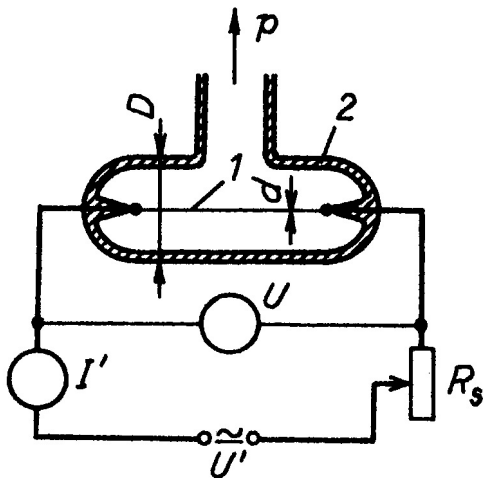


Tepelné manometry

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



1

¹J. Groszkowski: Technika vysokého vakua, SNTL, Praha 1981

Odpor vlákna $R = f(T)$

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

$$P_e = P_c + P_z + P_p$$

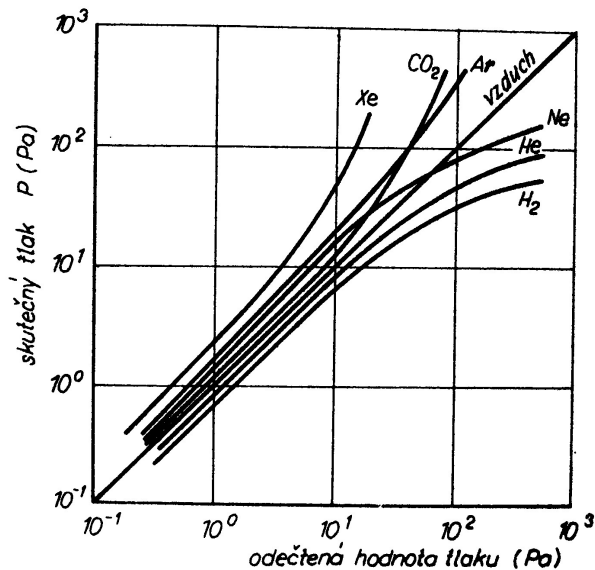
- P_c - výkon odváděný molekulami plynu
- P_z - výkon odváděný zářením vlákna
- P_p - výkon odváděný přírůdky vlákna

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

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

α - akomodační koeficient

$\lambda_T(\rho)$ - tepelná vodivost



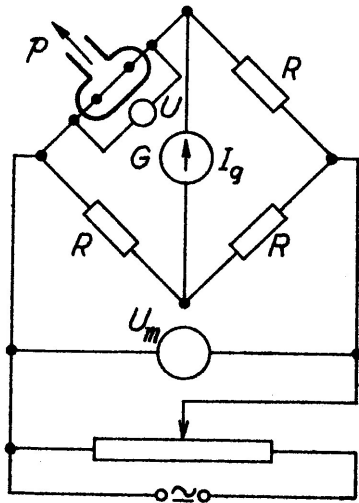
Tab. 5.3. Měrný odpor ρ a teplotní součinitel odporu β (orientační údaje)

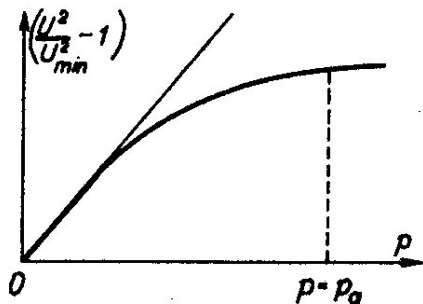
Kov	ρ ($t = 0^\circ\text{C}$) ($\Omega \text{ cm}$)	β ($t = 0$ až 100°C) (K^{-1})
konstantan (60 % Cu, 40 % Ni)	$50 \cdot 10^{-6}$	~ 0
měď (obyčejná, vyžíhaná)	$1,6 \cdot 10^{-6}$	$4,5 \cdot 10^{-3}$
molybden (vyžíhaný)	$4,5 \cdot 10^{-6}$	$3,3 \cdot 10^{-3}$
nikl (obyčejný)	$6,5 \cdot 10^{-6}$	$6 \cdot 10^{-3}$
platina	$10 \cdot 10^{-6}$	$3 \cdot 10^{-3}$
slitina Pt–Rh (90 % Pt)	$21 \cdot 10^{-6}$	$4 \cdot 10^{-3}$
stříbro elektrolytické	$1,5 \cdot 10^{-6}$	$4 \cdot 10^{-3}$
tantal	$15 \cdot 10^{-6}$	$4,5 \cdot 10^{-3}$
wolfram (vyžíhaný)	$4,5 - 5,5 \cdot 10^{-6}$	$4,5 \cdot 10^{-3}$
železo (čistě)	$9 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-3}$

