

F6450

Vakuová fyzika 2

Pavel Slavíček

email: ps94@sci.muni.cz

Osnova

- Vázané plyny
- Sorpční vývěvy
 - kryogenní
 - zeolitové
 - sublimační
 - iontové
 - getrové - vypařované, nevypařované (NEG)
- Měření ve vakuové fyzice
 - měření proudu plynu
 - měření tenze par plynu
- Konstrukční prvky vakuových zařízení - vhodné materiály, spoje (pevné, rozebíratelné), el.přůchodky, přenos pohybu do vakua, ventily, ...
- Povlakování

Literatura

- J. Groszkowski: Technika vysokého vakua, SNTL, Praha 1981
- L. Pátý: Fyzika nízkých tlaků, Academia, Praha 1968
- V. Sítko: Vakuová technika, SNTL, Praha 1966
- J. Král: Cvičení z vakuové techniky, ČVUT Praha 1996
- V. Dubravcová: Vákuová a ultravákuová technika, Alfa, Bratislava 1992
- A. Roth: Vacuum technology, Elsevier, 1990
- W. Espe: Technologia hmot vákuovej techniky, Slovenská akadémia vied, Bratislava 1960
- W. H. Kohl: Handbook of materials and techniques for vacuum devices, AIP Press, 1995

- T.A.Delchar: Vacuum Physics and Techniques, Chapman-Hall, 1993
- F.OHanlon: A Users Gaude to Vacuum Technology, Wiley (2003)
- J.Jelínek, Z. Málek: Kryogenní technika, SNTL, Praha, 1982
- Zpravodaje CVS
- Firemní katalogy

Literatura - internet

- www.vakspol.cz
- www.svc.org
- www.fzu.cz
- www.shm-cz.cz
- lhc.web.cern.ch/lhc/
- en.wikipedia.org/wiki/main_page
- [www - stránky výrobců vakuové techniky](#)
- ...

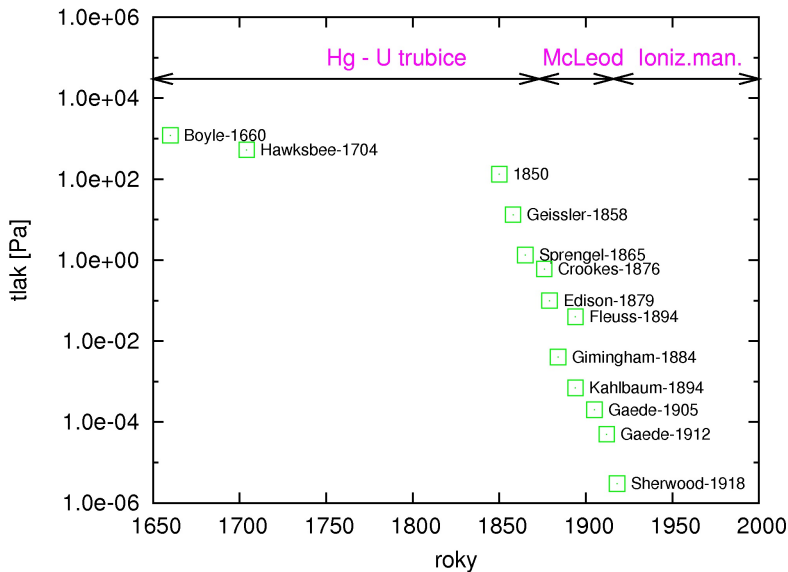
Rozdělení vakua

vakuum	tlak [mbar]	tlak [Pa]
nízké (GV), hrubé, technické	$10^3 - 10^0$	$10^5 - 10^2$
střední (FV)	$10^0 - 10^{-3}$	$10^2 - 10^{-1}$
vysoké (HV)	$10^{-3} - 10^{-7}$	$10^{-1} - 10^{-5}$
velmi vysoké (UHV)	$10^{-7} - 10^{-10}$	$10^{-5} - 10^{-8}$
extrémně vysoké (XHV)	$< 10^{-10}$	$< 10^{-8}$

