

F4160

Vakuová fyzika 1

Pavel Slavíček

email: ps94@physics.muni.cz

Osnova:

- Úvod a historický vývoj
- Volné plyny
 - statický stav plynů
 - dynamický stav plynů
- Získávání vakua - vývěvy s transportem molekul z čerpaného prostoru
 - vývěvy s periodicky se měnícím prostorem
 - vývěvy s neproměnným pracovním prostorem
 - paroproudové vývěvy
- Měření vakua
 - měření celkových tlaků
 - měření parciálních tlaků
 - hledání netěsností ve vakuových systémech

Navazující přednášky:

- Vakuová fyzika 2 - F6450
 - Vázané plyny
 - Sorpční vývěvy
 - Měření ve vakuové fyzice
 - měření proudu plynu
 - měření tenze par
 - Konstrukční prvky vakuových zařízení
- Praktikum z vakuové fyziky - F7541
- Fyzika nízkých teplot - F8450

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
- J.F.O'Hanlon: A User's Guide to Vacuum Technology, Wiley, 2003
- W. Espe: Technologia hmot vákuovej techniky, Slovenská akadémia vied, Bratislava 1960
- A.Tálský, J.Janča: Speciální praktikum z vysokofrekvenční elektroniky a fyziky plazmatu, skripta, Brno 1975
- J.Jelínek, Z. Málek: Kryogenní technika, SNTL, Praha, 1982

- Delchar: Vacuum Physics and Techniques, Chapman Hall, 1993
- L.Patý: Základní pojmy fyziky plynů, SPNP, Praha 1970
- P.Lukáč: Zbierka príkladov z vakuovej fyziky, UKB, Bratislava 1988
- P.Lukač, V.Martišoviš: Netěsnosti vakuových systémov, Alfa, Bratislava 1981
- P.Slavíček a kol.: Vakuová fyzika 1, Munipress 2016
- Zpravodaje CVS
- firemní katalogy
- internet: www - stránky výrobců vakuové techniky, ...

Úvod

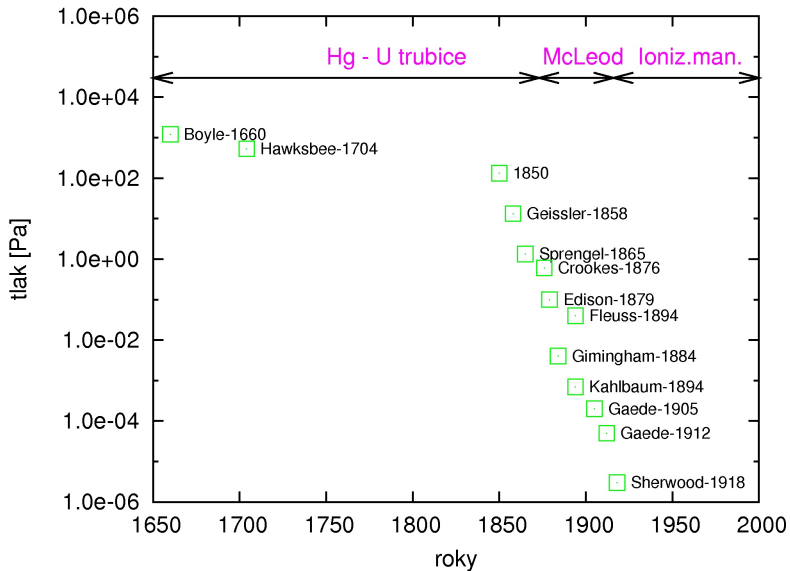
- Vakuum je označení pro stav systému, který obsahuje plyny, nebo páry, pokud je jejich tlak menší než tlak atmosférický.
- Jednotky tlaku:
 - **Pa [Nm⁻²] - jednotka v soustavě SI**
 - 1 bar = 10⁵ Pa
 - 1 mbar = 100 Pa
 - 1 torr = 133,322 Pa
 - 1 atm = 101325 Pa = 760 torr (fyzikální atmosféra)
 - 1 at = 98066,5 Pa = 0,96784 atm (technická atmosféra)
 - 1 psi = 6890 Pa
 - 1 psf = 47,8 Pa

Historický vývoj

- 1643 - E.Torricelli, první vakuum
- 1654 - O. von Guericke, Magdeburské polokoule
- 1855 - Geissler, výboje v plynech, rtuťová vývěva
- 1874 - H.G.Mac-Leod, kompresní manometr
- 1892 - Fleussova pístová vývěva, průmyslová výroba žárovek
- 1892 - Dewarova nádoba
- 1906 - M. Pirani, Piraniho tepelný manometr
- 1912 - W. Gaede, molekulární vývěva
- 1913 - W. Gaede, difúzní vývěva
- 1916 - Buckley, ionizační manometr
- 1925 - Fyzika nízkých tlaků, jako samostatný obor
- 1926 - olejová difúzní vývěva