3

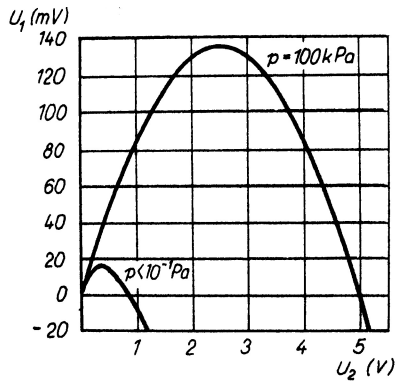
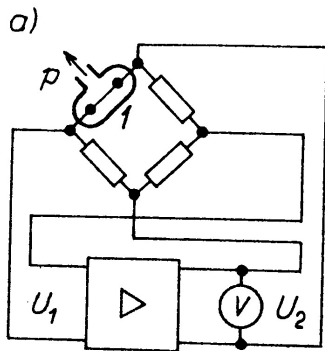
Metody měření

- Metoda konstantní teploty (odporu)
- Metoda konstantního proudu



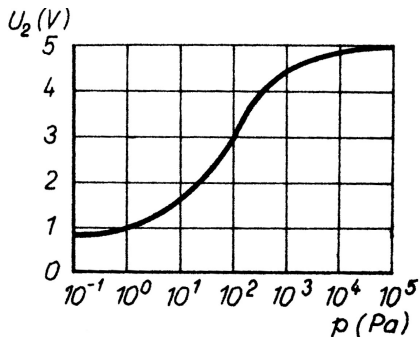


Obr. 5.18. Závislost $\frac{U^2}{U_{\min}^2} - 1 = f(p)$.
 Při nízkých tlacích je lineární



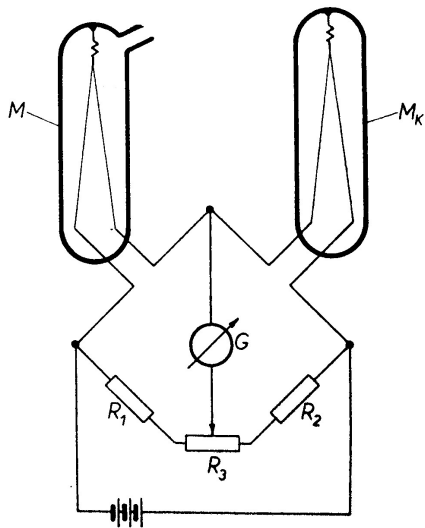
Tepelný vakuometr s konstantním odporem ⁶

⁶J. Groszkowski: Technika vysokého vakua, SNTL, Praha 1981



Vlákno $d = 50 \mu\text{m}$, $L = 50 \text{ mm}$, teplota $T = 470 \text{ K}$,
 měřící obor $10 - 5000 \text{ Pa}$ ⁷

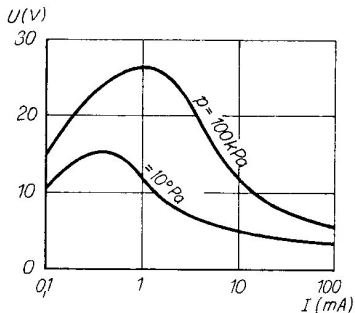
⁷J. Groszkowski: Technika vysokého vakua, SNTL, Praha 1981