Rozdělení vakua

vakuum	střední (FV)	vysoké (HV)	(UHV) a (XHV)
tlak [Pa]	$10^2 - 10^{-1}$	$10^{-1} - 10^{-5}$	$< 10^{-5}$
koncentrace [cm^{-3}]	$10^{16} - 10^{13}$	$10^{13} - 10^9$	$< 10^9$
střední dráha λ [cm]	$10^{-2} - 10^1$	$10^1 - 10^5$	$> 10^5$
monovrstva τ [s]	$10^{-5} - 10^{-2}$	$10^{-2} - 10^2$	$> 10^2$
typ proudění	Knudsenovo	molekulární	molekulární

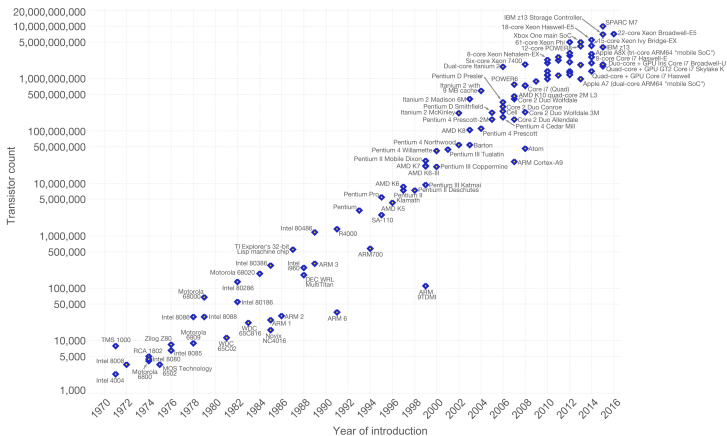
Proč UHV a XHV vakuum?



Aplikace v mikroelektronice

Moore's Law – The number of transistors on integrated circuit chips (1971-2016)

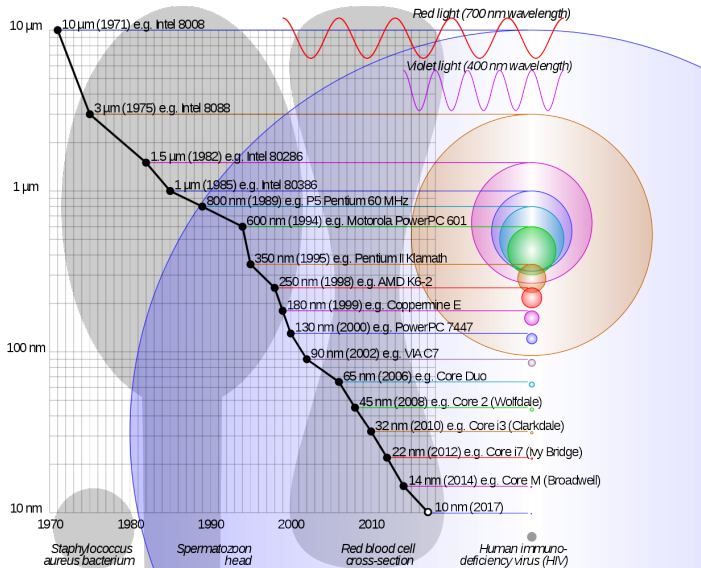
Moore's law describes the empirical regularity that the number of transistors on integrated circuits doubles approximately every two years. This advancement is important as other aspects of technological progress – such as processing speed or the price of electronic products – are strongly linked to Moore's law.



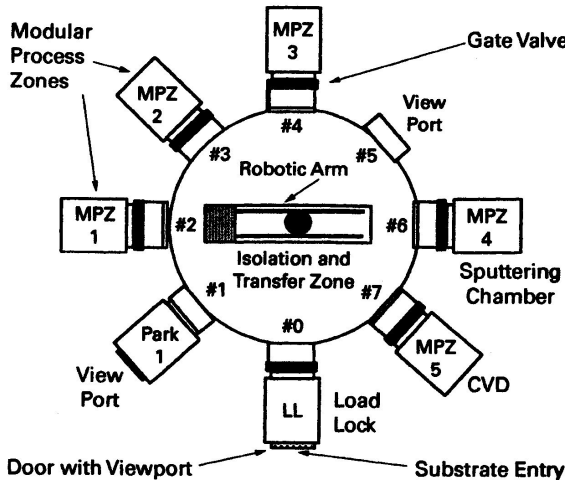
Data source: Wikipedia (https://en.wikipedia.org/wiki/Transistor_count)
The data visualization is available at [OurWorldInData.org](https://www.ourworldindata.org). There you find more visualizations and research on this topic.