<http://www.svc.org/HistoryofVacuumCoating/History-of-Vacuum-Coating.cfm>

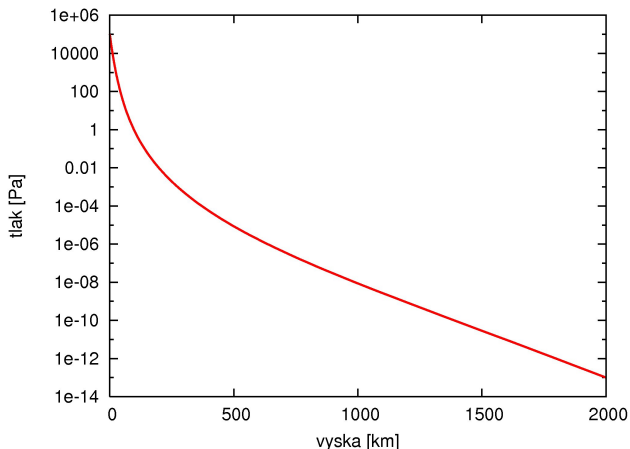
- 1929 - kapacitní manometr
- 1933 - neopren
- 1936 - Penning, výbojový manometr s magnetickým polem
- 1950 - Bayard-Alpert - ionizační manometr se žhavenou katodou
- 1958 - Becker, turbomolekulární vývěva
- 1967 - komerční kvadrupólový spektrometr
- 1973 - Scroll vývěva
- 1982 - viskózní manometr s rotující kuličkou



Závislost tlaku na nadmořské výšce

výška [km]	tlak [mbar]	tlak [Pa]
0	10^3	10^5
11	10^2	10^4
50	10^{-2}	10^0
100	10^{-3}	10^{-1}
200	10^{-6}	10^{-4}
500	10^{-8}	10^{-6}
1000	10^{-10}	10^{-8}
2000	10^{-15}	10^{-13}

Závislost tlaku na nadmořské výšce



Tlak na Měsíci $1 \text{ nPa} = 10^{-9} \text{ Pa}$

Tlak v mezihvězdném prostoru $100 \text{ } \mu\text{Pa} - 3 \text{ fPa}, 10^{-4} \text{ Pa} - 3 \times 10^{-15} \text{ Pa}$

Rozdělení vakua

vakuum	tlak [mbar]	tlak [Pa]
nízké, 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	nízké	střední (FV)	vysoké (HV)	UHV, XHV
tlak [Pa]	$10^5 - 10^2$	$10^2 - 10^{-1}$	$10^{-1} - 10^{-5}$	$< 10^{-5}$
n [cm^{-3}]	$10^{19} - 10^{16}$	$10^{16} - 10^{13}$	$10^{13} - 10^9$	$< 10^9$
λ [cm]	$< 10^{-2}$	$10^{-2} - 10^1$	$10^1 - 10^5$	$> 10^5$
τ [s]	$< 10^{-5}$	$10^{-5} - 10^{-2}$	$10^{-2} - 10^2$	$> 10^2$
proudění	viskózní	Knudsenovo	molekulární	molekulární

Využití vakua

Vědecké aplikace

Průmyslové aplikace

Využití vakua - vědecké aplikace

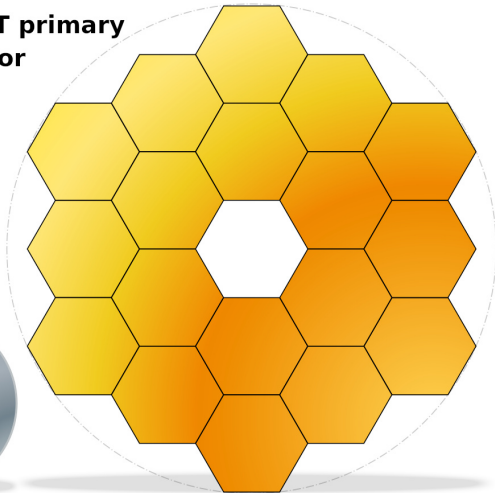
- astronomie - dalekohledy
- diagnostické metody - elektronový mikroskop, hmotnostní spektrometr, optický vakuový spektrometr, XPS, ...
- fyzika plazmatu - výboje v plynech, ...
- chemie - filtrace, vakuová destilace, čisté materiály, ...
- metrologie - etalony pro kalibrace
- tenké vrstvy - napařování, naprašování
- plazmochemické reaktory
- fyzika nízkých teplot
- urychlovače částic - synchrotrony, LHC, ...
- termojaderné reaktory - ITER, ...
- základní výzkum - simulátory kosmického prostoru, pádová věž, LIGO, Casimirův jev, ...

