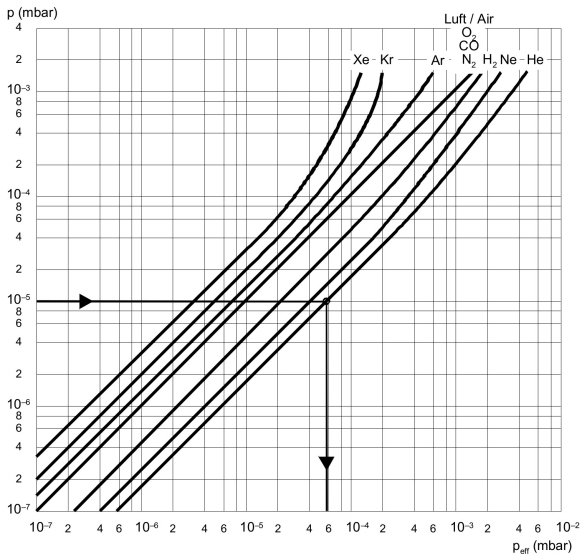
$$I = K_1 p^u$$

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



manuál IKR050 - Pfeiffer

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)

Ionizační manometr s radioaktivním zářičem (Alfatron)

Ionizace se uskutečňuje pomocí α - zářiče, zářič s velkým poločasem rozpadu (radium, 1600 let) loutkový proud je úměrný tlaku

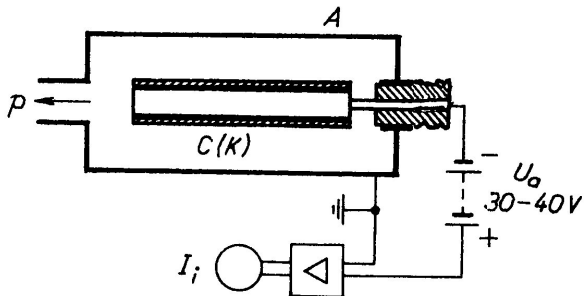
$$I_p = S p$$

S - závisí na druhu plynu, nepřímá metoda

Dolní hranice měřeného tlaku 10^{-2} Pa, (fotoproud vyvolaný β - rozpadem)

Horní hranice měřeného tlaku 10^3 Pa.

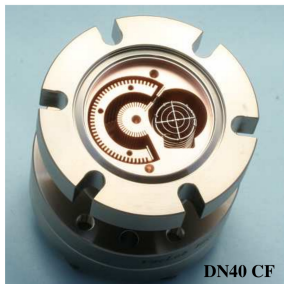
Tento typ měřky se dnes nepoužívá.



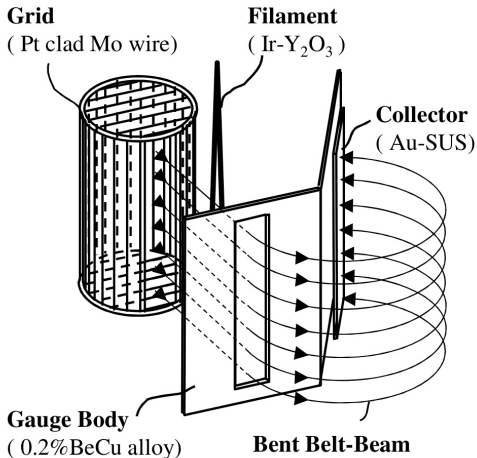
J. Groszkowski: Technika vysokého vakua, SNTL, Praha 1981

Měrka pro XHV vakuum

speciální typ ionizační měrky



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.



firemní materiály VacLab Inc.

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 - Pirani + ionizační se žhavenou katodou

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

Cvičení

- 32) Určete dobu čerpání vakuové komory. Objem komory $V = 1 \text{ m}^3$, vnitřní plocha $A = 6 \text{ m}^2$, chceme dosáhnout tlak $P_4 = 10^{-6} \text{ Pa}$. Čerpáme pomocí rotační olejové vývěvy $S_1 = 16 \text{ m}^3/\text{h}$ a turbomolekulární vývěvy $S_2 = 200 \text{ L/s}$. Atmosférický tlak $P_1 = 1013 \text{ hPa}$, $t = t_1 + t_2 + t_3$.

$$t_1 = \frac{V}{S_1} \ln \frac{(P_1)}{(P_2)} ; t_2 = \frac{V}{S_2} \ln \frac{(P_2)}{(P_3)}$$

$$t_3 = \frac{q_{des} A t_0}{S_2 P_4} , q_{des} = 2 \times 10^{-8} \frac{\text{hPa L}}{\text{scm}^2}, \text{ pro } t_0 = 1 \text{ h}$$

- t_1 : 1013 hPa \rightarrow 0,1 hPa (rotačka), $t_1 \doteq 35 \text{ min}$
- t_2 : 0,1 hPa \rightarrow 10^{-4} hPa (turbo), $t_2 \doteq 34,5 \text{ s}$
- t_3 : 10^{-4} hPa \rightarrow 10^{-6} hPa (turbo), $t_3 \doteq 360 \text{ min}$

$$t \doteq 6 \text{ h } 36 \text{ min}$$

mater.	oprac.	$q_{des} [\frac{\text{hPal}}{\text{scm}^2}](1 \text{ h})$	$q_{des} [\frac{\text{hPal}}{\text{scm}^2}](4 \text{ h})$	$q_{des} [\frac{\text{hPal}}{\text{scm}^2}](10 \text{ h})$
nerez	leštěná	2×10^{-8}	4×10^{-9}	2×10^{-10}
nerez	pískovaná	3×10^{-10}	$6,5 \times 10^{-11}$	4×10^{-11}
dural		6×10^{-8}	$1,7 \times 10^{-8}$	$1,1 \times 10^{-8}$
sklo		$4,5 \times 10^{-9}$	$1,1 \times 10^{-9}$	$5,5 \times 10^{-10}$
viton	zahřátí 4 h	$1,2 \times 10^{-6}$	$3,6 \times 10^{-7}$	$2,2 \times 10^{-7}$
viton		$1,2 \times 10^{-9}$	$3,3 \times 10^{-10}$	$2,5 \times 10^{-10}$