Licensed under CC-BY-SA by the author Max Roser.

<http://en.wikipedia.org/wiki/>



<http://en.wikipedia.org/wiki/>

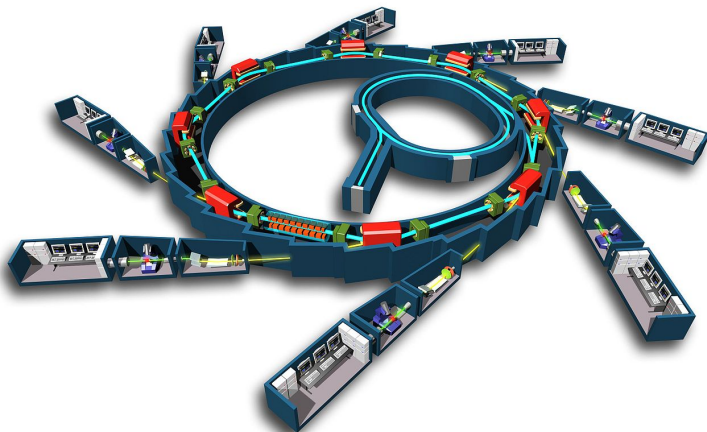


F.OHanlon: A Users Guide to Vacuum Technology, Wiley (2003)

Urychlovače částic

- velká střední volná dráha
- LHC, synchrotrony, ...
- základní výzkum - částicová fyzika, materiály, biologie, medicína
- farmaceutický průmysl
- léčení rakoviny
- v roce 2015 bylo v provozu asi 17 000 urychlovačů

Synchrotron



<http://en.wikipedia.org/>

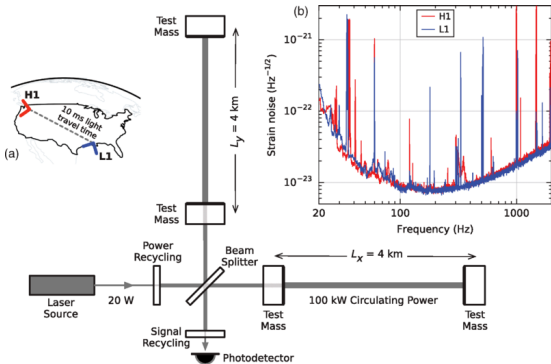
Elektronové mikroskopy

- katoda termoemisní $< 10^{-2}$ Pa
- katoda autoemisní studená emise $< 10^{-8}$ Pa
- Schottkyho katoda $< 10^{-6}$ Pa
- prodloužení životnosti, vyšší stabilita, užší svazek elektronů
- výhody autoemise - nižší rozptyl energií elektronů \implies menší stopa, větší rozlišení



LIGO - Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory

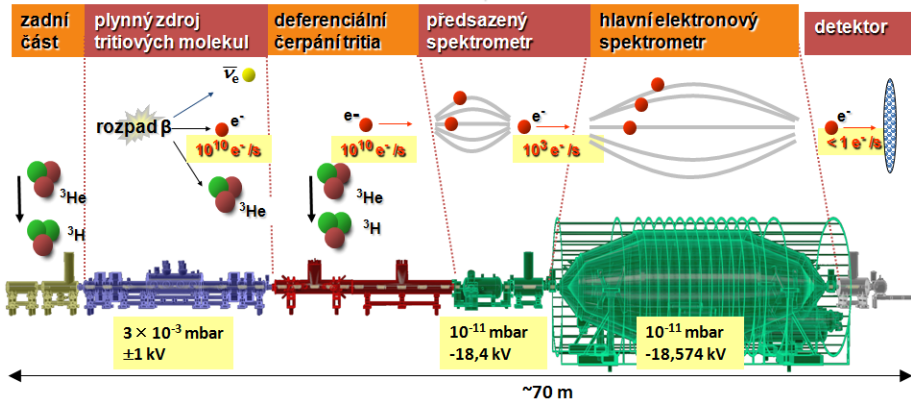
objem asi $10\,000\text{ m}^3$, tlak $\sim 10^{-7}\text{ Pa}$