Hubble Space Telescope

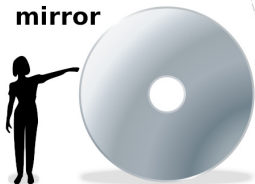
- výroba 1977–1979
- broušení 1979–1981
- průměr 2,4 m, celková hmotnost 11 t
- přesnost broušení 30 nm
- odrazné vrstvy - Al 76,2 nm, fluorid hořčíku - 25,4 nm
- vypuštění - 24.4.1990, let STS 31



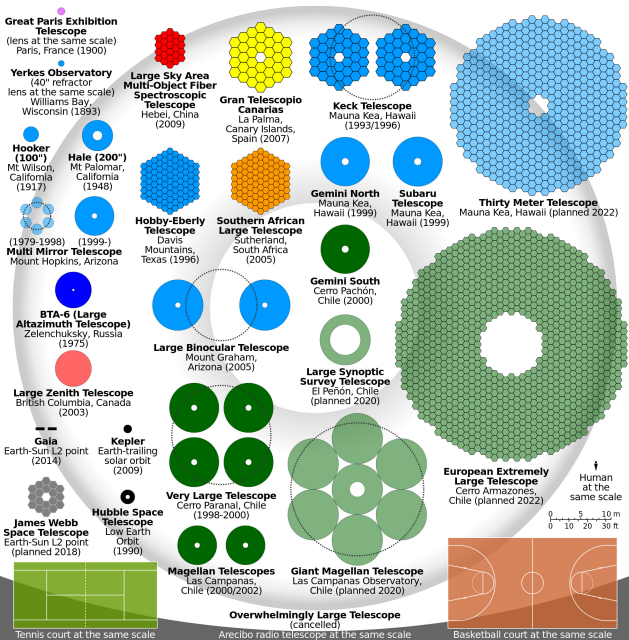
JWST primary mirror



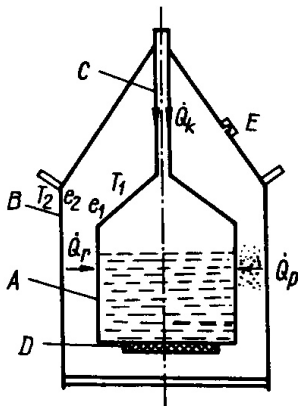
Hubble primary mirror



Wikipedie



Tepelná izolace - Dewarova nádoba

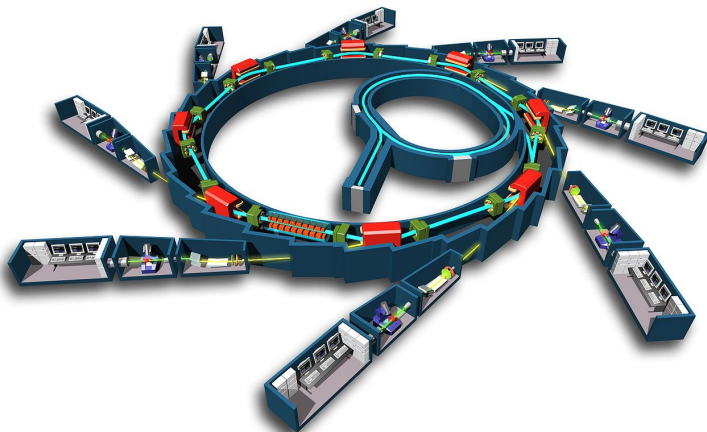


Obr. 67. Jednoduchá
Dewarova nádoba pro
přechovávání LN_2

Urychlovače částic

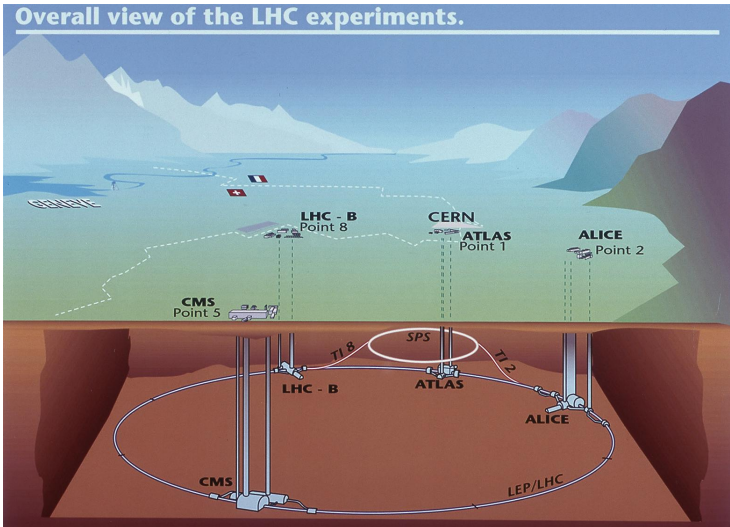
- velká střední volná dráha
- LHC, synchrotrony, ...
- základní výzkum - částicová fyzika, materiály, biologie, medicína
- farmaceutický průmysl
- léčení rakoviny
- 2015 - 17000 urychlovačů