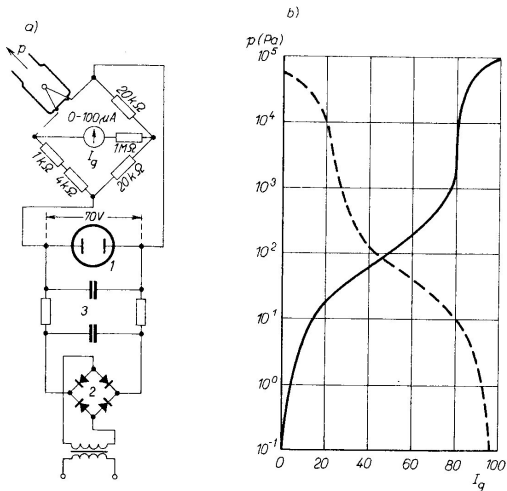
Pirani manometr

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

Termistorový manometr



Obr. 5.22. Voltampérová charakteristika termistorového měřícího elementu

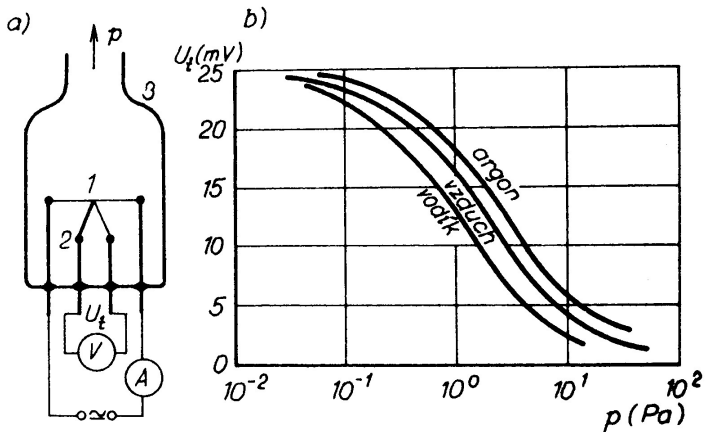


Obr. 5.23. Termistorový vakuometr (podle Pytkowského, 1955)

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)

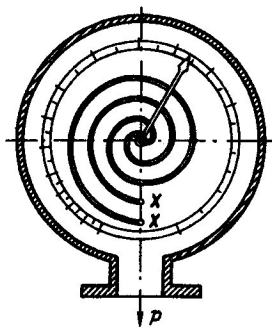
Termočlánkový-manometr



11

¹¹J. Groszkowski: Technika vysokého vakua, SNTL, Praha 1981

Dilatační manometr



Obr. 5.26. Dvojkový 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, 0.1-100Pa

12

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

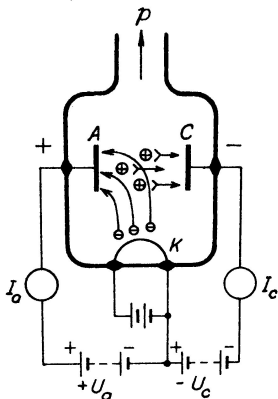
Podmínky činnosti:

- 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



13

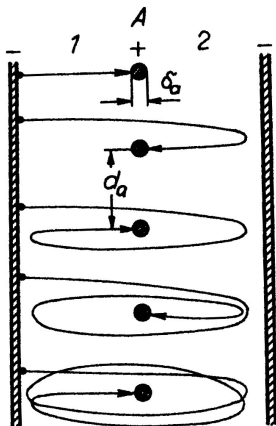
Katoda vytváří elektronový proud I_e , který ionizuje plyn. Kolektor sbírá kladné ionty. I_p - proud kladných iontů na kolektor, I_e - emisní elektronový proud na anodu, p - tlak plynu

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

$K_0 [Pa^{-1}]$ 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
$U_{max} [V]$	110	170	65	95	100	120	90	85



Kmity elektronů při použití mřížkové anody. ¹⁴

¹⁴J. 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.

$$I_c = I_p = K_0 I_e p$$

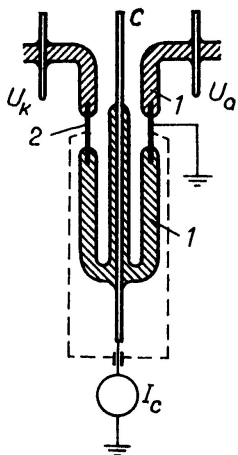
Ve skutečnosti se mohou v obvodu kolektoru projevit parazitní proudy.

