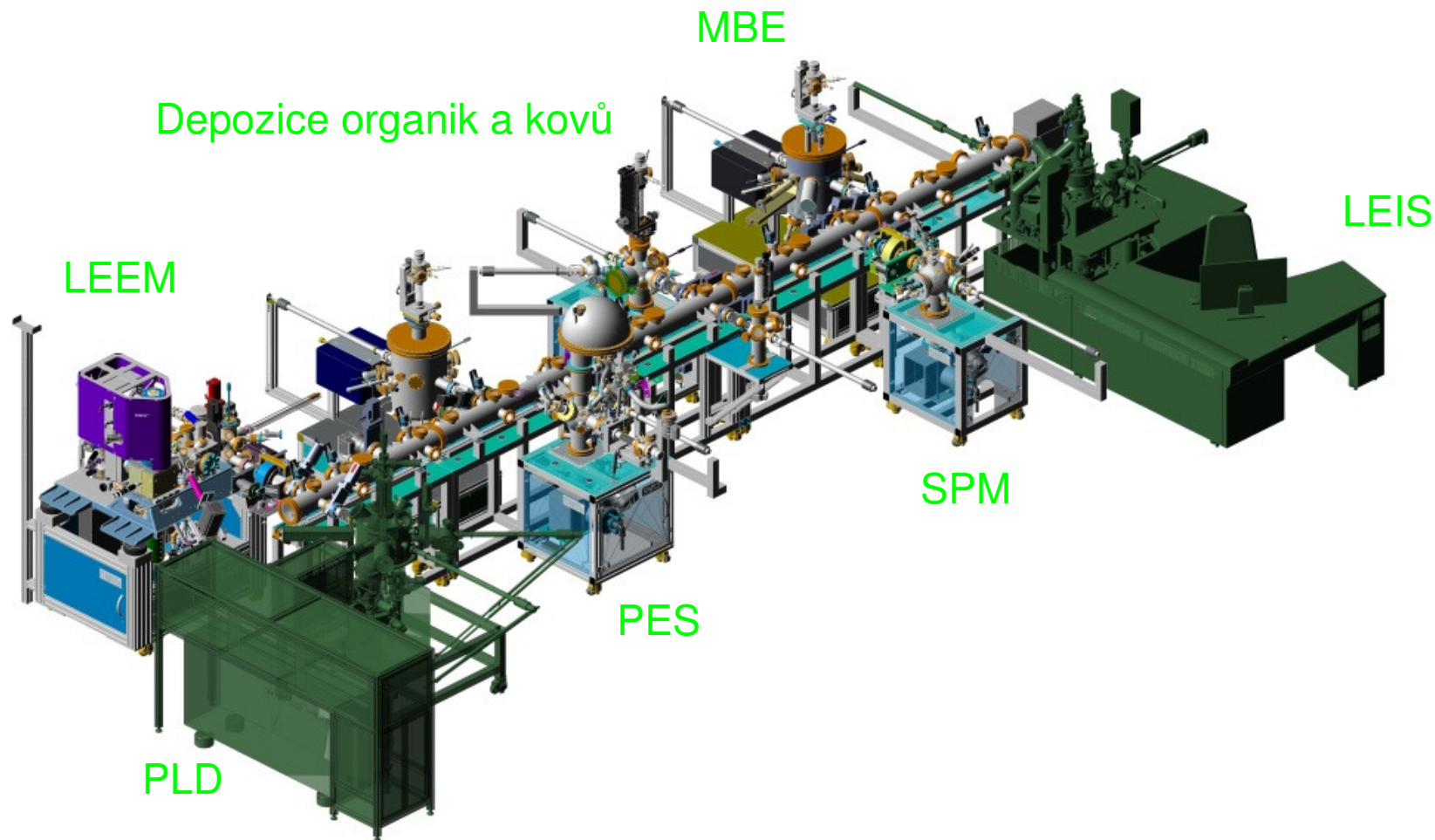


UHV cluster v ceitecu



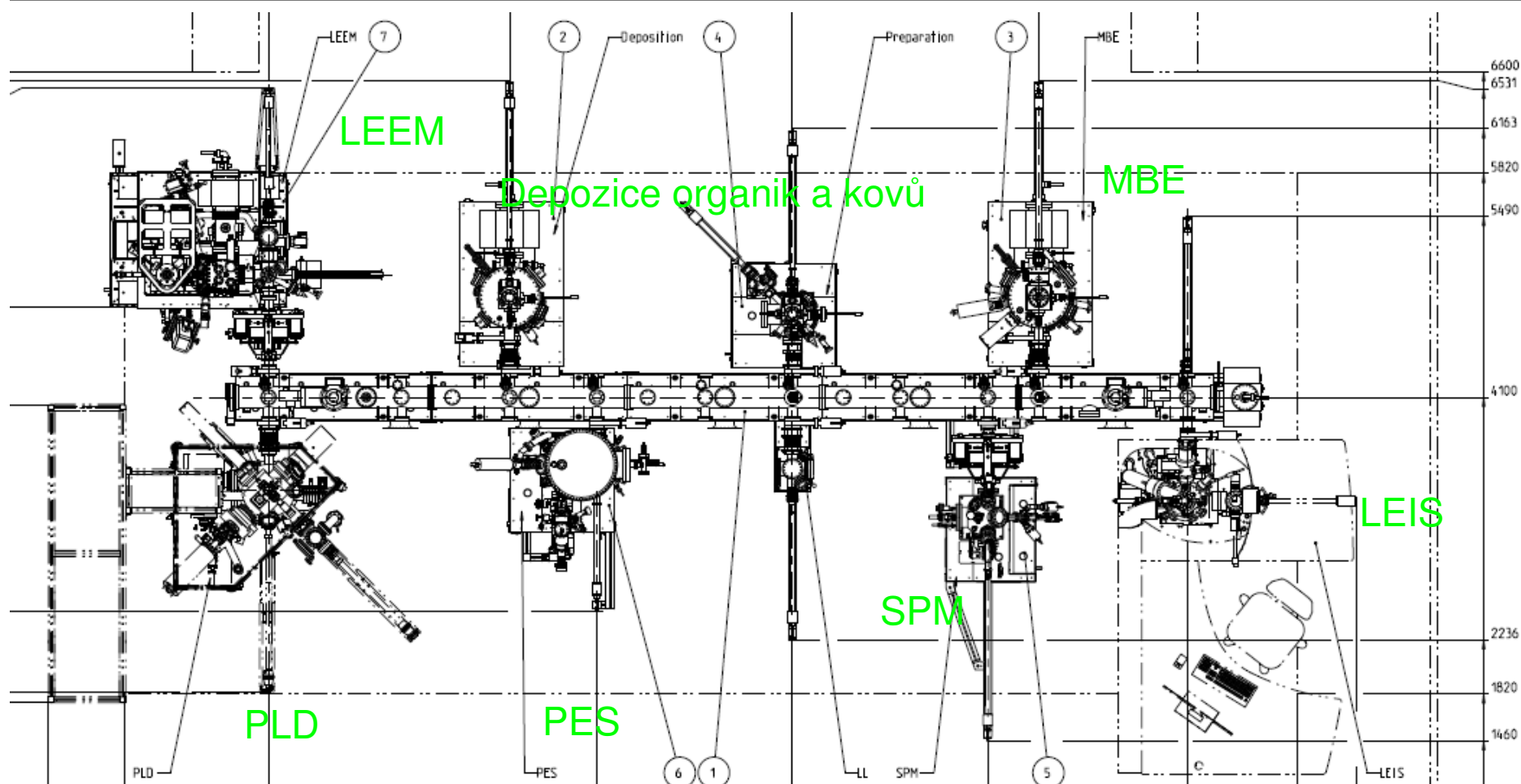
depoziční přístroje:

- pulsní laserová depozice (PLD)
- epitaxe molekulárních svazků (MBE)
- depozice organických a kovových materiálů

analytické přístroje:

- fotoemisní spektr. (PES), XPS, UPS
- skenovací mikroskop (SPM)
- elektronový mikroskop na nízkých energiích (LEEM)
- spektr. s ionty na nízkých energiích (LEIS)

UHV cluster v ceitecu



depoziční přístroje:

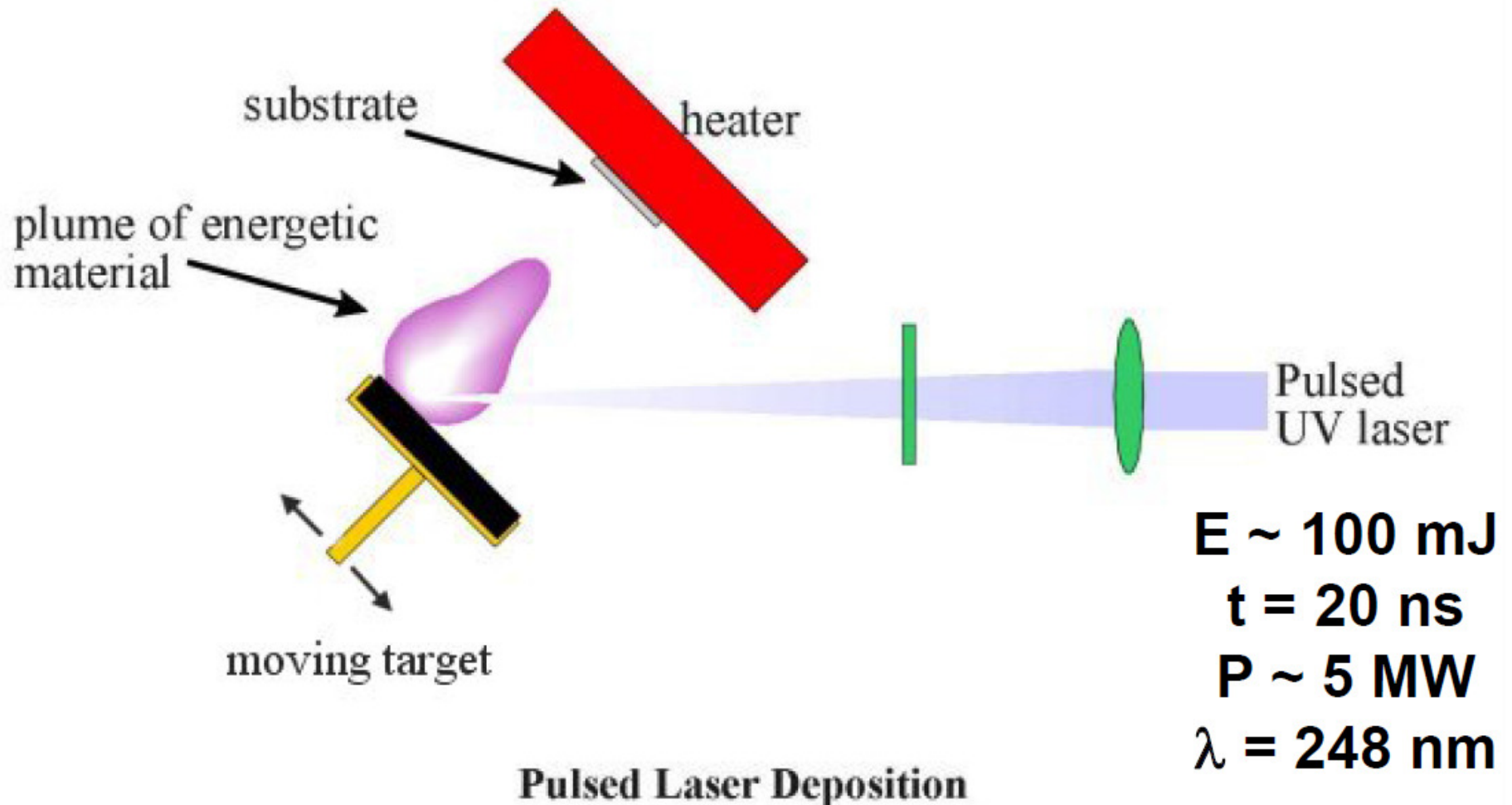
- pulsní laserová depozice (PLD)
- epitaxe molekulárních svazků (MBE)
- depozice organických a kovových materiálů

analytické přístroje:

- fotoemisní spektr. (PES), XPS, UPS
- skenovací mikroskop (SPM)
- elektronový mikroskop na nízkých energiích (LEEM)
- spektr. s ionty na nízkých energiích (LEIS)