Synchrotron



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

LHC



<http://lhc.web.cern.ch/lhc/>

Elektronové mikroskopy

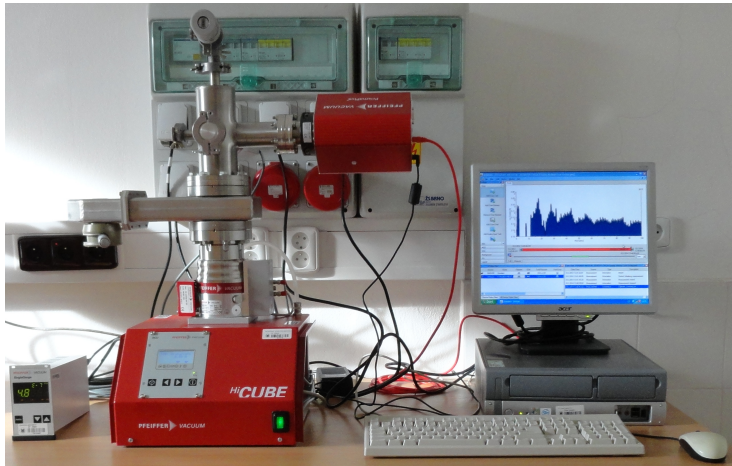
- katoda - termoemisní $< 10^{-2}$ Pa
- katoda - autoemisní studená emise $< 10^{-8}$ Pa
- Schottkyho katoda $< 10^{-6}$ Pa
- prodloužení životnosti, vyšší stabilita, užší svazek elektronů
- výhody autoemise - nižší rozptyl energií elektronů \implies menší stopa, větší rozlišení