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

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.¹⁵

¹⁵J. Groszkowski: Technika vysokého vakua, SNTL, Praha 1981

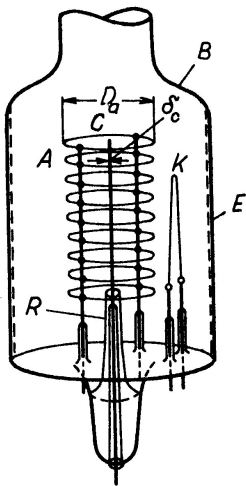
Při činnosti ionizačního manometru dochází k zachycování iontů kolektorem a tím k čerpacímu efektu.

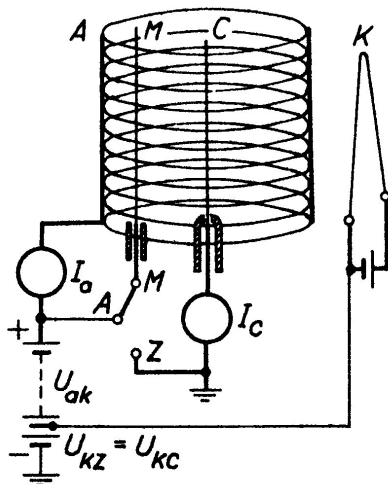
Konstrukce manometru

- 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 $10^0 Pa$.





Modifikace Bayard-Alpert-Redhead, pro měření nízkých tlaků

17

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

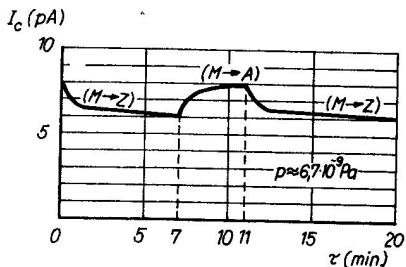
$$M \rightarrow A ; I'_c = S'p + I'_x$$

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

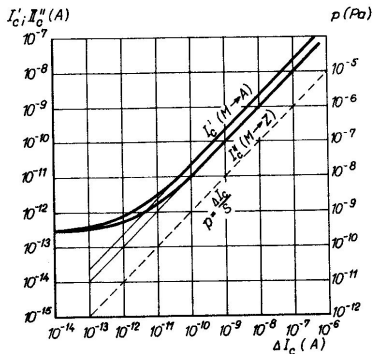
$$S'' < S' \Rightarrow I'_c - I''_c = (S' - S'')p + (I'_x - I''_x)$$

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

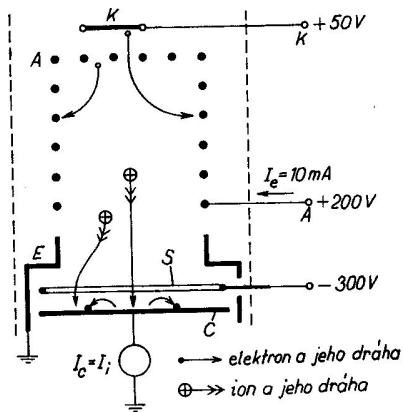
můžeme měřit tlaky $\sim 10^{-10} Pa$ (tenze par W při $T=2000K$
 $P_p \sim 10^{-10} Pa$) Ionizační manometry mění složení i tlak měřeného plynu.
Chyba měření $\sim 15\%$. Speciální modifikace vnořený manometr.



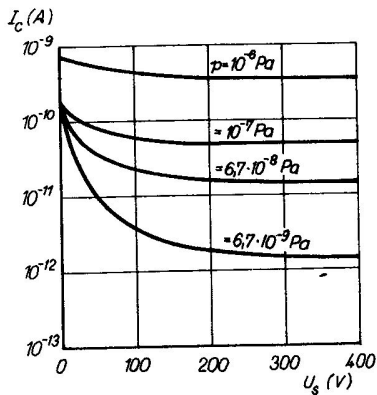
Obr. 5.49. Změny kolektorového proudu I_c při modulaci v Bayardově–Alpertově–Redheadově vakuometru. Zpomalené ustalování proudu I_c je způsobeno mezi jiným sorpčními a desorpčními procesy na modulátoru