Pulsní laserová depozice

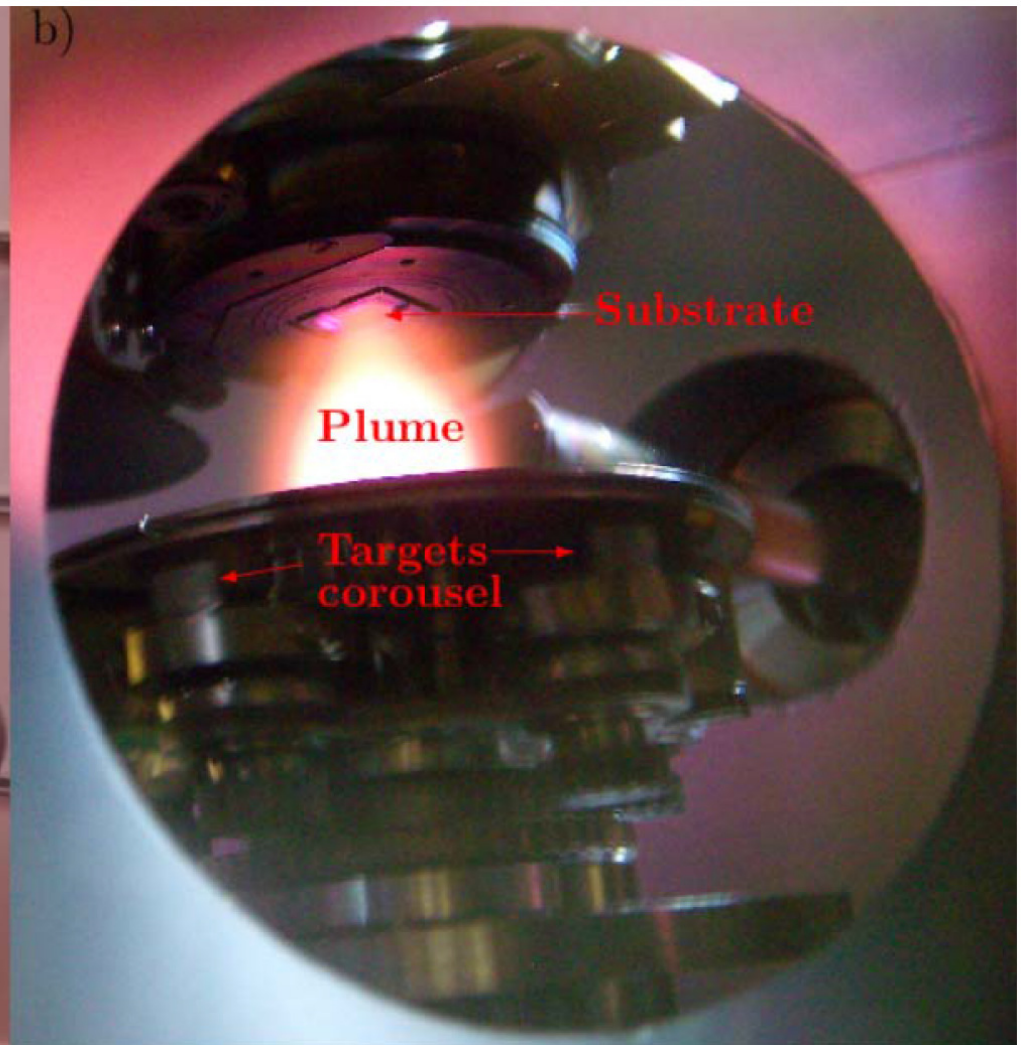
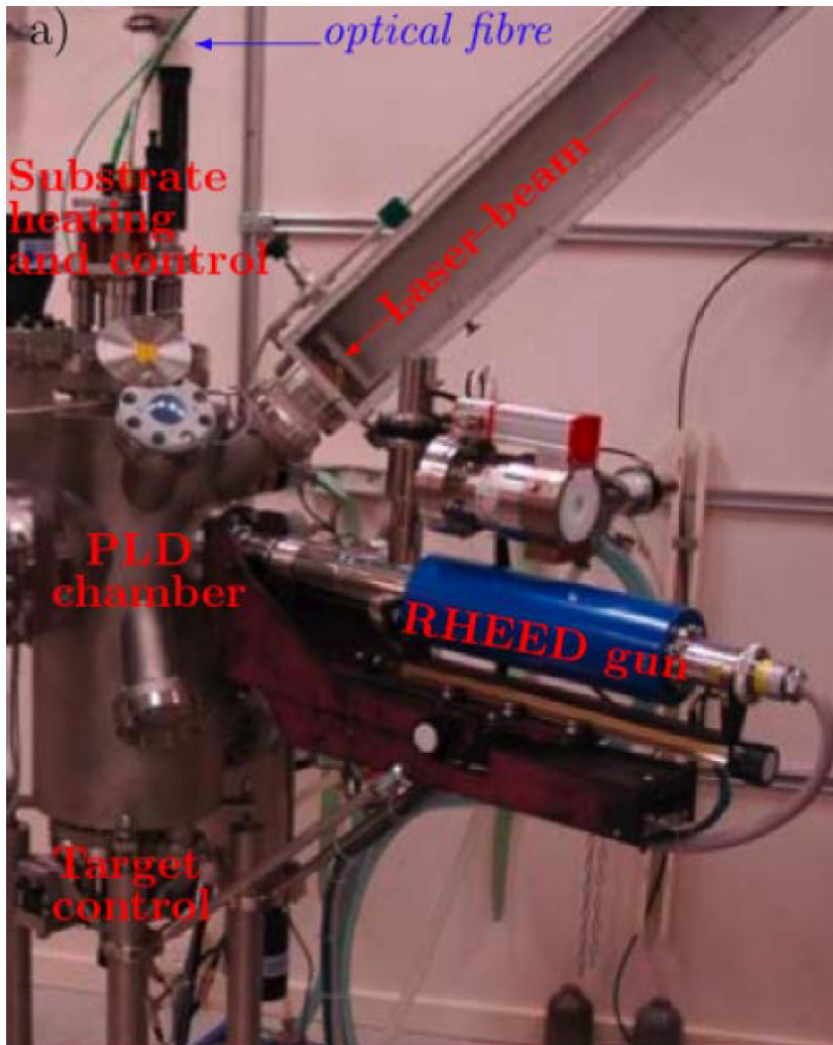
Pulsní laserová depozice - princip



Pulsní laserová depozice

komora PLD

fotografie oblaku

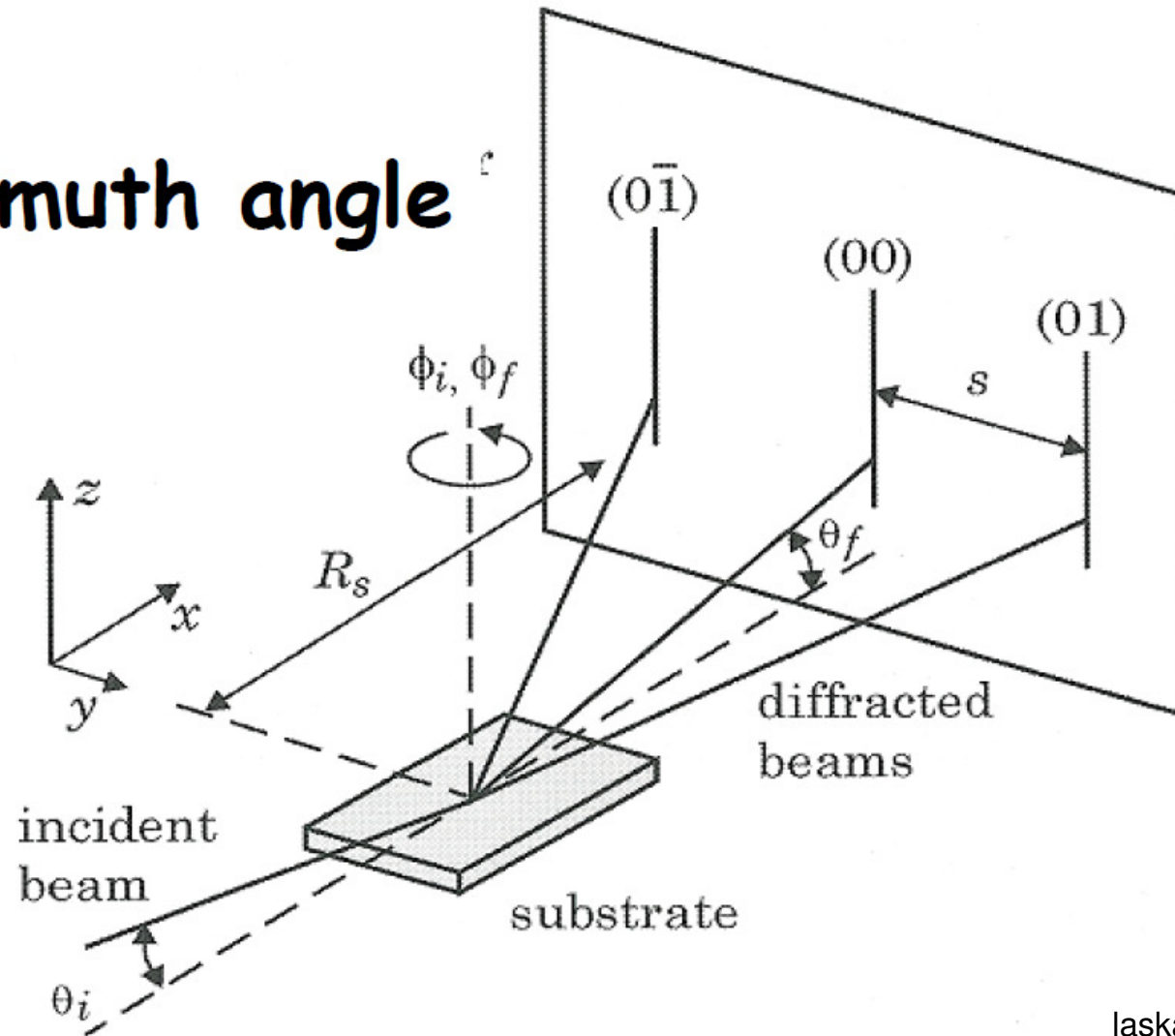


Reflection High Energy Electron Diffraction (RHEED)

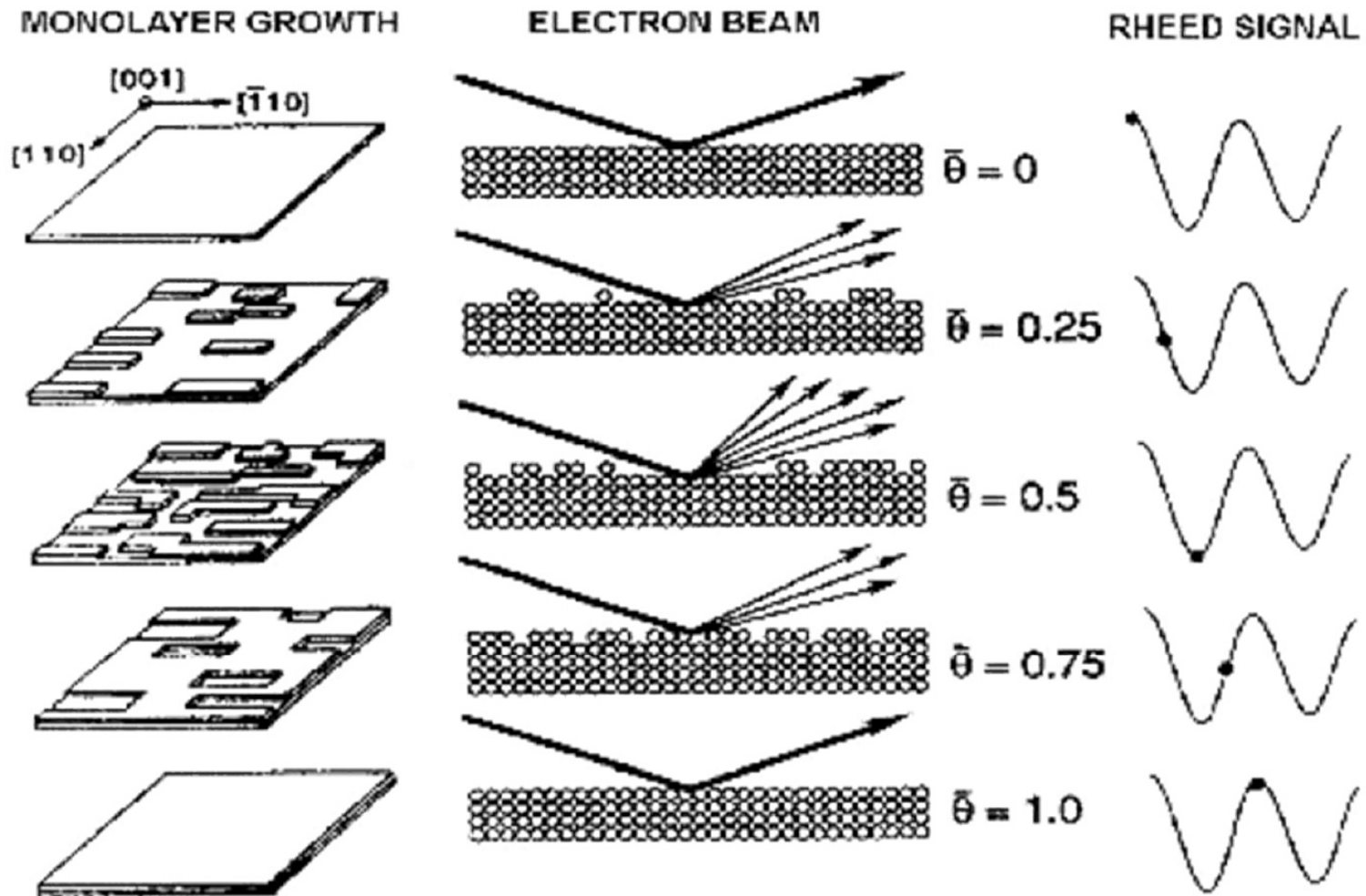
Diffraction of electron beam from film surface

High energy electrons required (~ 30 keV) for high gas pressure

Azimuth angle ϵ

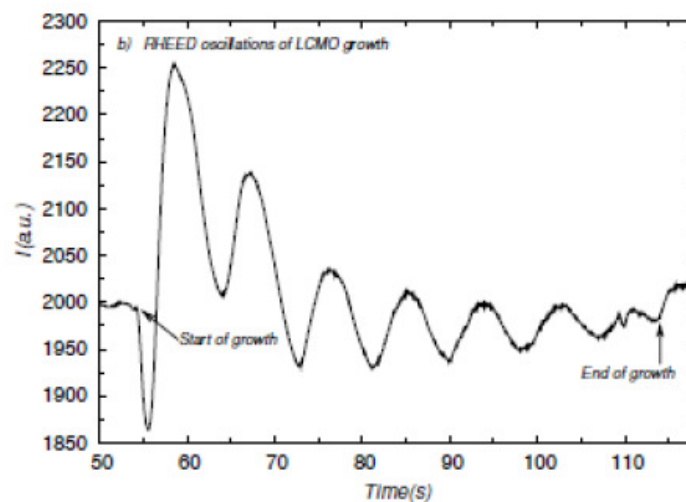
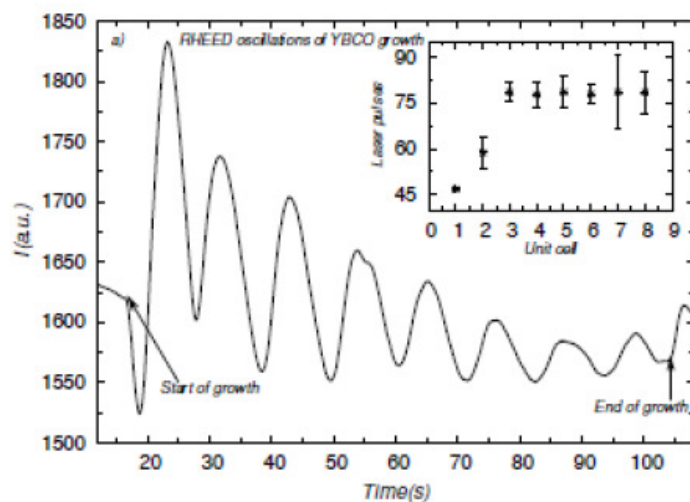
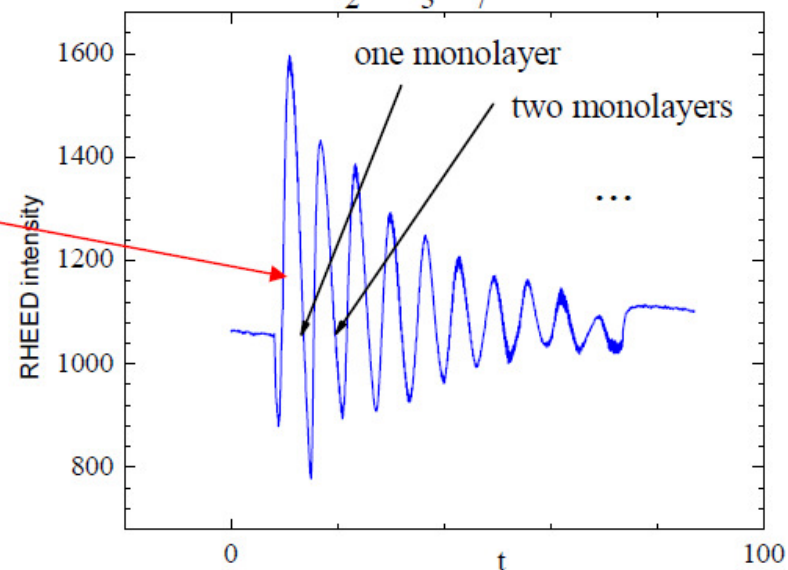
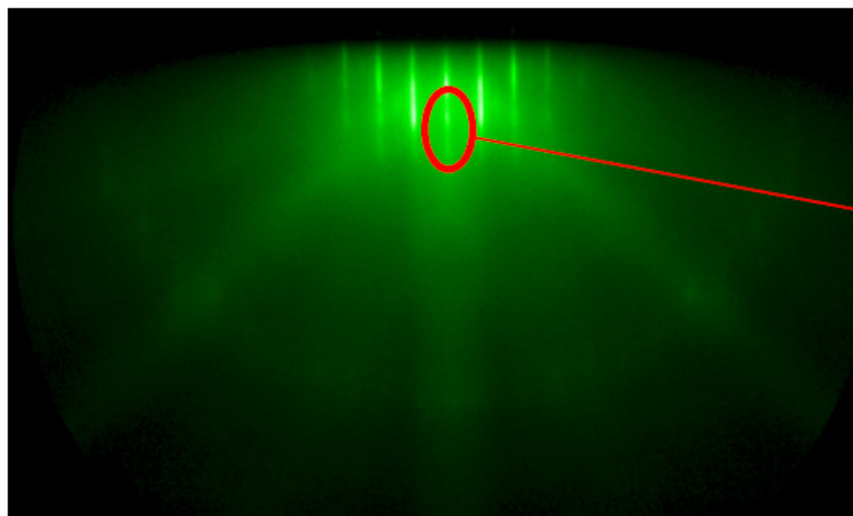