Napařovačka

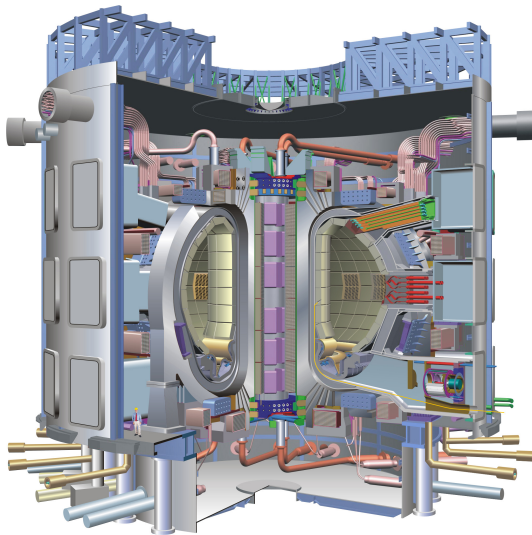


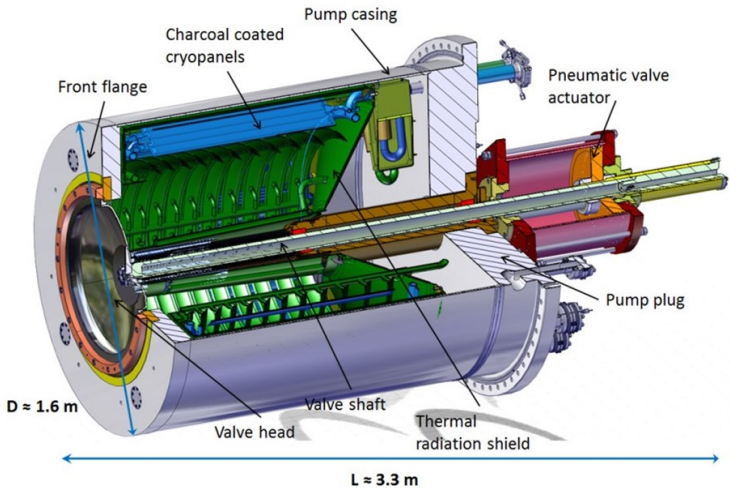
Hmotnostní spektrometr



ITER

plazma: 840 m³, vakuov komora: 1400 m³, celkem vakuov: 8500 m³



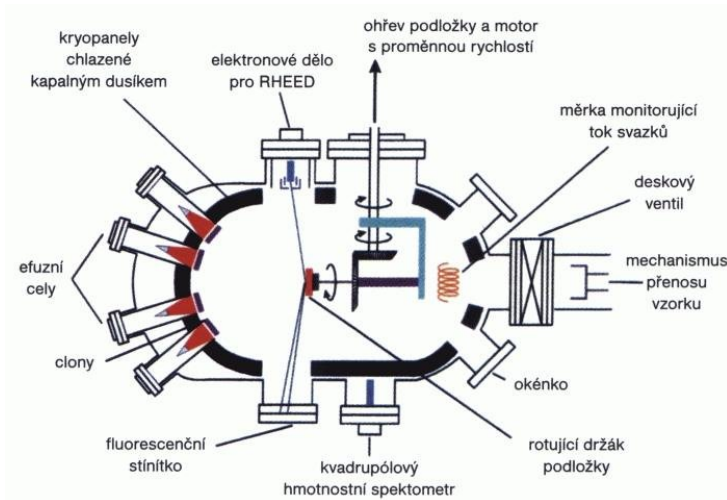


www.iter.org

ITER

- potřebný tlak $\sim 10^{-6}$ Pa,
- komora: 840 m³ plazma, objem 1400 m³ ,
kryostat, celkem ~ 8500 m³
- na komoře 6 kryo-vývěv (4,5 K), 4 čerpají,
2 regenerace - 10 min., 100 K
- na kryostatu a pom. zařízeních dalších 6 vývěv
- sorbent: aktivní uhlí, 20 let výzkum - kokosové ořechy,
Indonésie (2002)
- největší celokovový ventil
- první plazma 2025 ?, původní plán 2016

Molecular Beam Epitaxy



<http://www.fzu.cz/oddeleni/povrchy/mbe/index.html>

Experiment na orbitální dráze

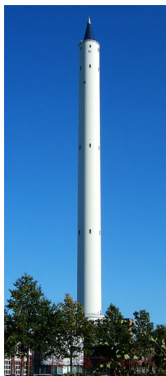
- tlak na oběžné dráze raketoplánu (500 km) 10^{-6} Pa
- za štítem o průměru 3,6 m , 10^{-12} Pa
- 1994 - WSF1 - porucha orientace, STS60
- 1995 - WSF2 - porucha MBE, STS69
- 1996 - WSF3 - úspěch 7 vrstev GaAs/AlGaAs, STS80



http://mek.kosmo.cz/pil_lety/usa/sts/sts-60/index.htm

Pádová věž

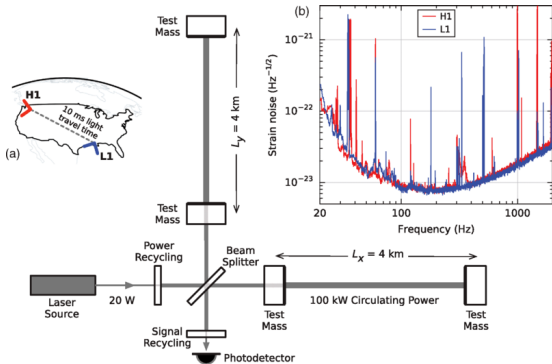
- ZARM - Brémy
- výška 146 m, průměr 3,5 m, celkem objem 1700 m³
- 18 vývěv, čerpací rychlost 32 000 m³/h, tlak 10 Pa
- doba pádu asi 5 s



http://en.wikipedia.org/wiki/University_of_Bremen

LIGO - Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory

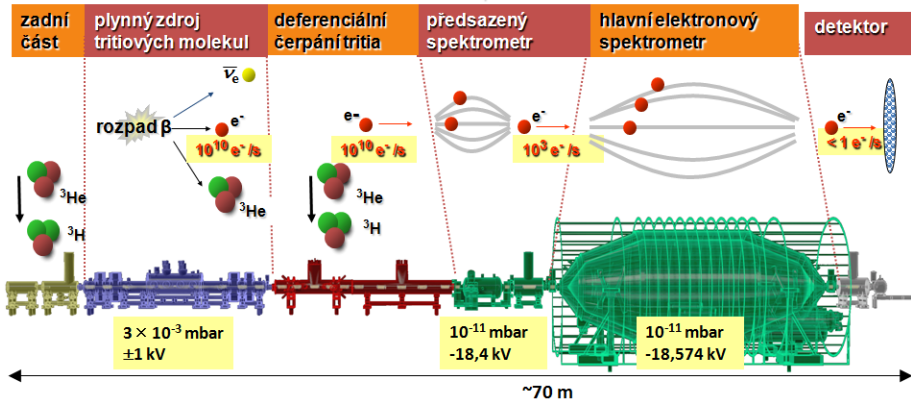
objem asi $10\,000\text{ m}^3$, tlak $\sim 10^{-7}\text{ Pa}$