Wikipedia

Experiment - KATRIN

parametry zdroje stabilní sloupcová hustota tritia transport částic β a odčerpání tritia zadržení nízkoenergetických částic β přesná energetická analýza částic β polohově citlivý detektor částic β



www.osel.cz

Experiment - KATRIN



www.symmetrismagazine.org

Vázané plyny

Plyny, které jsou na povrchu, nebo uvnitř pevné látky, nebo jsou uzavřeny v pórech a dutinách. Plyny se mohou v látkách rozpouštět a difundovat a tak pronikat z vnějšího prostředí stěnami do vakuového systému.

Sorpce:

- adsorpci - na povrchu
- absorpci - difuze do objemu

Příklad:

Vliv adsorbovaných plynů na vakuum.

Reaktor ve tvaru krychle o straně 10 cm je pokryt na vnitřních stěnách mono-molekulární vrstvou plynu. Je v něm plyn o tlaku 1×10^{-4} Pa a teplotě 300 K. Nějakým způsobem uvolníme všechny vázaný plyn ze stěn. Předpokládejme, že teplota plynu zůstane stejná. Jaký je výsledný tlak v reaktoru?

Řešení:

Počet molekul v objemu při tlaku $P = 1 \times 10^{-4}$ Pa:

$$N = nV = \frac{P}{kT}V = 2,4 \times 10^{13}$$

Počet molekul na stěnách:

$$N_1 = 6 \times S \times N_p$$

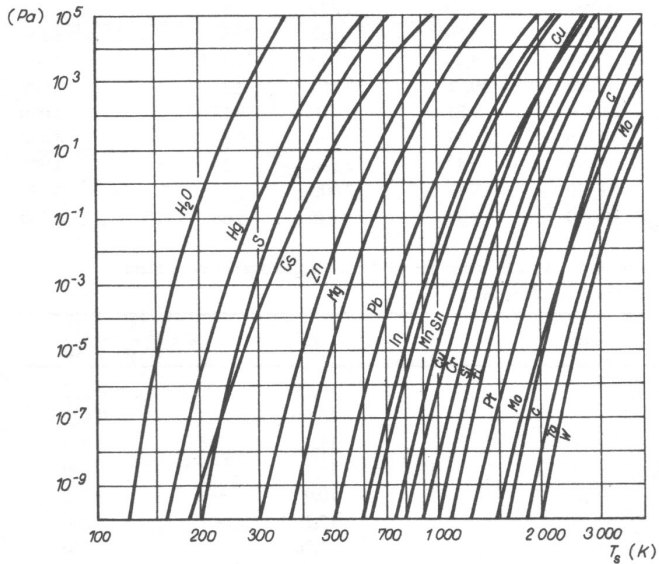
$$N_1 = 6 \times 100 \times 0,5 \times 10^{15} = 3 \times 10^{17}$$

tlak uvolněných molekul:

$$P_1 = n_1 kT = \frac{N_1}{V} kT = 1,24 \text{ Pa}$$

Požadavky na materiály používané ve vakuové technice:

- co možná nejmenší uvolňování plynů a par, nízká tenze par při pracovní teplotě
- malá schopnost pohlcovat a propouštět plyny
- dobré tepelné vlastnosti (4 – 700 K)
- dobré mechanické vlastnosti (pnutí, způsob opracování)
- vhodné elektrické a chemické vlastnosti (podle dané aplikace)



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

Desorpce plynů ze stěn

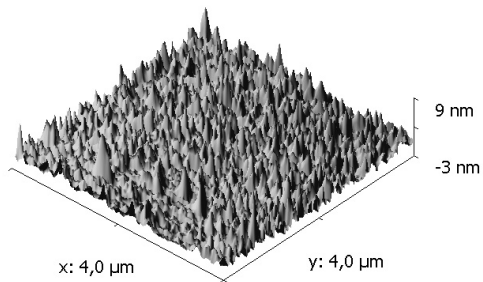
Důležitá je teplotní a vakuová historie vakuové aparatury.