vývoj signálu RHEED při růstu jedné monovrstvy



kontrola tloušťky na úrovni jedné monovrstvy s pomocí RHEED

$\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ growth

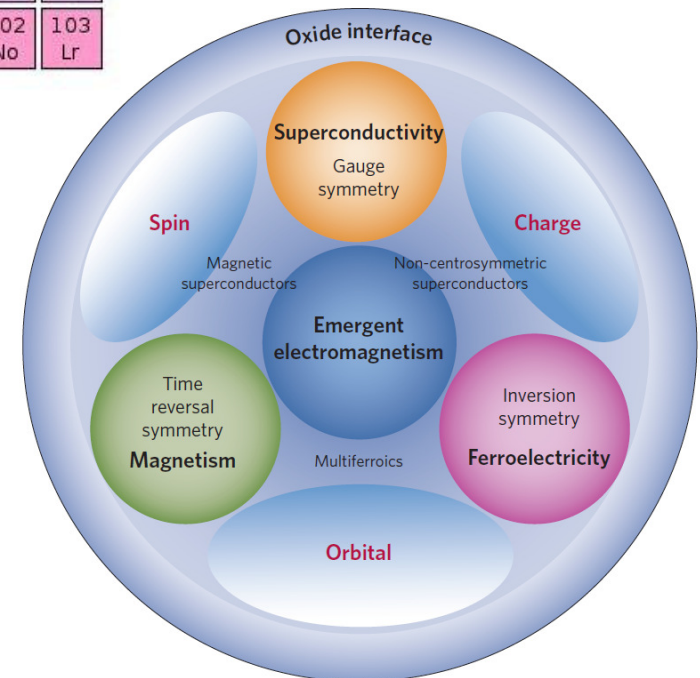


Oxidy přechodových kovů

Group → ↓ Period	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	1 H																	2 He
2	3 Li	4 Be	Transition Metals (d-block)										5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
3	11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
5	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
6	55 Cs	56 Ba		72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
7	87 Fr	88 Ra		104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Uut	114 Uuq	115 Uup	116 Uuh	117 Uus	118 Uuo
Lanthanides			57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu	
Actinides			89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr	

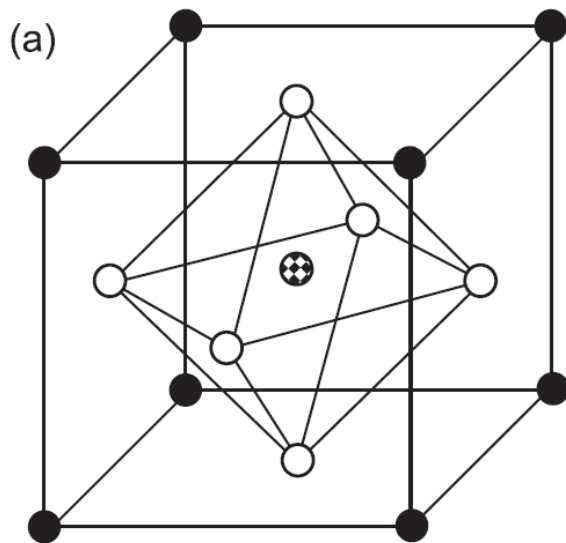
Veliká různost elektronových stavů, např.:

- supravodivost (oxidy Cu – $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7\dots$)
- fero- a antiferro -magnetizmus (oxidy Mn, Co, Cr, Ni.., např. $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$)
- feroelektrika (oxidy Ti, např. BaTiO_3)
- multiferroika ($\text{BiFeO}_3\dots$)
- přechod kov-izolátor (oxidy Mn, $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$)
- polovodiče ($\text{SrTiO}_3\dots$)
- izolanty (LaAlO_3)



Perovskitová struktura oxidů přechodových kovů

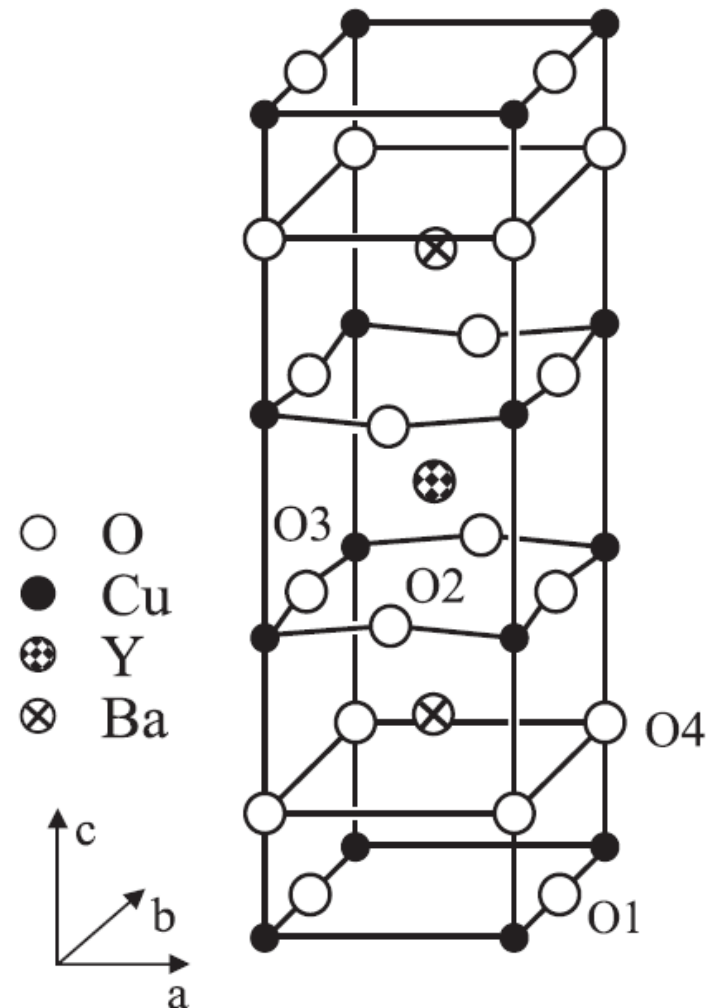
$\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$, ferromagnet, $T_{\text{Curie}}=370$ K



La,Ca,Sr,Ba ●
 Mn ⊕
 O ○

- perovskitová struktura společná většině oxidů přechodových kovů
- materiály lze možno kombinovat na atomární úrovni, tzv. epitaxní růst.
- Lze tak růst multivrstvy s atomárně hladkými rozhraními a de facto vytvářet nové materiály (supermřížky)

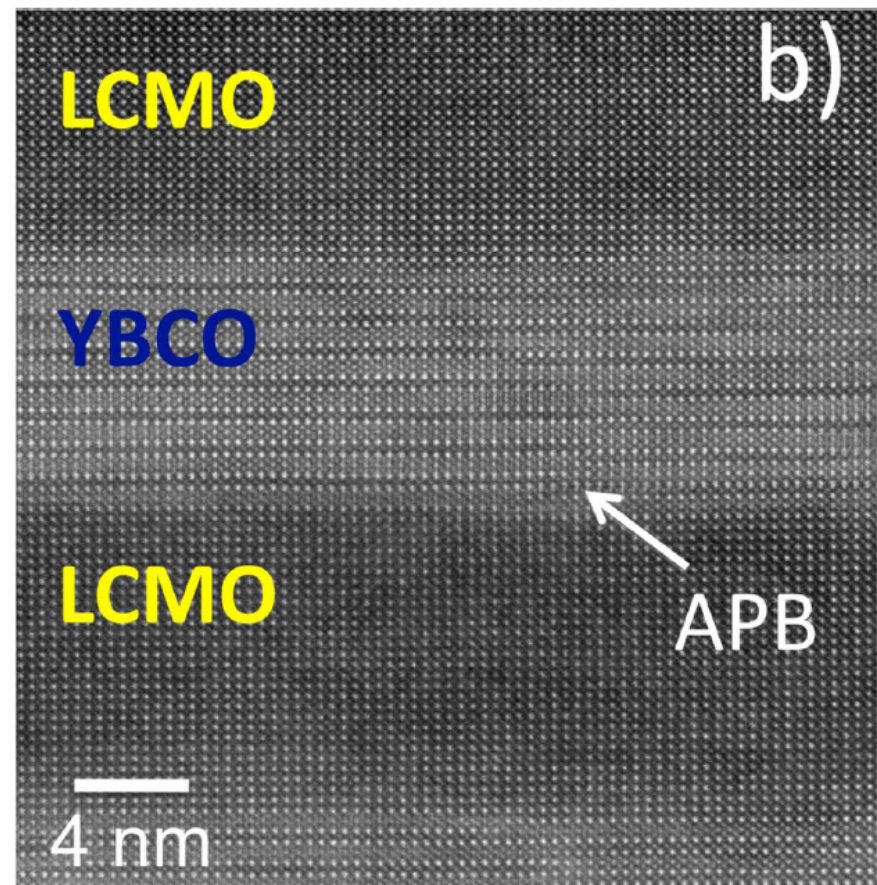
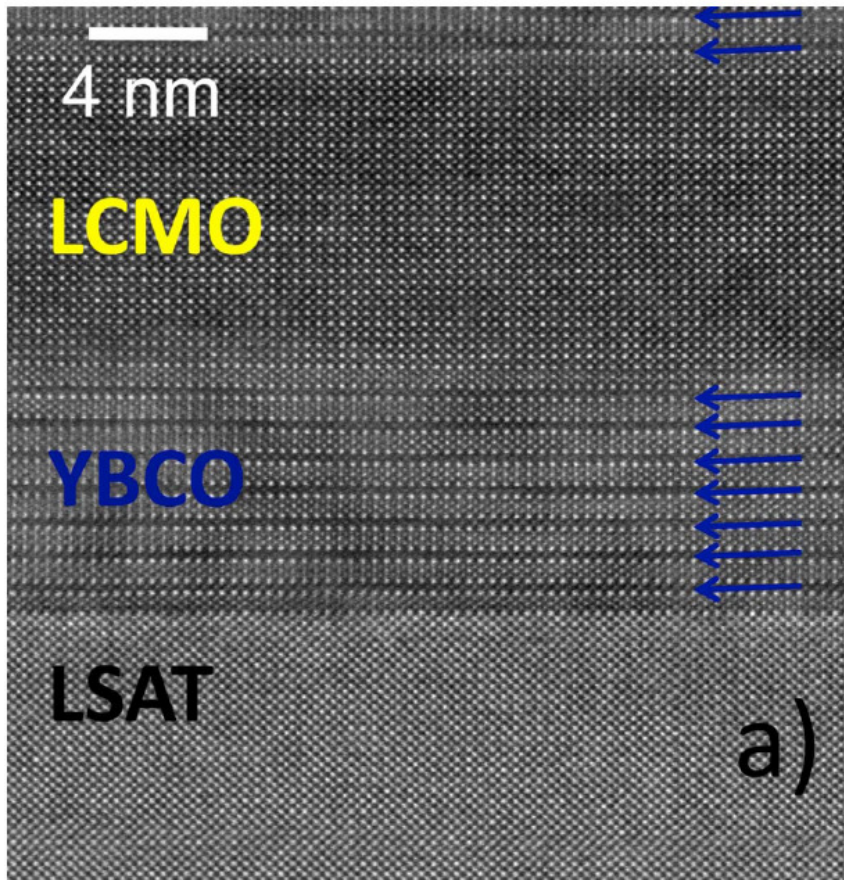
$\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$
 supravodič, $T_c=92$ K



multivrstvy $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7(n)/\text{La}_{0.7}\text{Ca}_{0.3}\text{MnO}_3(m)$

soupeření mezi magnetismem ($\text{La}_{0.7}\text{Ca}_{0.3}\text{MnO}_3$) a supravodivostí ($\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$)