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



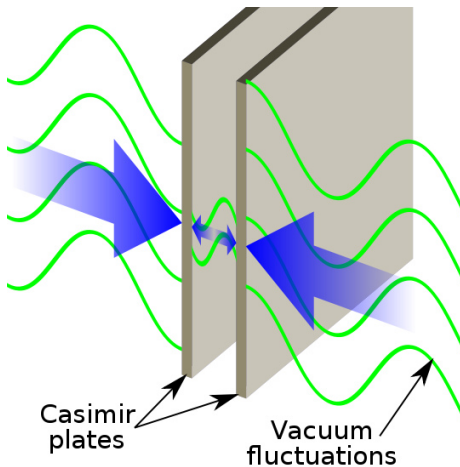
www.osel.cz

Experiment - KATRIN



www.symmetrismagazine.org

Casimirův jev



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

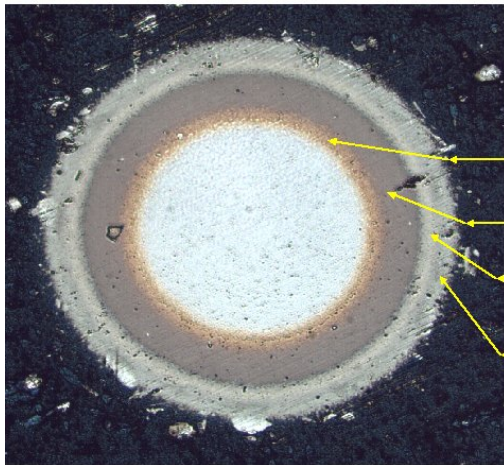
Využití vakua - průmyslové aplikace

- osvětlovací technika - žárovky, zářivky, úsporné žárovky
- vytváření tenkých vrstev - okna, brýle, zrcadla, ...
- barierové vrstvy na lahve
- elektronika
- chemický průmysl - vakuová destilace ropy,...
- metalurgie - čisté kovy, nitridace,...
- vakuové manipulátory, pinzety,...
- kryogenní technika - tepelná izolace
- vakuové balení potravin
- regenerace transformátorových olejů
- svařování e-svazkem
- lisování plastických hmot
- odlévání plastických hmot

Tenké vrstvy



<http://www.shm-cz.cz/>



TiN- adhesive layer

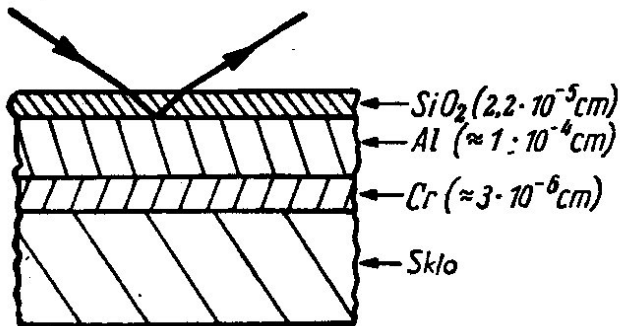
**TiAlN – layer with max.
hardness**

**TiAlCO I – layer with
optimal stechiometry**

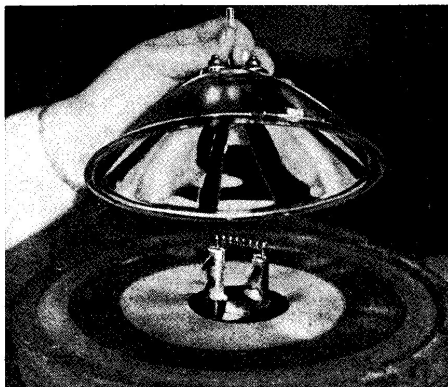
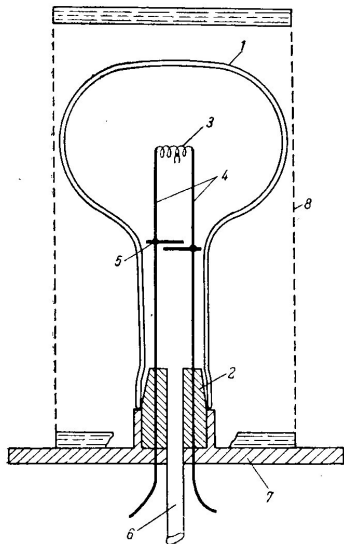
**AlTiCO II – layer with
low friction coefficient -
LUBRIK**

<http://www.shm-cz.cz/>

Zrcadlové plochy



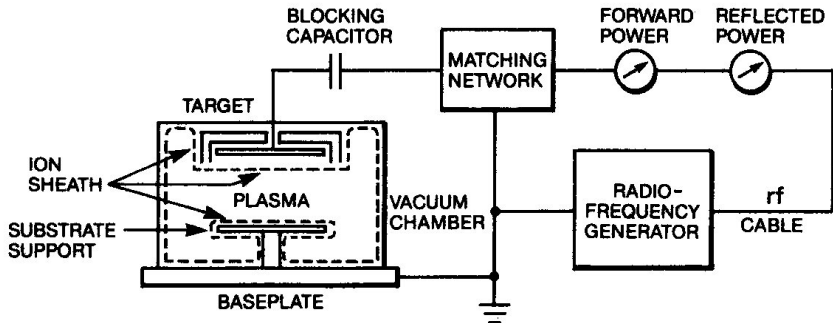
W. Espe: Technologia hmot vákuovej techniky, SAV, Bratislava 1960



Obr. 10-218. Odber pohliníkového reflektora (pozri obr. 10-216) z napařovacieho zariadenia. Snímka závodu: General Electric Comp. (pozri Rose).