Desorpční proud plynů ze stěny pro kovy a skla a pro $t > t_0$

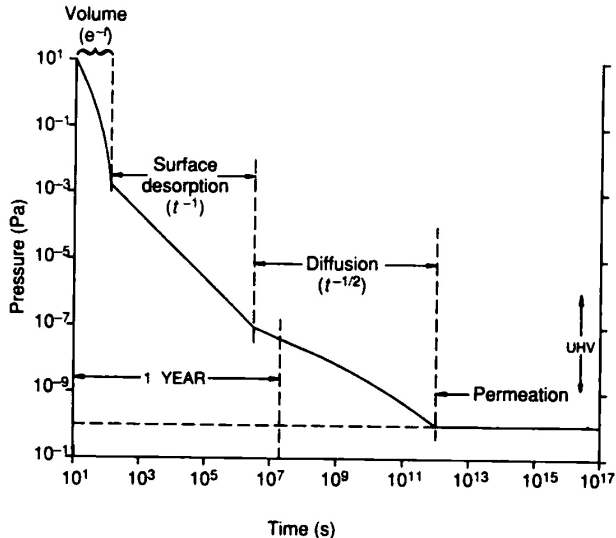
$$I_{des} = q_{des} A \frac{t_0}{t}$$

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		$1,2 \times 10^{-6}$	$3,6 \times 10^{-7}$	$2,2 \times 10^{-7}$
viton	zahřátí 4 h	$1,2 \times 10^{-9}$	$3,3 \times 10^{-10}$	$2,5 \times 10^{-10}$

AFM - sklo

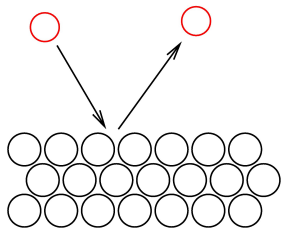


Typická křivka čerpání vakuové komory

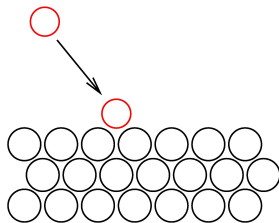


Delchar: Vacuum Physics and Techniques, Chapman Hall, 1993

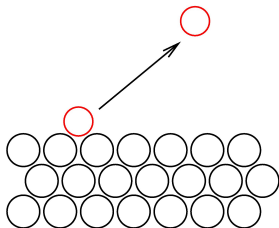
Základní procesy probíhající mezi plynem a povrchem pevné látky