snímek z transmisního elektronového mikroskopu – atomární rozlišení



Příprava substrátu

leptání a žíhání substrátů tak, aby povrch byl atomárně hladký

atomární schodky díky (přirozené) rozorientaci povrchu SrTiO_3

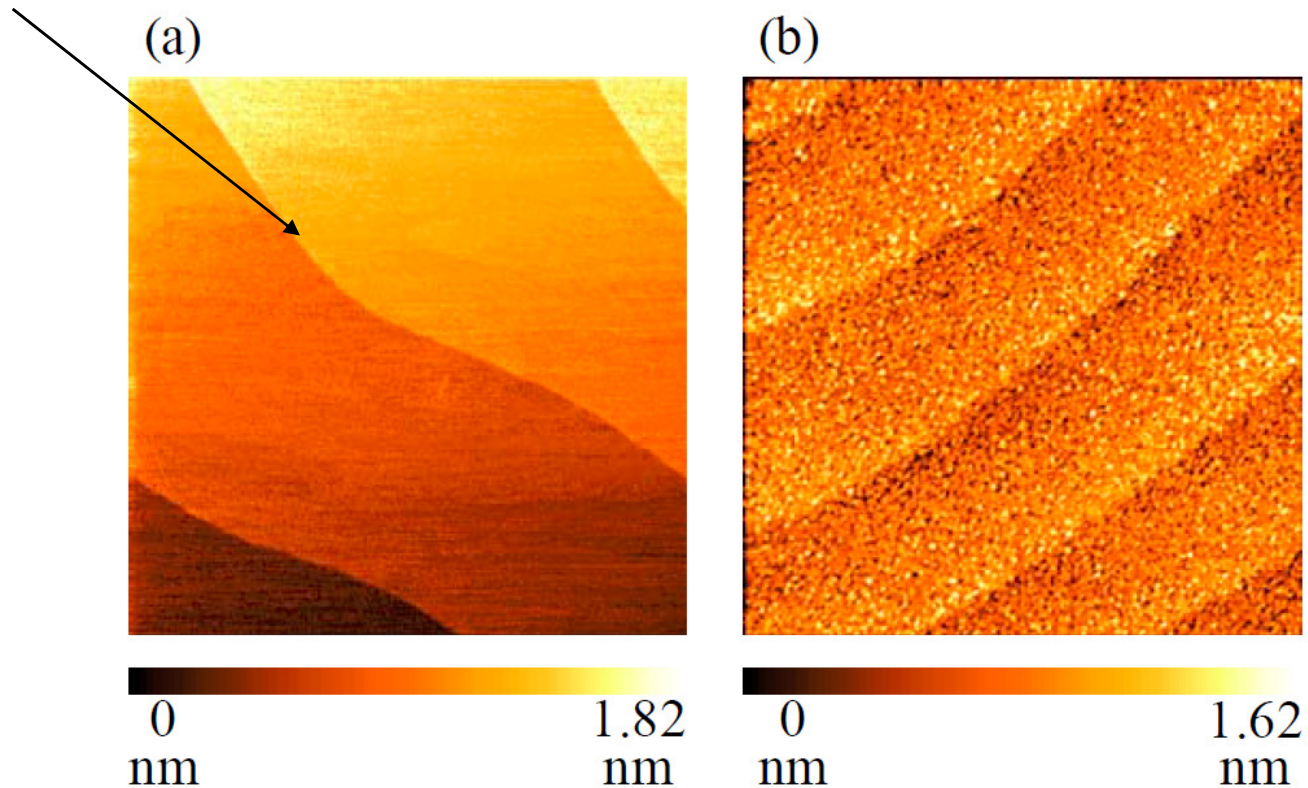
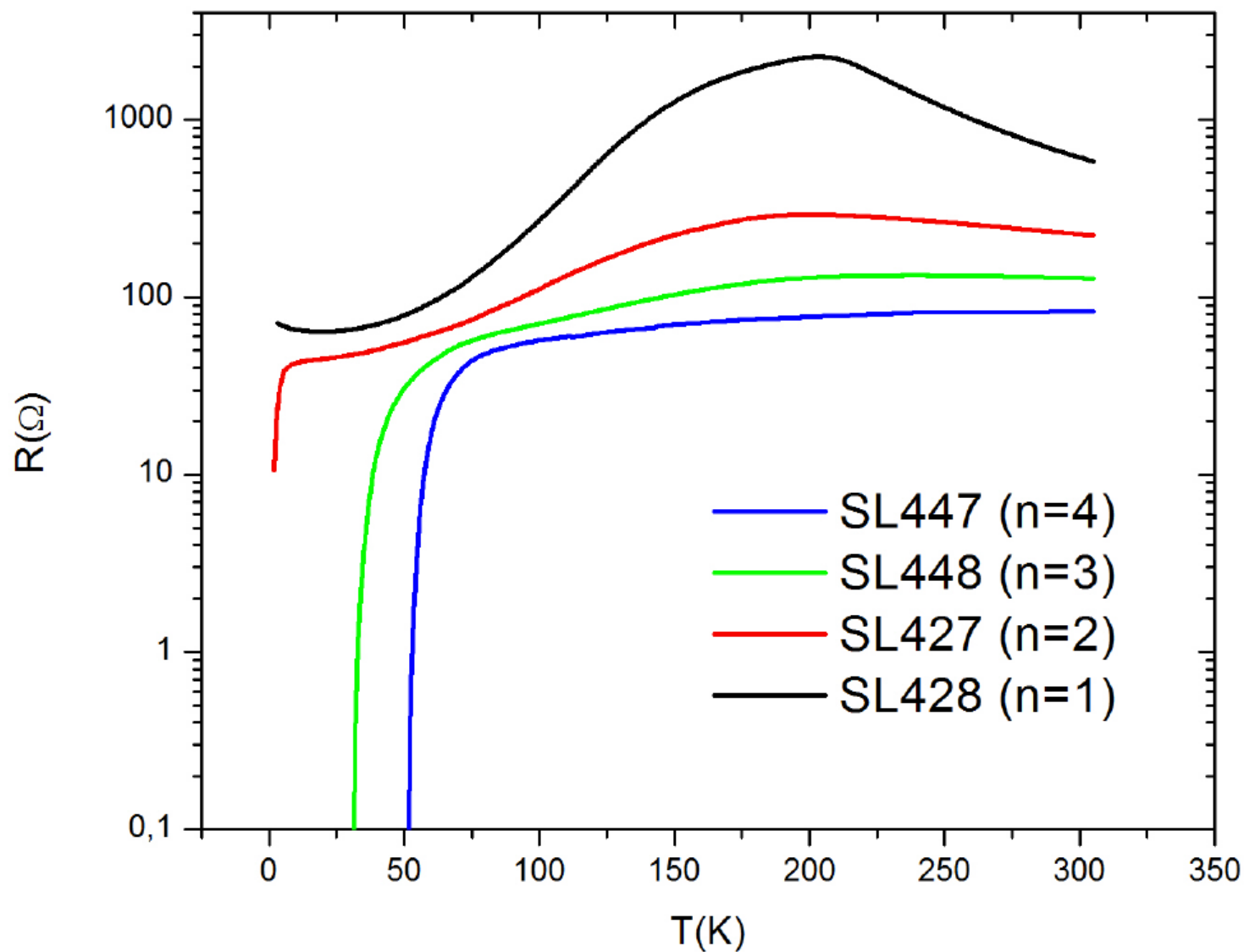


Figure 3 The $2 \times 2 \mu\text{m}^2$ surface image of (a) surface treated $\text{STO}(100)$ substrate and (b) LFO thin film.

již dvě dvouvrstvy CuO₂ jsou supravodivé (n=2)



Příklad z PLD růstu: nové supravodiče z BaCuO_2 a SrCuO_2

Norton et al, Science (1994)

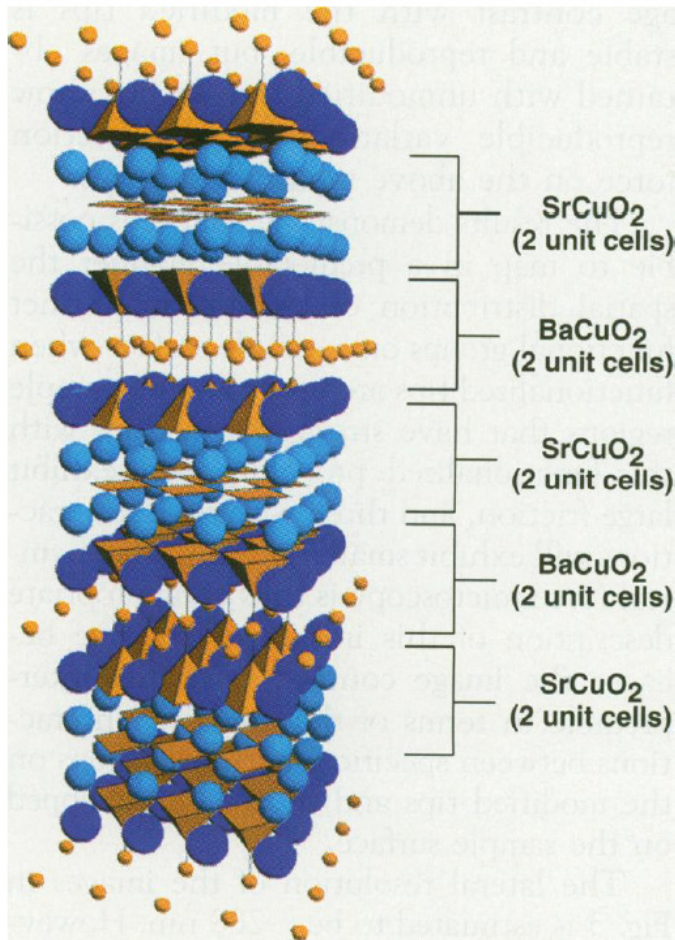


Fig. 1. Structural model of a 2×2 SrCuO_2 - BaCuO_2 superlattice compound, also designated as $\text{Ba}_2\text{Sr}_2\text{Cu}_4\text{O}_{8+\delta}$. The Ba, Sr, and Cu atoms are represented by the large, medium, and small spheres, respectively. The CuO_4 and CuO_5 units are shown as shaded polyhedra.

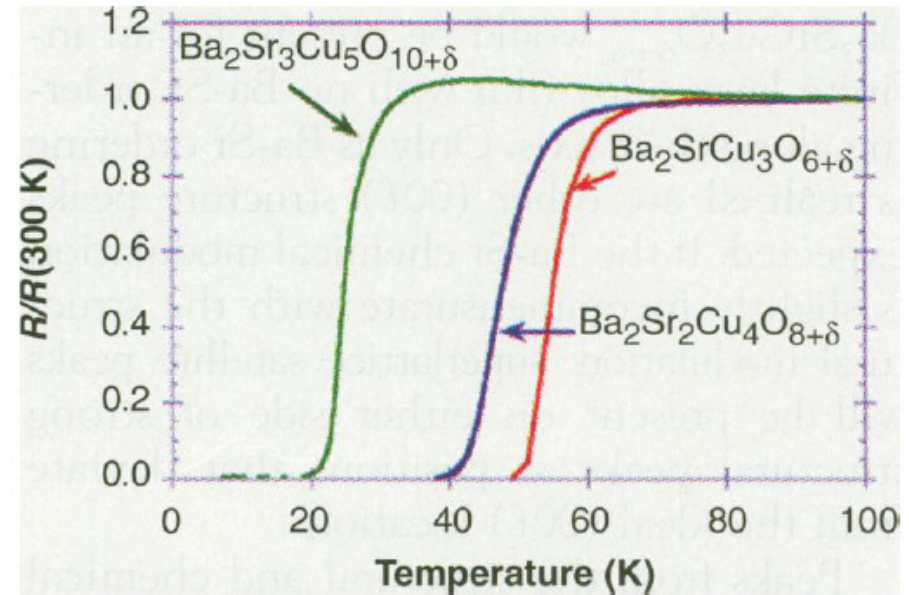
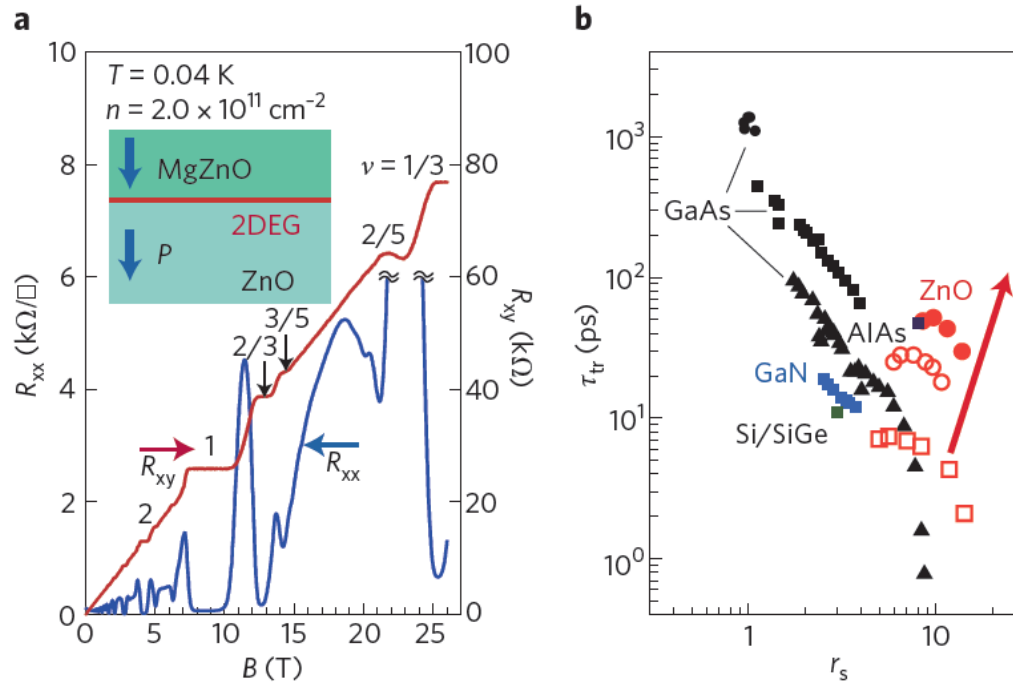


Fig. 3. Normalized resistance plotted as a function of temperature for the $n = 2, 3,$ and 4 members of the $\text{Ba}_2\text{Sr}_{n-1}\text{Cu}_{n+1}\text{O}_{2n+2+\delta}$ series.

- materiály BaCuO_2 a SrCuO_2 samostatně nejsou supravodivé
- v supermřížce vykazují supravodivost až 50-60 K

zásadní role rozhraní



**Herbert Kroemer:
(Nobelova cena r. 2000):
„Interface is THE device“**

- narozhraní mezi piezoelektrickými materiály MgZnO a ZnO vzniká 2D elektronový plyn
- pohyblivost dosahuje až $300,000 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$, což umožňuje vidět např. zlomkový kvantový Hallův jev

Figure 8 | Fractional quantum Hall effect in ZnO. **a**, Longitudinal resistance R_{xx} (blue) and Hall resistance R_{xy} (red) of a 2DEG formed at a MgZnO/ZnO interface. Inset: depicts a cross-sectional schematic of the heterostructure. **b**, Comparison of 2DEGs in various semiconductors as functions of the electron–electron interaction strength represented by the Wigner–Seitz radius r_s and transport scattering time τ_{tr} . Data are derived from Fig. 2 of ref. 81 except for the solid red circles, obtained for the sample shown in **a**. The arrow indicates the direction of progress in pursuing a regime of parameters in ZnO that are hard to access in other semiconductors. Panels adapted with permission from: **a**, ref. 83, © 2011 APS; **b**, ref. 81, © 2010 NPG.