- 33) K velké vakuové komoře připojíme pomocí trubičky ($D = 5 \text{ mm}$, $L = 125 \text{ cm}$) komůrku s objemem $V = 250 \text{ cm}^3$. V celé aparatuře je tlak $P_1 = 1,333 \text{ Pa}$, ve velké komoře rychle snížíme tlak na $P_0 = 1,333 \times 10^{-2} \text{ Pa}$. Za jak dlouho bude v malé komůrce tlak $P_2 = 2,666 \times 10^{-2} \text{ Pa}$? V aparatuře je vzduch, teplota je 293 K .

$$t = \frac{V}{S} \ln \frac{(P_1 - P_0)}{(P_2 - P_0)} ; S = G$$

$pD = 0,005 \times 2,666 \cdot 10^{-2} \doteq 0,0001 \text{ mPa}$ molekulární proudění

$$G = 1,215 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$$

$$t \doteq 94,5 \text{ s}$$

- 34) K aparatuře je připojen otevřený U-manometr naplněný rtutí. Rozdíl hladin v ramenech je $h = 200$ mm. Jaký tlak je v aparatuře? Atmosférický tlak je 10^5 Pa.

$$P = P_{atm} - h \text{ [torr]}$$

$$P = 10^5 - 200 \times 133,322 \text{ [Pa]}$$

$$P \doteq 73,3 \text{ kPa}$$

- 35) K aparatuře je připojen uzavřený U-manometr naplněný rtutí. Rozdíl hladin v ramenech je $h = 200$ mm. Jaký tlak je v aparatuře? Atmosférický tlak je 10^5 Pa.

$$P = h \text{ [torr]}$$

$$P = 200 \times 133,322 \text{ [Pa]}$$

$$P \doteq 26,7 \text{ kPa}$$

36) Odvoďte vztah pro McLeodův manometr.

$$P_1 V_1 = P_2 V_2$$

V_1 objem baňky a kapiláry.

$$P_2 = P_1 + H \text{ [torr]} , V_2 = \frac{1}{4} \pi d^2 h$$

kde d je průměr kapiláry, h je rozdíl rovin X4, X2

$$P_1 = \frac{V_2}{V_1} P_2 = \frac{\pi d^2}{4V_1} h (P_1 + H)$$

$K = \frac{\pi d^2}{4V_1}$ je konstanta manometru

$$P_1 = Kh(P_1 + H) \Rightarrow P_1 = \frac{KhH}{1 - Kh}$$

pro $Kh \ll 1$ lze zjednodušit na

$$P_1 = KhH \text{ [torr]}$$

- 37) Navrhněte McLeodův manometr, který bude měřit v rozsahu $6,67 \times 10^{-4} \text{ Pa} - 1,5 \text{ Pa}$ a bude používat kvadratickou stupnici. Průměr měřící kapiláry je $0,6 \text{ mm}$, konstanta manometru je $K_0 = 1,666 \times 10^{-4} \text{ Pa mm}^{-2}$. Odhadněte potřebné množství rtuti. Určete délku měřící kapiláry. Hustota Hg je $\rho = 13546 \text{ kg m}^{-3}$.

$$P_{min} = 6,67 \times 10^{-4} \text{ Pa} = K_0 h^2 \Rightarrow h \doteq 2 \text{ mm}$$

$$P_{max} = 1,5 \text{ Pa} = K_0 h^2 \Rightarrow h \doteq 95 \text{ mm}$$

$$K_0 = 133,322 \times \frac{\pi d^2}{4V_1} = 1,666 \times 10^{-4} \text{ Pa mm}^{-2} \Rightarrow V_1 \doteq 226,2 \text{ cm}^3$$

$$\text{odhad Hg } 300 \text{ cm}^3 \Rightarrow m \doteq 4 \text{ kg}$$

38) Odvoďte vztah pro molekulární manometr.

- 39) Určete relativní chybu měření kapacitního manometru při změně teploty o $1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Maximální měřitelný tlak 1000 torr. Chyby měření podle manuálu $0,2\%$ z čtené hodnoty + $0,005\%$ z rozsahu (F.S.) při změně teploty o $1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Relativní chybu určete pro měřené tlaky 100 torr a 1 torr.

- 40) Odhadněte čerpací rychlost ionizačního manometru se žhavenou katodou. Konstanta manometru je $K = 0,075 \text{ Pa}^{-1}$, proud elektronů je $I_e = 1 \text{ mA}$, teplota plynu $20 \text{ }^\circ\text{C}$.

- 41) Jak dlouho bude trvat vyčerpání vakuovou komoru z tlaku $P_1 = 10^{-1}$ Pa na tlak $P_2 = 10^{-2}$ Pa? Objem komory je 1 L, čerpací rychlost vývěvy 0,00189 L/s, mezní tlak zanedbejte.