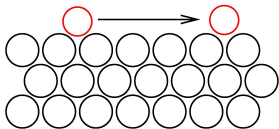
odraz molekuly



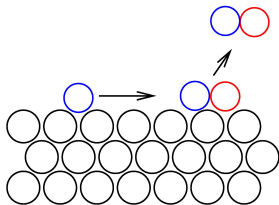
adsorpce



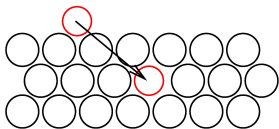
desorpce



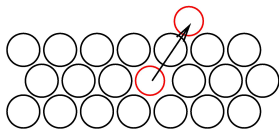
difuze po povrchu



chemická reakce na povrchu



difuze do objemu



difuze z objemu na povrch

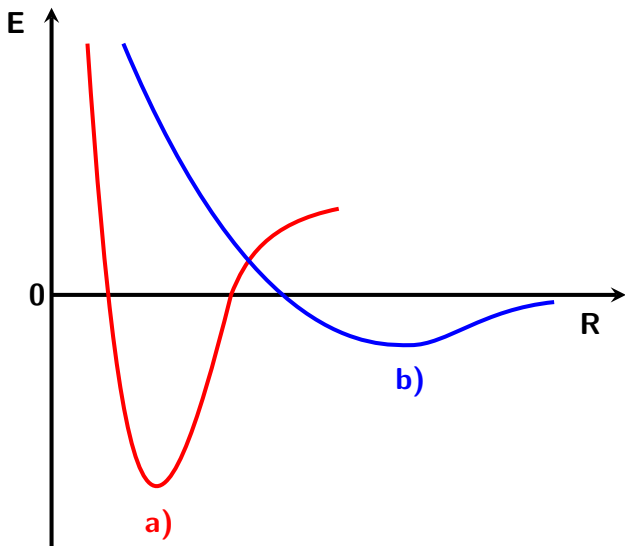
Plyny adsorbované na povrchu

- fyzisorpce - slabá vazba, Van der Waalsova vazba, dlouhý dosah
 $R_0 > 3 \times 10^{-10} \text{ m}$,

$$E = \frac{A}{R^9} - \frac{B}{R^3}$$

- chemisorpce - silné chemické vazby, krátký dosah,
 $1 \times 10^{-10} \text{ m} < R_0 < 3 \times 10^{-10} \text{ m}$

$$E = D_0(1 - \exp[-a(R - R_0)])^2$$



Koeficient ulpění

$$\nu_1 = \frac{1}{4} n v_a$$

$$\nu_{1ef} = \gamma \nu_1 \Rightarrow \gamma = \frac{\nu_{1ef}}{\nu_1}$$

- $\gamma = 1$, adsorpce každé molekuly, která dopadne na povrch
- $\gamma = 0$, všechny molekuly se odrazí

Stupeň pokrytí

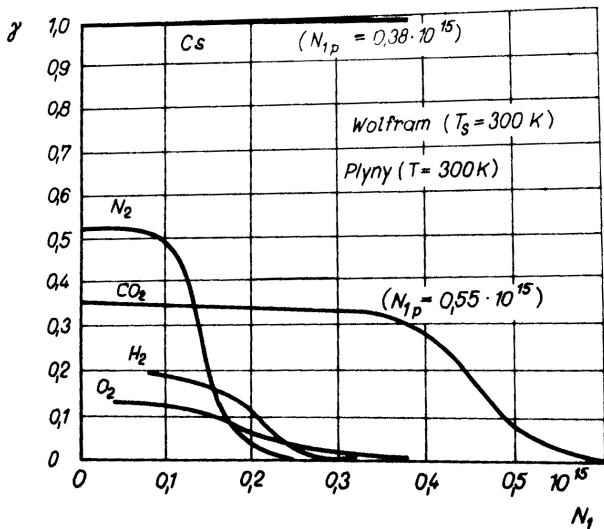
$$\vartheta = \frac{N_1}{N_{1p}}$$

N_1 - počet adsorbovaných atomů, N_{1p} - počet volných míst v mono-molekulární vrstvě, pro méně přesné výpočty se bere

$$N_{1p} = 0,5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$$

- $\vartheta = 0$, čistý povrch
- $\vartheta = 1$, zcela pokrytý povrch

Koeficient ulpění



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

Odhad na základě rozměrů molekul

plyn	He	Ne	H ₂	O ₂	Ar
$N_{1p}[10^{15} \text{ cm}^{-2}]$	2,42	1,72	1,52	0,87	0,85

plyn	N ₂	CO	CO ₂	H ₂ O	CH ₄
$N_{1p}[10^{15} \text{ cm}^{-2}]$	0,81	0,81	0,53	0,53	0,52

CO na wolframu

T_s [K]	300	500	700	900	1100
$N_{1p}[10^{15} \text{ cm}^{-2}]$	0,56	0,44	0,42	0,33	0,19
γ	0,45	0,40	0,35	0,33	0,3

wolfram, 300 K

plyn	γ	$N_{1p}[10^{15} \text{ cm}^{-2}]$	ϑ
N_2	0,3-0,55	0,2-0,55	0,3-0,5
CO	0,2-0,6	0,5-0,65	0,3-0,6
O_2	0,2-0,3	0,87	0,7
H_2	0,2-0,3	0,4-0,7	0,4-0,5
Cs	1	0,38	1