- rozhraní mezi oxidy přechodových kovů získávají často jiné vlastnosti než objemové materiály

3d orbitaly a interakce mezi nimi na rozhraní

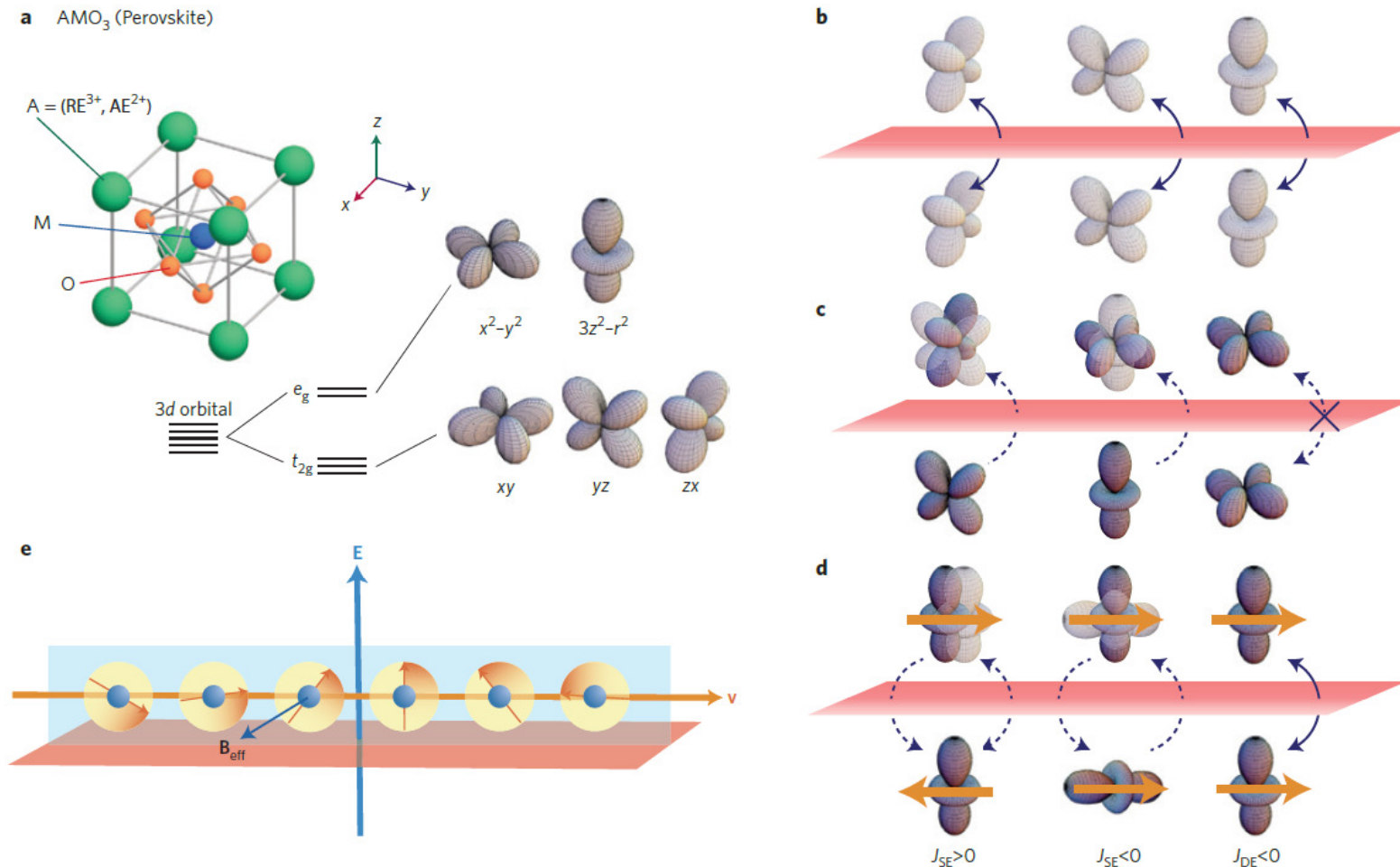
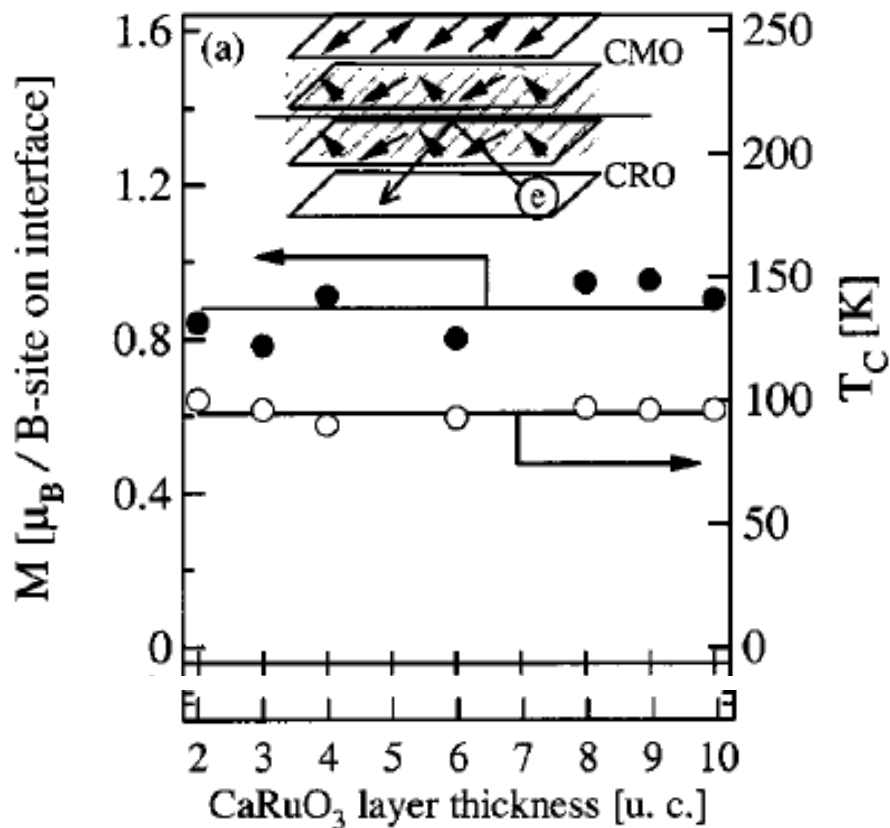


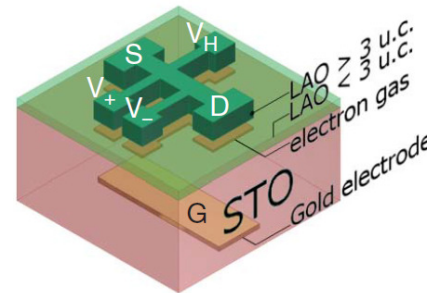
Figure 2 | Orbital and spin configurations at interfaces. **a**, Perovskite structure and orbital energy levels under the cubic crystal field due to oxygen ions. RE, rare earth elements; AE, alkaline earth elements. **b**, Allowed hopping matrix elements between orbitals across the interface (red). **c**, Allowed virtual hopping matrix elements across the interface. The lightly coloured orbitals are the destination of the virtual hopping process, while the electron is occupied in the darkly coloured orbital. **d**, Various exchange interactions across the interface ($J > 0$, antiferromagnetic; $J < 0$, ferromagnetic); left, antiferromagnetic super-exchange interaction ($J_{SE} > 0$) using the same orbital in the intermediate state; middle, ferromagnetic super-exchange interaction between different orbitals; right, double-exchange interaction ($J_{DE} < 0$) where the real hopping of the conduction electron between the two M ions mediates the ferromagnetic coupling. **e**, Rashba-type spin-orbit interaction (SOI); the internal or applied electric field can produce an effective magnetic field (B_{eff} ; dark-blue arrow) through the SOI to cause spin precession for the moving electron, or cycloidal spin modulation for localized spins.

rozhraní mezi oxidy přechodových kovů získávají často jiné vlastnosti než objemové materiály:

Ferromagnetické rozhraní mezi antiferomagnetem CaMnO_3 a paramagnetickým kovem CaRuO_3



2D supravodivost na rozhraní mezi izolátory LaAlO_3 (LAO) a SrTiO_3 (STO)



Cavaglia et al, Nature (2008)

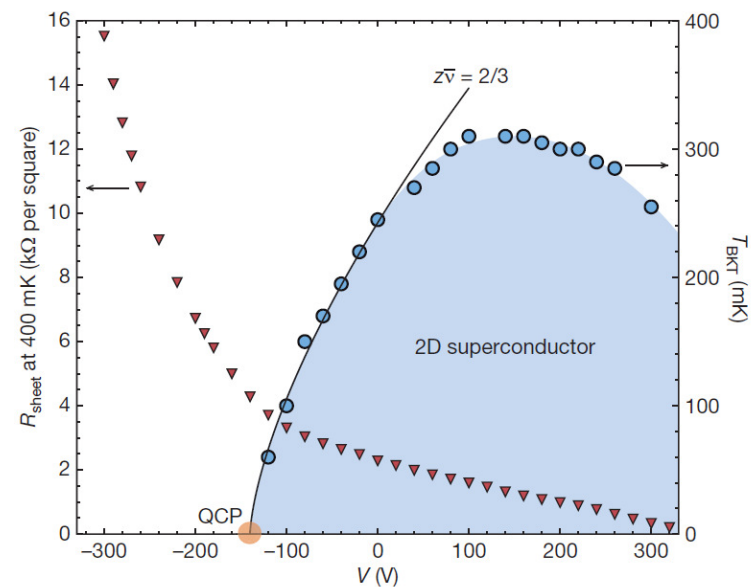
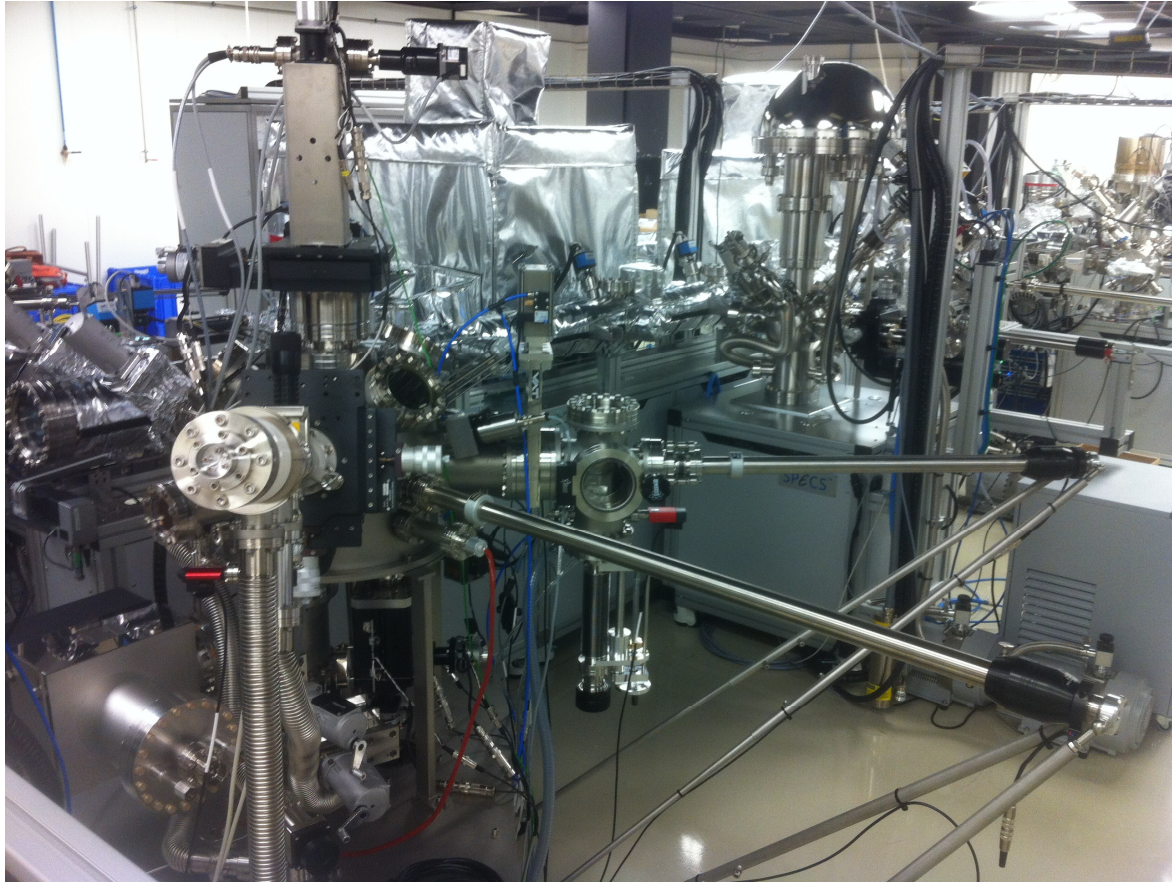


Figure 3 | Electronic phase diagram of the $\text{LaAlO}_3/\text{SrTiO}_3$ interface. Critical temperature T_{BKT} (right axis, blue dots) is plotted against gate voltage, revealing the superconducting region of the phase diagram. The solid line describes the approach to the quantum critical point (QCP) using the scaling relation $T_{\text{BKT}} \propto (V - V_c)^{z\nu}$, with $z\nu = 2/3$. Also plotted is normal-state sheet resistance, measured at 400 mK (left axis, red triangles) as a function of gate voltage.