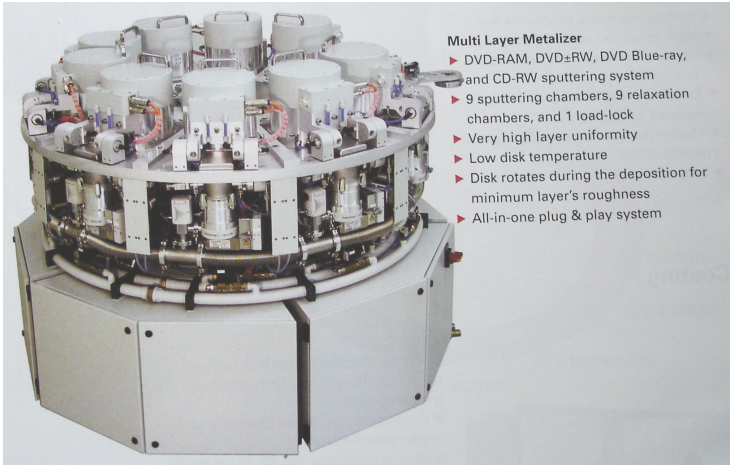
W. Espe: Technologia hmot vákuovej techniky, SAV, Bratislava 1960

PACVD



R.V.Stuart: Vacuum technology Thin Films and Sputtering, Academic Press 1983

Výroba CD-ROM, DVD, ...



Multi Layer Metalizer

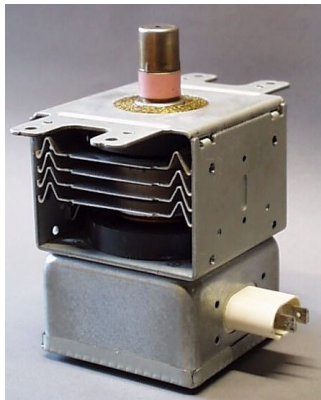
- ▶ DVD-RAM, DVD±RW, DVD Blue-ray, and CD-RW sputtering system
- ▶ 9 sputtering chambers, 9 relaxation chambers, and 1 load-lock
- ▶ Very high layer uniformity
- ▶ Low disk temperature
- ▶ Disk rotates during the deposition for minimum layer's roughness
- ▶ All-in-one plug & play system

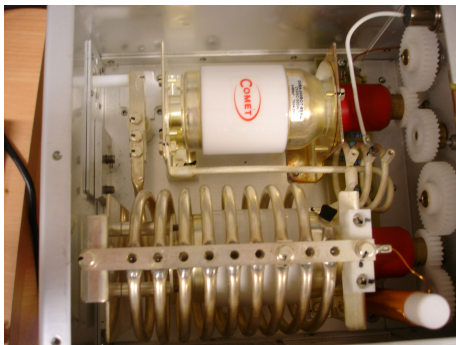
<http://www.pfeiffer-vacuum.net/>

Barierová vrstva při výrobě plastových lahví PET

- transparentní barierová vrstva SiO_x
- zlepšení vlastností plastů
- zabránit pronikání plynů zejména O_2 a CO_2
- PACVD - mikrovlnné plazma
- kapacita ~ 10000 lahví za hodinu