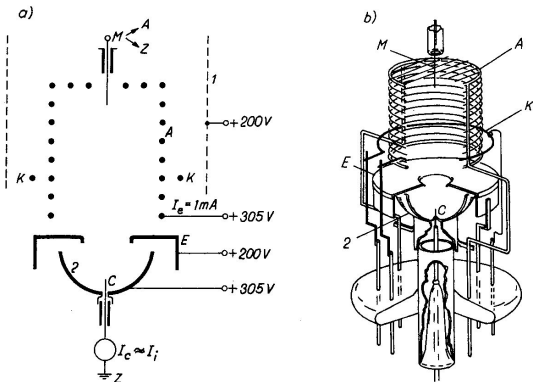
Obr. 5.48. Charakteristiky modulátorového vakuometru. Kolektorový proud: I_c' – při spojení modulátoru M s anodou ($M \rightarrow A$); I_c'' – při spojení modulátoru se zemí ($M \rightarrow Z$); závislost tlaku na rozdílovém modulačním proudu ΔI_c je vyznačena čárkovaně



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

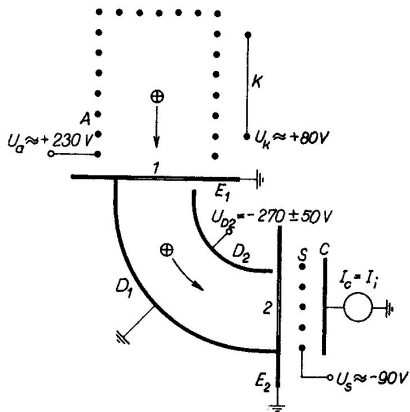


Obr. 5.52. Závislost kolektorového proudu I_c na potenciálu (záporném) supresoru U_s a tlaku p



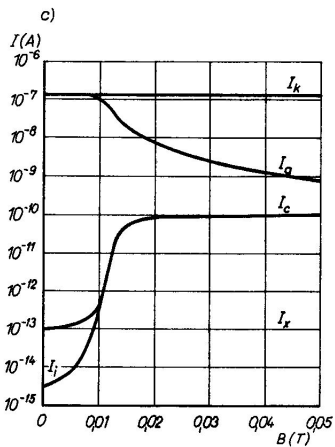
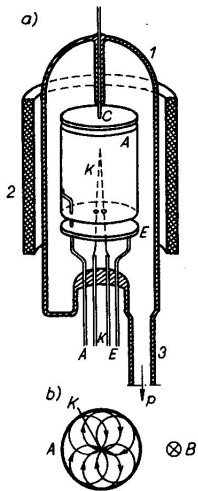
Obr. 5.53. Redheadův extraktorový vakuometr: a) schéma, b) konstrukční provedení. Stínění a baňka jsou na potenciálu katody (200 V), reflektor iontů je spojen s anodou (305 V)

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



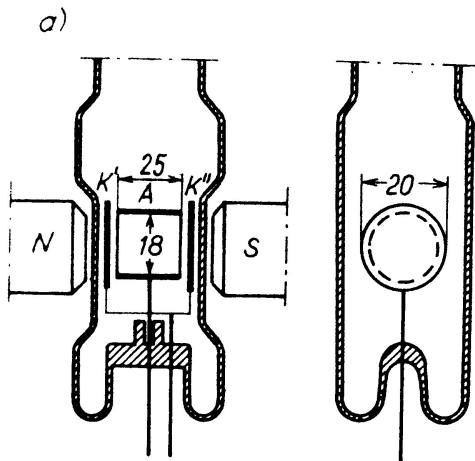
Ionizační manometr se studenou katodou (Výbojový manometr)

Měření využívá závislosti parametrů elektrického výboje za nízkého tlaku na tlaku. Princip je založen na samostatném výboji, který vzniká při vysokém napětí. Proud procházející výbojem je mírou tlaku $I = f(p)$.