Takahasi et al, APL, (2001)

PLD v Brně v rámci CEITECu! Instalace – listopad 2015



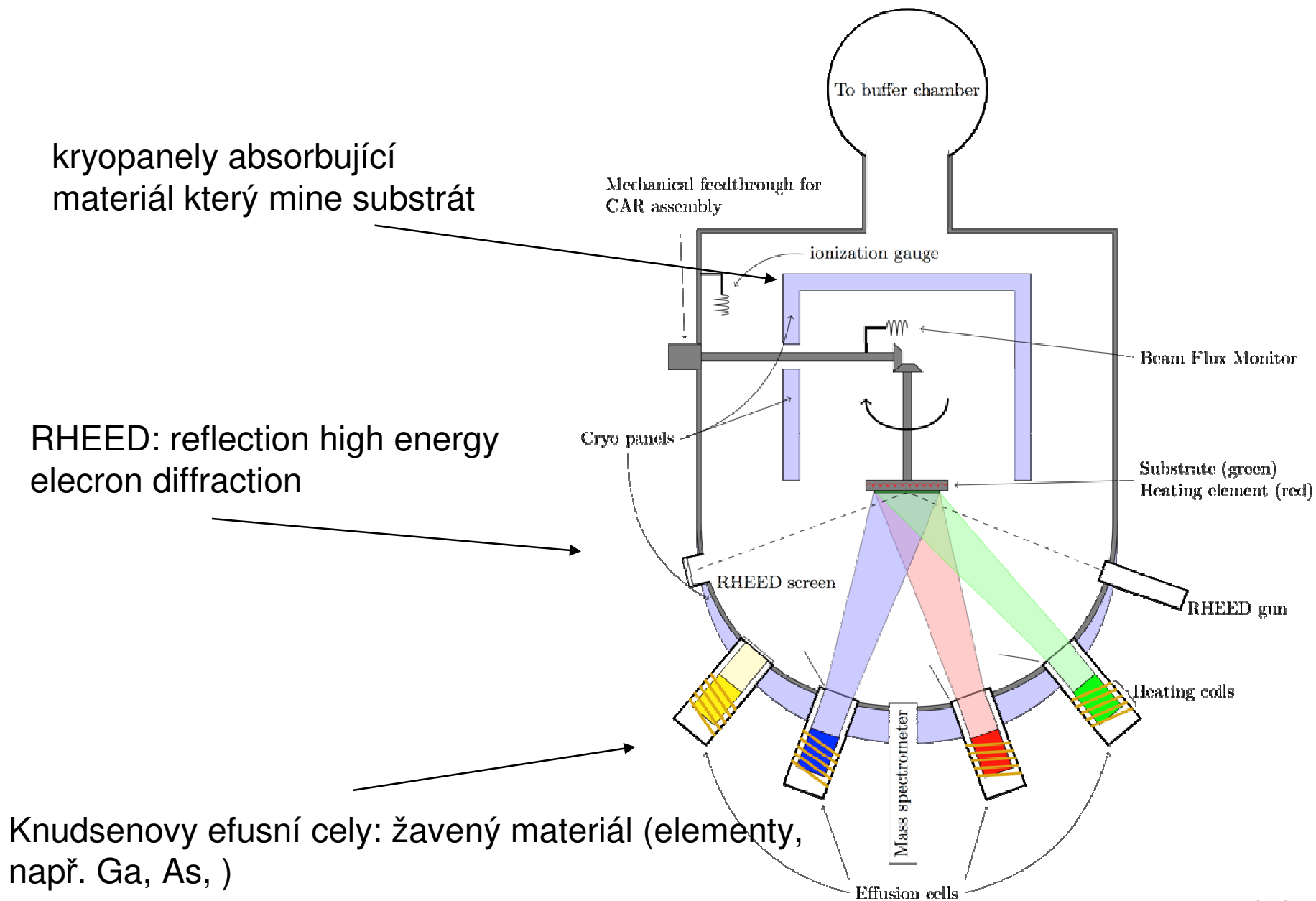
- PLD vybavené špičkovou současnou technologií
- tlak 5×10^{-10} mbar
- kontrola růstu s RHEED
- in situ ozonové atmosféry
- ultra homogenní růst se skenováním laserového svazku
- připojené na UHV klastr s analytickými metodami (XPS, ARPES, LEEM, LEED, STM)

WANTED

- nadšení (mladí) vědci co si by si rádi hráli s 3d orbitaly přechodových prvků a objevovali nové materiály a fenomény na atomární úrovni

Epitaxe molekulárních svazků

Epitaxe molekulárních svazků



Knudsenova efusní cela

- na každý element je potřeba jedna cela
- je nutná kalibrace toku vzhledem k ostatním elementům

nevýhody: finanční náročnost při změně elementů

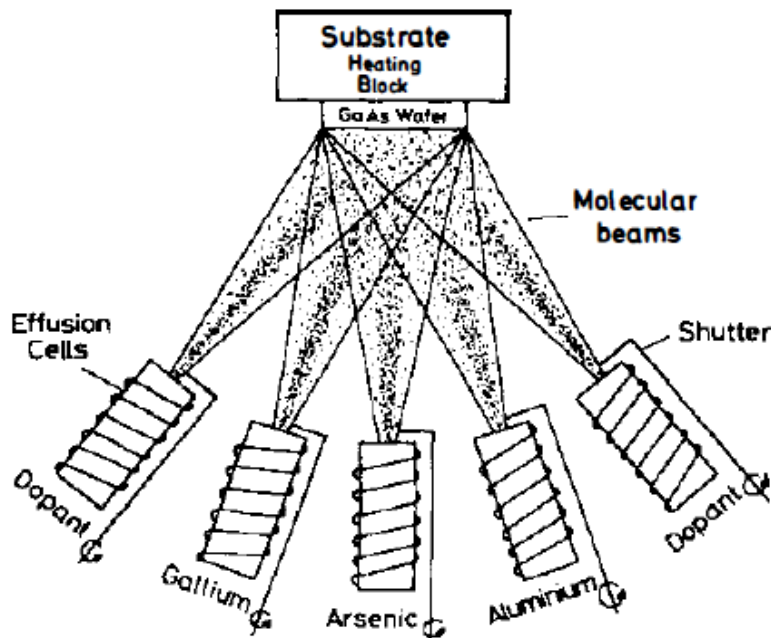
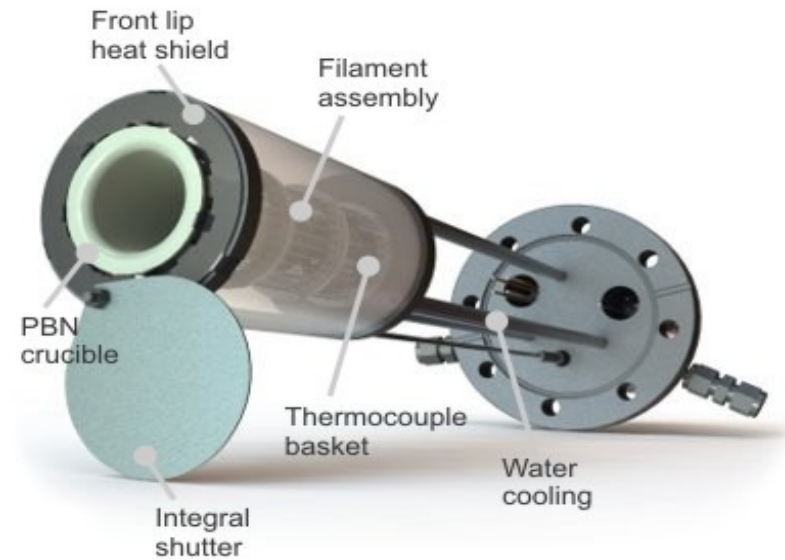


Figure 1 Schematic illustration of the basic evaporation process for molecular beam epitaxy of intentionally doped GaAs and $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$.

Ploog, 1981

charakteristiky MBE

- nízká depoziční rychlost ~ monovrstva/s
- in-situ kontrola atomárního složení vrstev pomocí RHEED
- prostředí ultravysokého vakua $\sim 10^{-10}$ mbar minimalizující kontaminaci vzorku
- skoková změna složení na rozhraní

růst „Layer by layer“

Ideální stav:

- atomy se adsorbují na povrchu a nukleují 2D ostrůvky
- 2D ostrůvky rostou až je vrstva úplná
- proces se opakuje

•Reálný stav:

- Následující vrstva se nukleuje dříve než předcházející je dokončena
- počet nedokončených vrstev, tzn. povrchová drsnost, roste s časem
- při přerušení se povrch zaceluje, drsnost klesá a vrací se k původnímu rovnému stavu

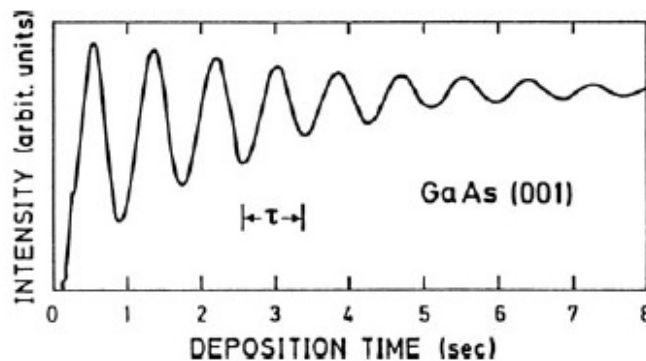
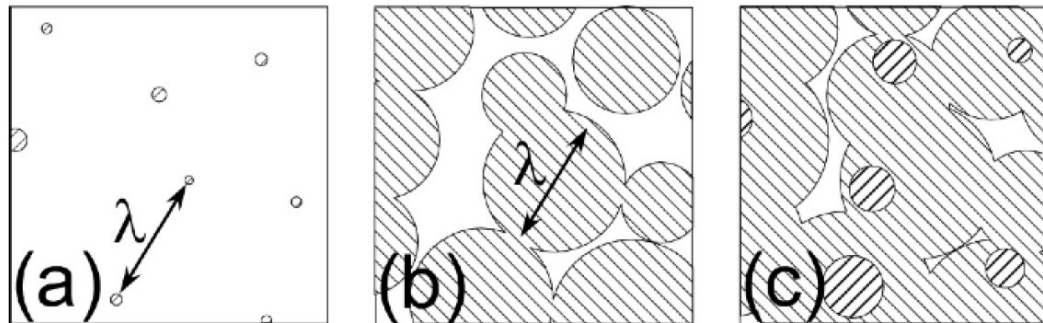
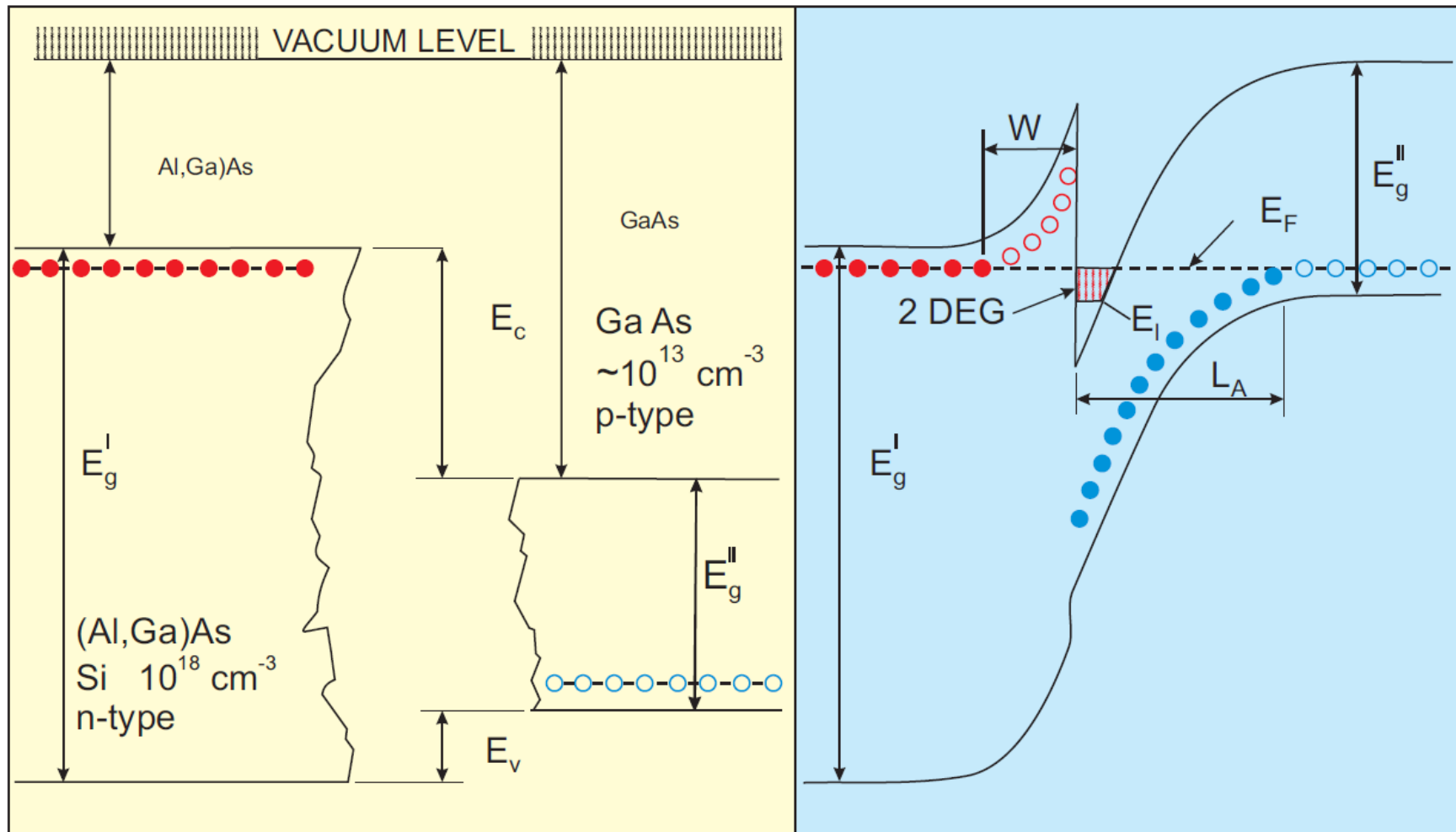


Fig. 2.7 RHEED oscillations measured during MBE growth of GaAs(001). The intensity of the particular RHEED spot is measured as a function of deposition time. The oscillation period τ indicates the completion of a monatomic layer