Elektronika



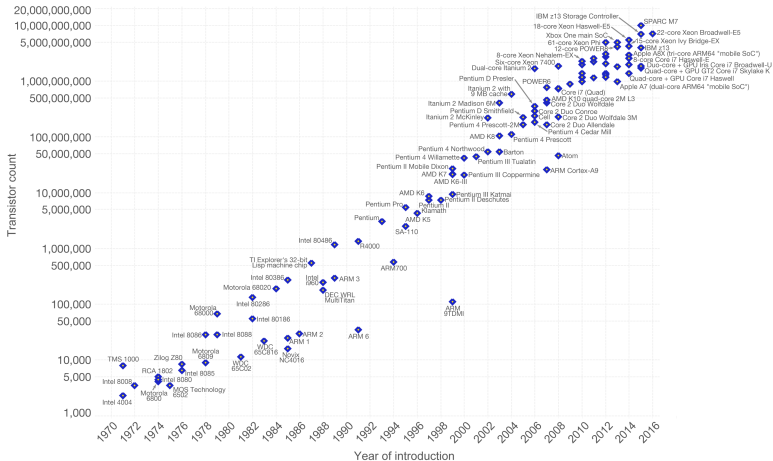


Aplikace v mikroelektronice

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

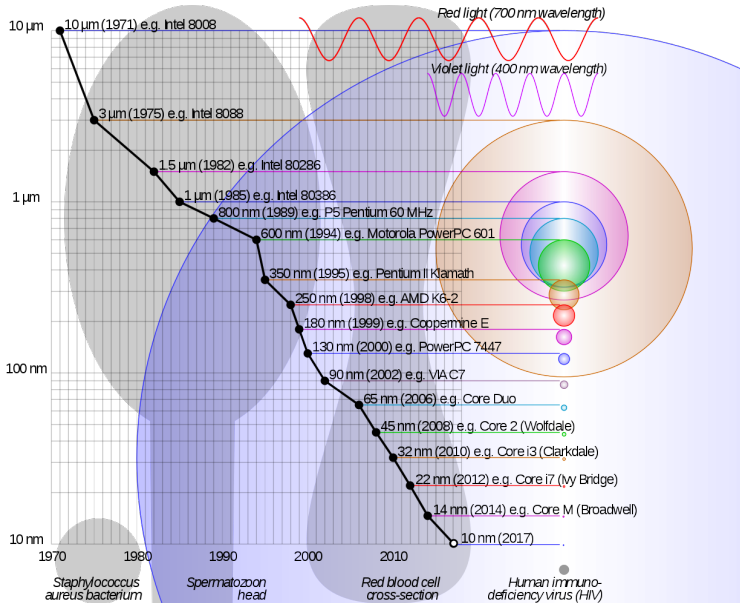
OurWorld
in Data

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.

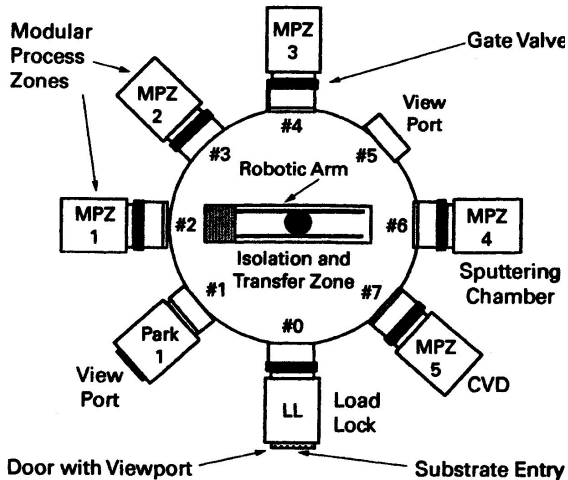


Data source: Wikipedia (https://en.wikipedia.org/wiki/Transistor_count)
The data visualization is available at [OurWorldInData.org](https://ourworldindata.org). There you find more visualizations and research on this topic.

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

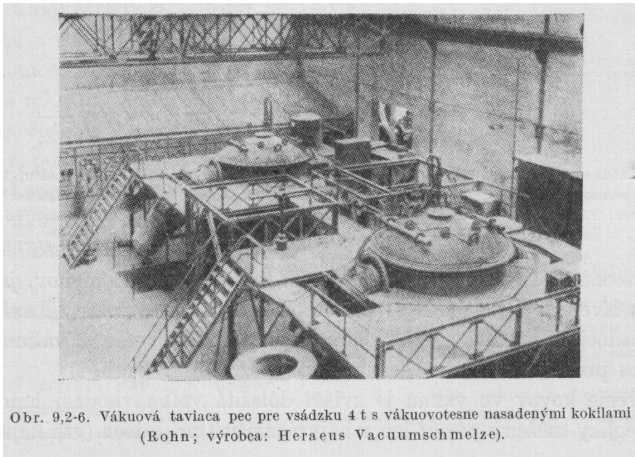


<http://en.wikipedia.org>, 2022 - 5 nm



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

Metalurgie



W. Espe: Technológia hmot vákuovej techniky, SAV, Bratislava 1960

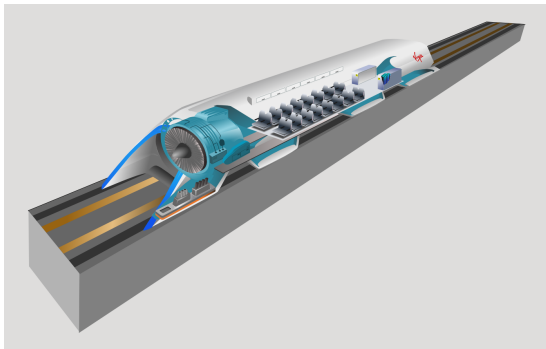


Figure 4.2 First stage of a steam jet vacuum pump for a steel degassing plant.

W.Jorish: Vacuum Technology in the Chemical Industry, Wiley, 2015

Doprava, budoucí aplikace - Hyperloop???

Odhad max. rychlost: ~ 1200 km/h,
vzdálenost 560 km za 35 min
pro porovnání: TGV - 320 km/h, Maglev 600 km/h



Wikipedia

Závěr

Podle dané aplikace a tlaku, který potřebujeme musíme vybrat:

- vakuový čerpací systém - typ vývěv, čerpací rychlosti, ...
- manometry pro měření tlaku
- materiály pro konstrukci aparatury