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

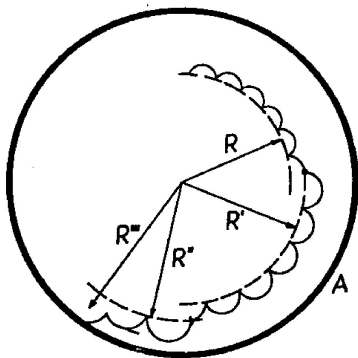
- N_e - počet elektronů emitovaných katodou za 1s
- L_i - dráha na které dochází k ionizaci
- d_0 - efektivní průměr molekuly plynu
- U_i - ionizační potenciál plynu
- E - intenzita elektrického pole mezi K-A
- p - tlak plynu

$$I = Sp$$

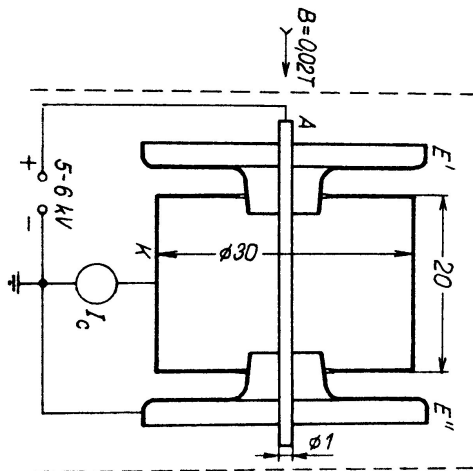


Výbojový manometr - Penning ²⁴

²⁴J. Groszkowski: Technika vysokého vakua, SNTL, Praha 1981

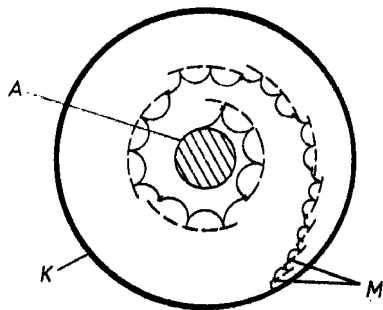


Obr. 7-26. Dráhy elektronu ve výbojovém manometru s magnetickým polem.



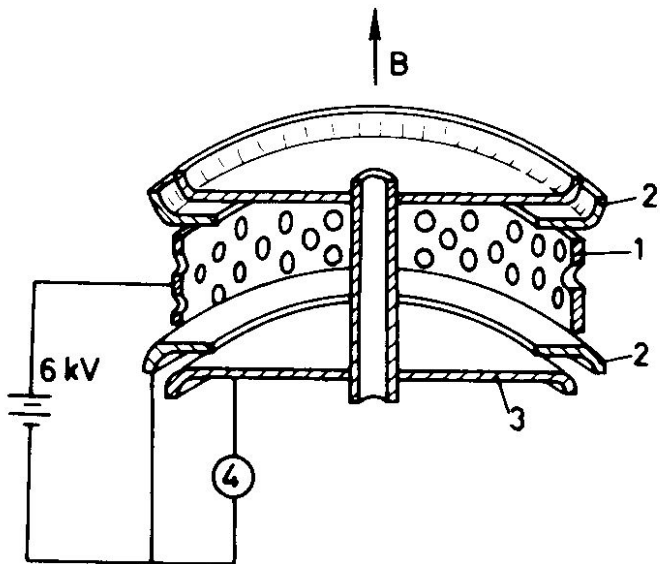
Výbojový manometr - inverzní magnetron ²⁶

²⁶J. Groszkowski: Technika vysokého vakua, SNTL, Praha 1981



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

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



- 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

Dolní hranice měřeného tlaku $10^{-7} Pa$.

Se stínící elektrodou dolní hranice tlaku $10^{-9} Pa$.

Horní hranice měřeného tlaku $10^0 Pa$.

Velká dráha elektronů vlivem geometrie elektrod a magnetického pole. Při nízkém tlaku potíže se zapálením a s udržení stabilního výboje.

Rozprašování elektrod. Chyba měření asi $\sim 15 - 30\%$.

Ionizační manometr s radioaktivním zářičem (Alfatron)

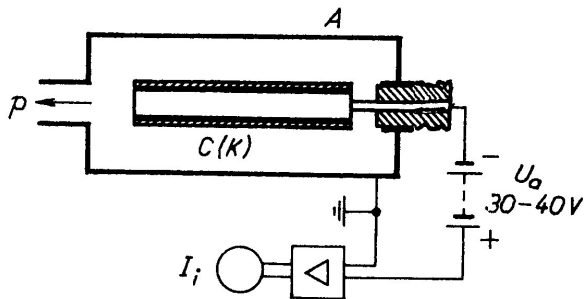
Ionizace se uskutečňuje pomocí α - zářiče, zářič s velkým poločasem rozpadu (radium, 1600let) Iontový proud je úměrný tlaku

$$I_p = Sp$$

S - závisí na druhu plynu, nepřímá metoda

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

Horní hranice měřeného tlaku $10^3 Pa$.