2D elektronový plyn v GaAs-AlGaAs struktúre

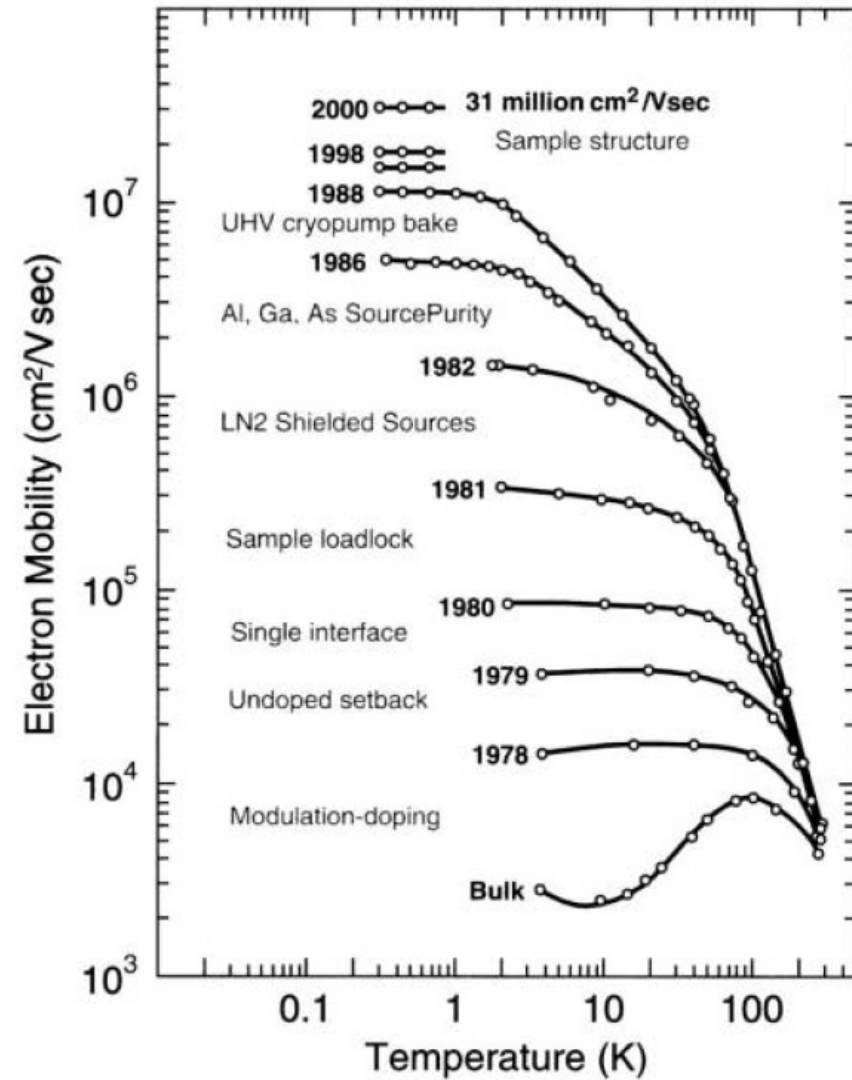


snímek z transmisního elektronového mikroskopu – atomární rozlišení

Fig. 3.32 High-resolution TEM of an AlAs/GaAs double heterostructure. The dark and bright points are correlated with single rows of atoms [3.28]



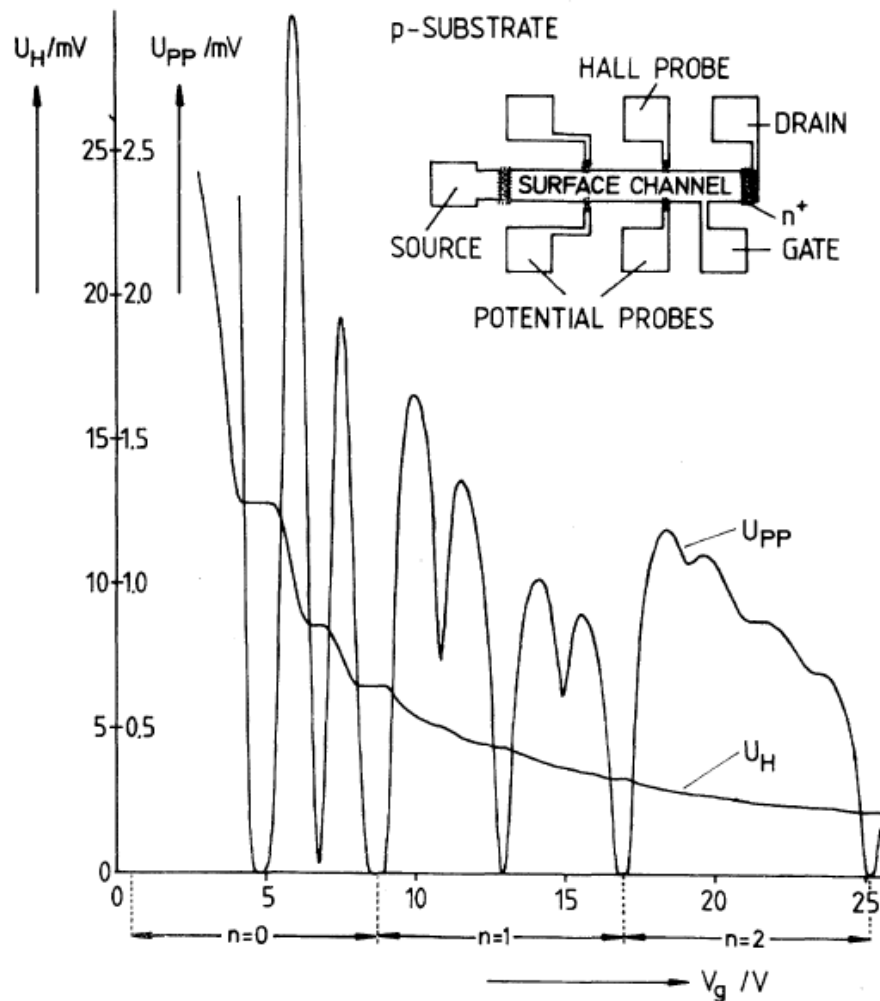
Zlepšování pohyblivosti v závislosti na „čase“



New Method for High-Accuracy Determination of the Fine-Structure Constant Based on Quantized Hall Resistance

K. v. Klitzing

*Physikalisches Institut der Universität Würzburg, D-8700 Würzburg, Federal Republic of Germany, and
Hochfeld-Magnetlabor des Max-Planck-Instituts für Festkörperforschung, F-38042 Grenoble, France*



kvantový Hallův jev

• nobelova cena 1985

$$h/4e^2 = 6453.17 \pm 0.02 \Omega$$

fine structure constant

$$\alpha^{-1} = 137.0353 \pm 0.0004$$

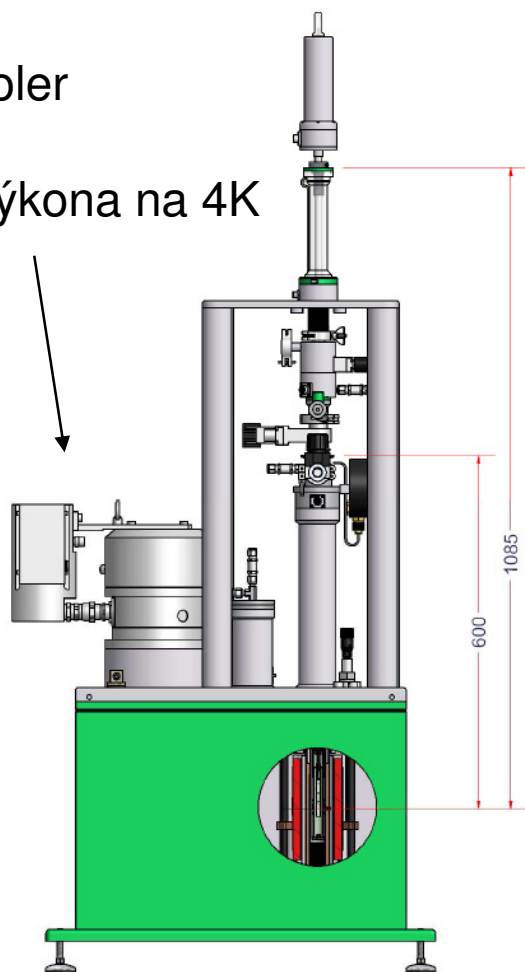
FIG. 1. Recordings of the Hall voltage U_H , and the voltage drop between the potential probes, U_{PP} , as a function of the gate voltage V_g at $T=1.5$ K. The constant magnetic field (B) is 18 T and the source drain current, I , is $1 \mu\text{A}$. The inset shows a top view of the device with a length of $L = 400 \mu\text{m}$, a width of $W = 50 \mu\text{m}$, and a distance between the potential probes of $L_{PP} = 130 \mu\text{m}$.

Měření magnetických vlastností látek

Měření magnetických a transportních vlastností látek

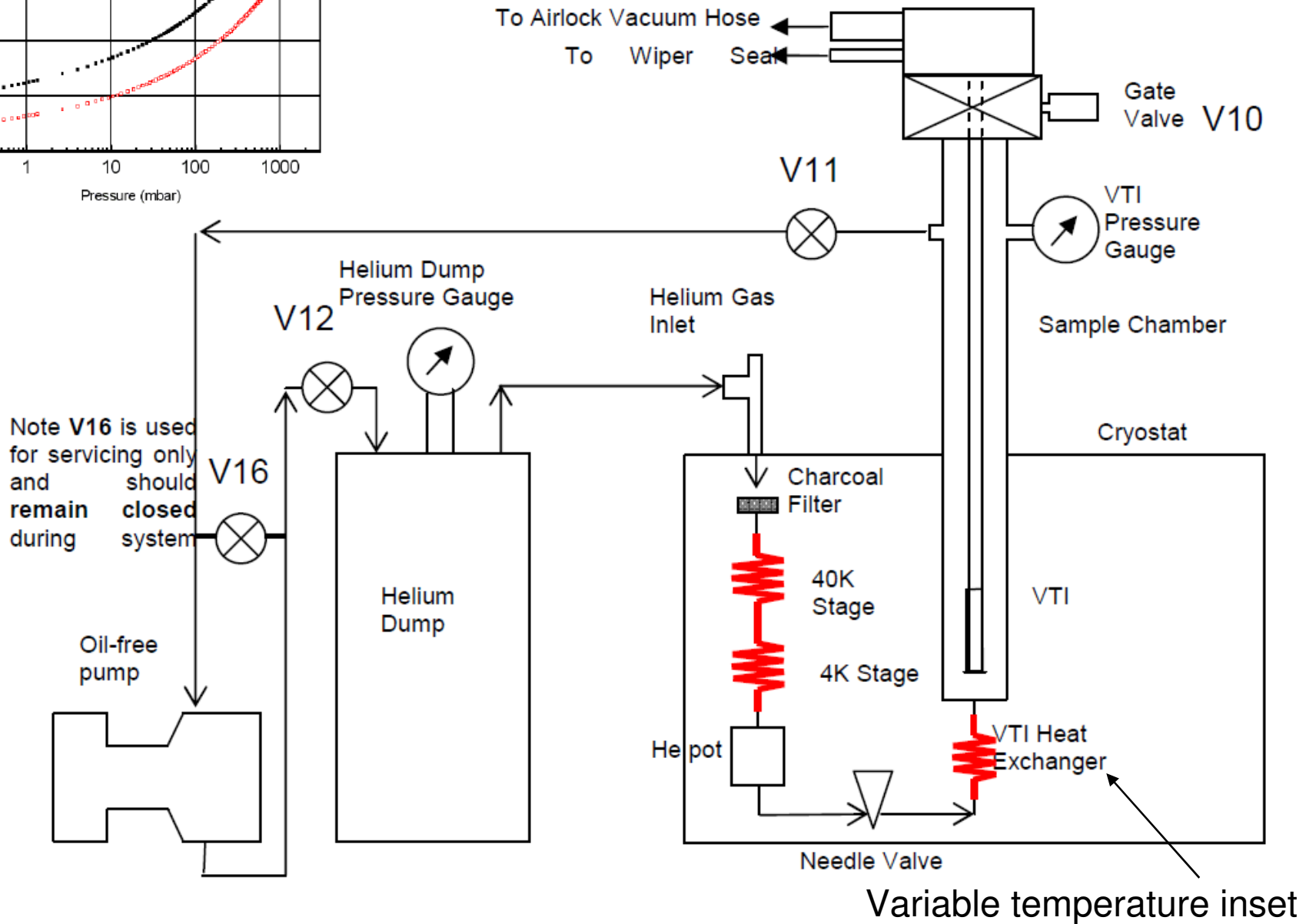
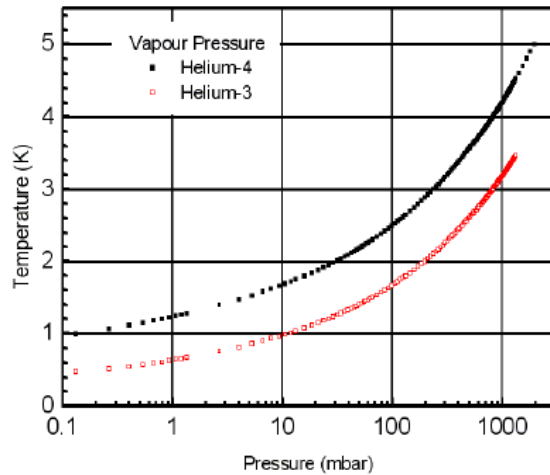
- měření odporu, Hallova koeficientu, magnetické susceptibility a magnetizace
- 1.6 a 400 K v magnetickém poli ± 9 T

pulsní cryocooler
7kW příkon
1W chladící výkon na 4K



výrobce firma Cryogenics

Schéma kryochladiče a kryostatu 1.6-400K



Variable temperature inset

VSM – vibrating sample magnetometer

- indukční technika měření magnetického momentu– vertikální pohyb vzorku (~20Hz) indukuje proud v cívkách
- dvě snímací cívky zapojeny v opačném pořadí – vliv vnějšího magnetického pole se ruší
- signál přichází na synchronní detektor (lock-in amplifier), výsledkem je amplituda a fáze signálu.