29

Sorpční měřící metoda

K měření tlaku můžeme využít závislosti objemové koncentrace na koncentraci povrchové.

$$n_s = \nu \tau$$

τ - je doba pobytu molekul na stěně, n_s - je povrchová koncentrace

$$\nu = \frac{1}{4} n v_a ; p = nkT \Rightarrow n_s = \frac{p}{\sqrt{2\pi kTm_0}} \quad \tau = \frac{N'}{A}$$

Dokonale odplyněný povrch části systému (povrch vlákna, který se žhavlil průchodem proudu) se uvede do styku s molekulami měřeného objemu za normální teploty. Po době Δt se vlákno zahřeje a tím se uvolní molekuly adsorbované během této doby. Jiným manometrem (nejčastěji ionizačním se žhavenou katodou) se změří tlak p' .

Předpoklady $\tau > \Delta t$; $p' \gg p$

$$\nu = \frac{N'}{A\Delta t} ; p' = \frac{N'kT}{V} \Rightarrow N' = \frac{p'V}{kT}$$

$$p = \nu\sqrt{2\pi kTm_0} \Rightarrow p = \frac{N'}{A\Delta t}\sqrt{2\pi kTm_0}$$

$$p = K \frac{p'}{\Delta t}$$

Měříme pouze průměrný tlak během doby Δt . Měření je nespojité. Horní hranice pro měřený tlak je dána podmínkou, že na konci doby Δt není ještě vytvořena monomolekulární vrstva adsorbovaných molekul $\sim 10^{-7} Pa$. Zdola není měřený tlak omezen.

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 světlemj
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

Manometr na principu dynamické expanze

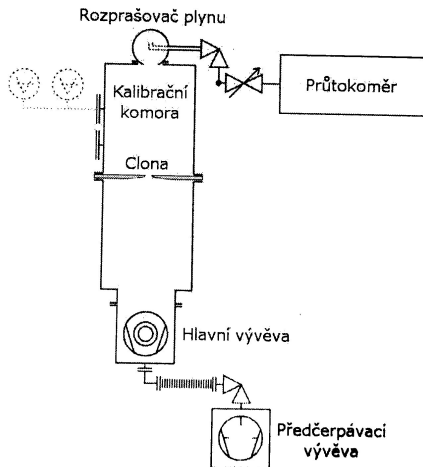
Do kalibrační komory vpouštíme známý proud plynu a komoru čerpáme známou čerpací rychlostí. Pak platí

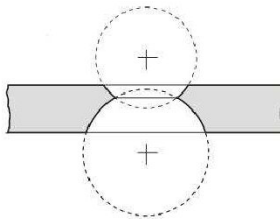
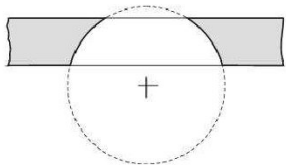
$$p = \frac{I}{S}$$

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 clonou.

$$p = I \left(\frac{1}{S} + \frac{1}{C} \right)$$

Měřicí rozsah $10^{-1} - 10^{-5} Pa$, v daném rozsahu nejpřesnější.





Speciální clony NPL (vyrábí National Physical Laboratory)

31

Manometr	metoda	min [Pa]	max [Pa]
kapalinové U-trubice	absolutní	10^{-1}	10^5
McLeodův	absolutní	10^{-4}	10^2
mechanické	absolutní	10^2	10^5
kapacitní	absolutní	10^{-3}	10^5
piezo	absolutní	10^1	10^5
viskózní s kuličkou	nepřímá	10^{-5}	10^1
Pirani	nepřímá	10^{-2}	10^5
ionizační se žhavenou katodou	nepřímá	10^{-9}	10^0
ionizační se studenou katodou	nepřímá	10^{-7}	10^0