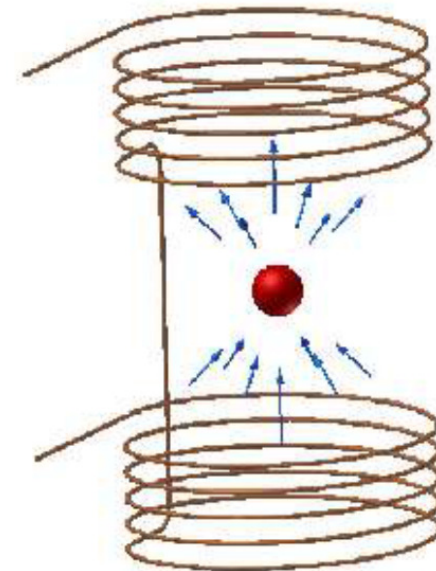
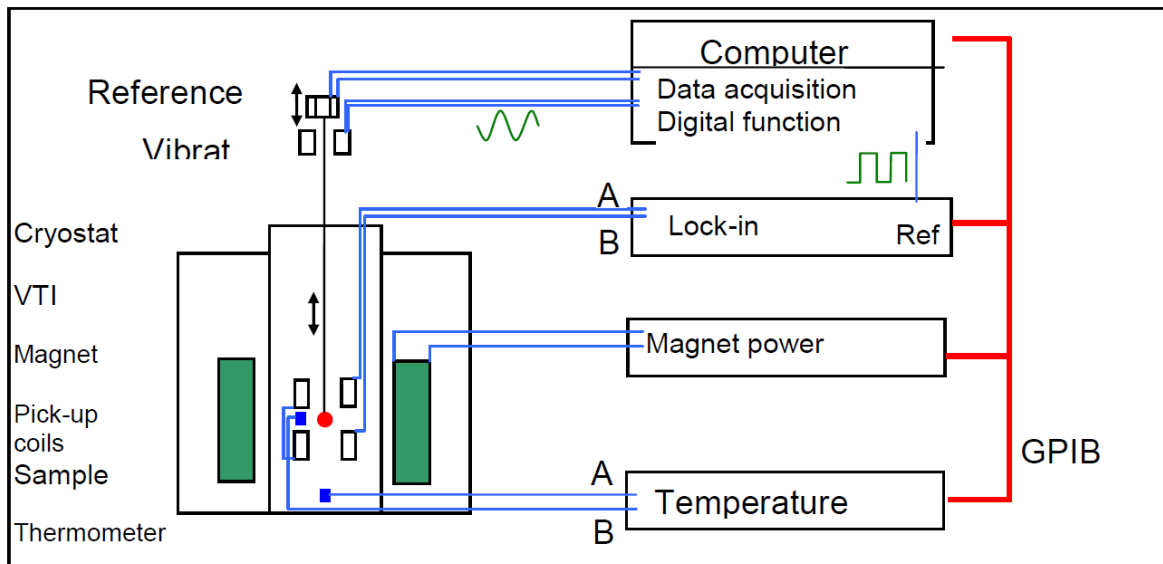


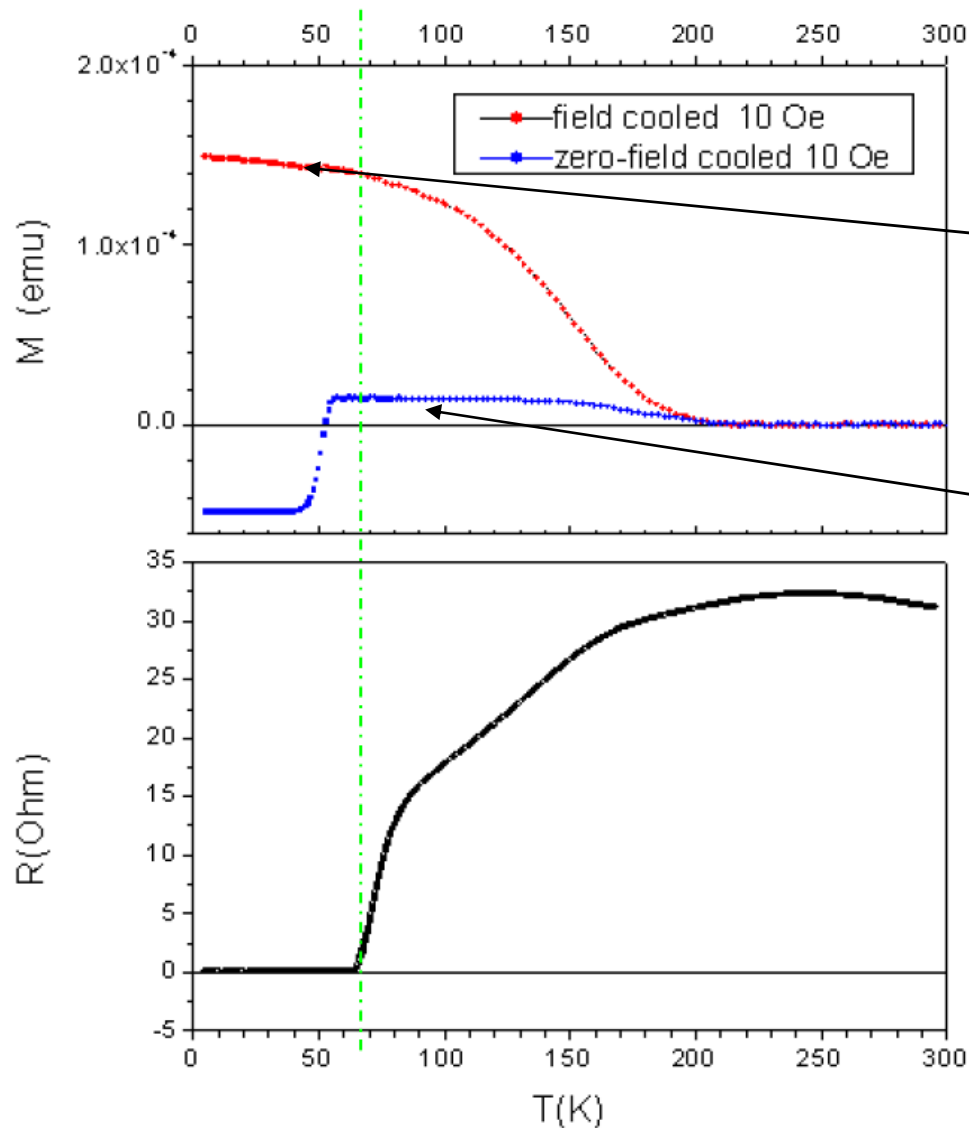
Figure 1-1 Schematic view of sample and VSM pick-up coils. Arrows indicate the direction of the dipole field.

magnetický moment supermřížek YBCO/LCMO

$\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7/\text{La}_{2/3}\text{Ca}_{1/3}\text{MnO}_3 : 300/100 \text{ \AA}$

v magnetometrii je standardně používaná jednotka *cgs emu*.

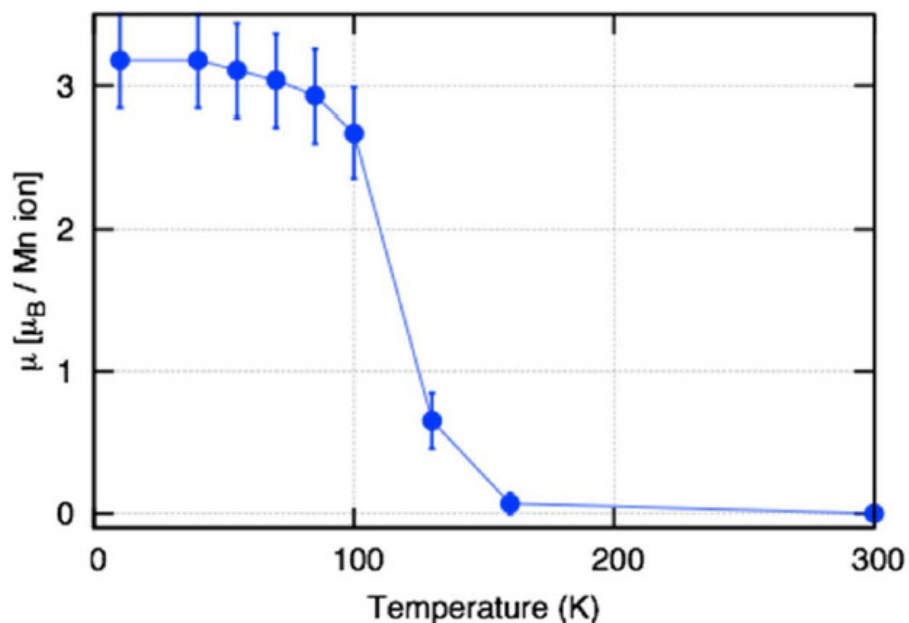
$$1 \text{ emu} = 10^{-3} \text{ Am}^2$$



při chlazení v poli je magnetické pole již uvnitř supravodiče v podobě vortexů

při chlazení v nulovém poli je vidět Meissnerův jev

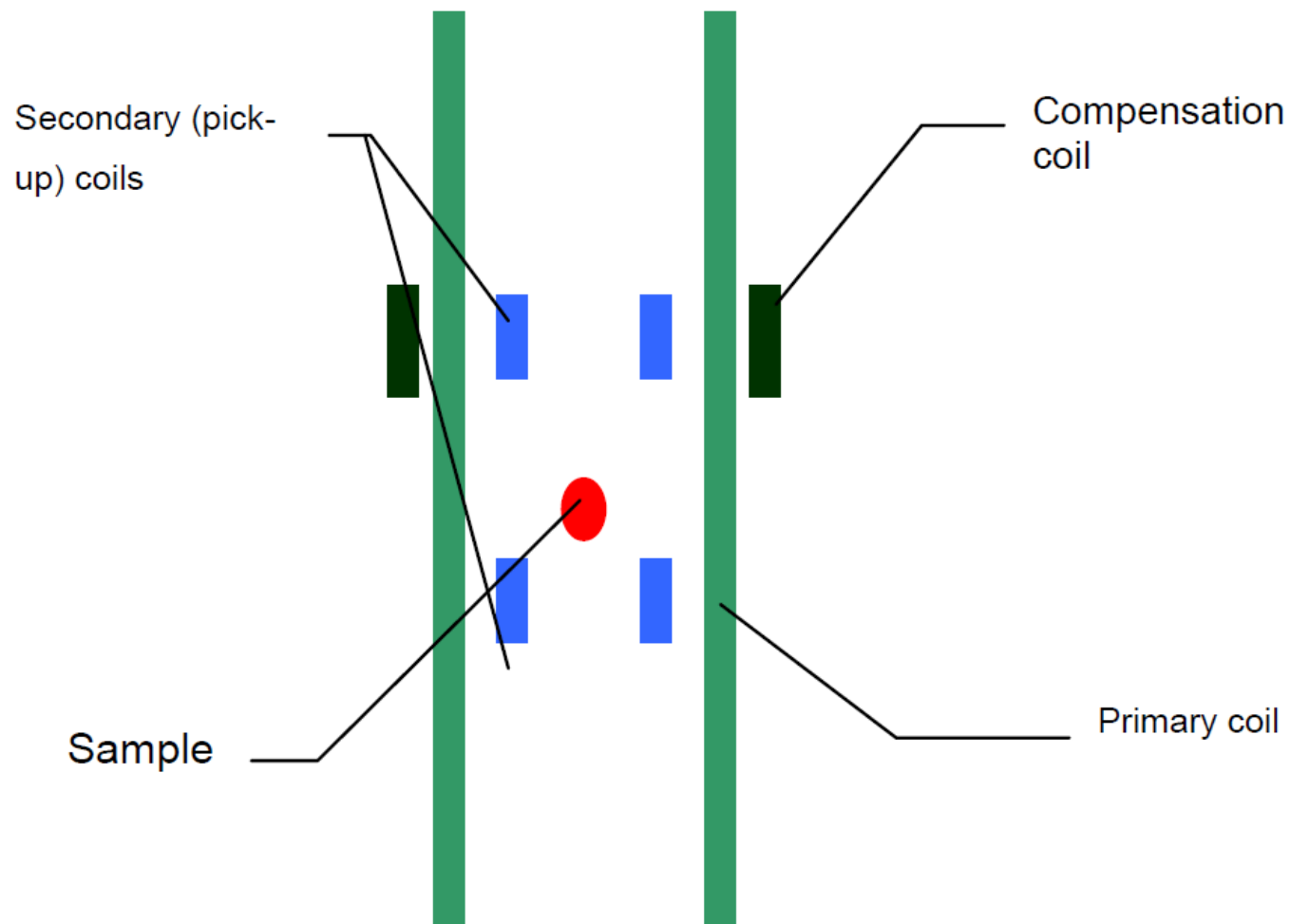
magnetický moment feromagnetického LaMnO_3



Temperature dependence of magnetic moment per Mn ion in LMO layers @ 1 T applied field.

Měření AC magnetické susceptibility

- Primární cívkou se vytváří AC magnetické pole typicky 1mT na 1-10 000 Hz
- pokud je vzorek v blízkosti jedné z cívek, pak měřený signál je úměrný reálné a imaginární části magnetické susceptibility



magnetická susceptibilita feromagnetického $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$

magnetická susceptibilita
(anti)feromagnetu

$$\chi(T) = \frac{C}{T - \theta} + \chi_{core} + \chi_{VV} + \chi_{Pauli}$$

kritická teplota θ

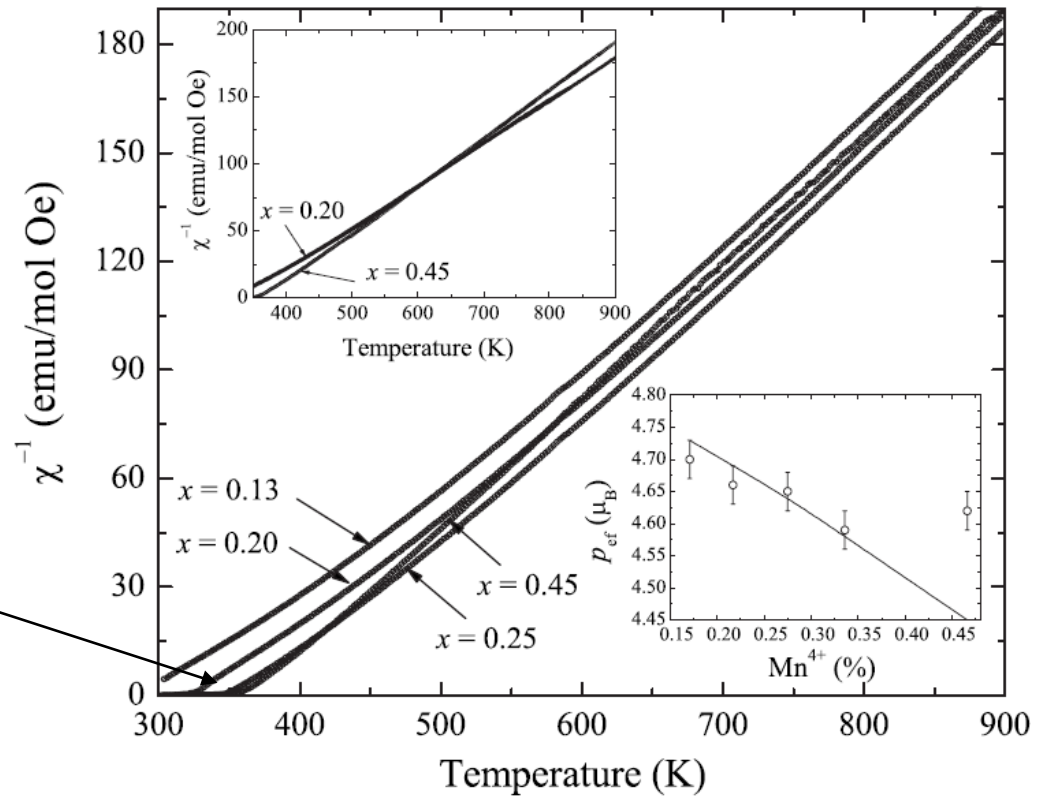


FIG. 6. χ^{-1} versus T for Sr-doped samples with nominal concentrations of $x=0.13$, 0.20 , 0.25 , and 0.45 . The upper inset shows the warming and cooling curves of χ^{-1} for $x=0.20$ and 0.45 . The lower inset shows the obtained effective magnetic moment for the doped samples and the solid line indicates the expected values.

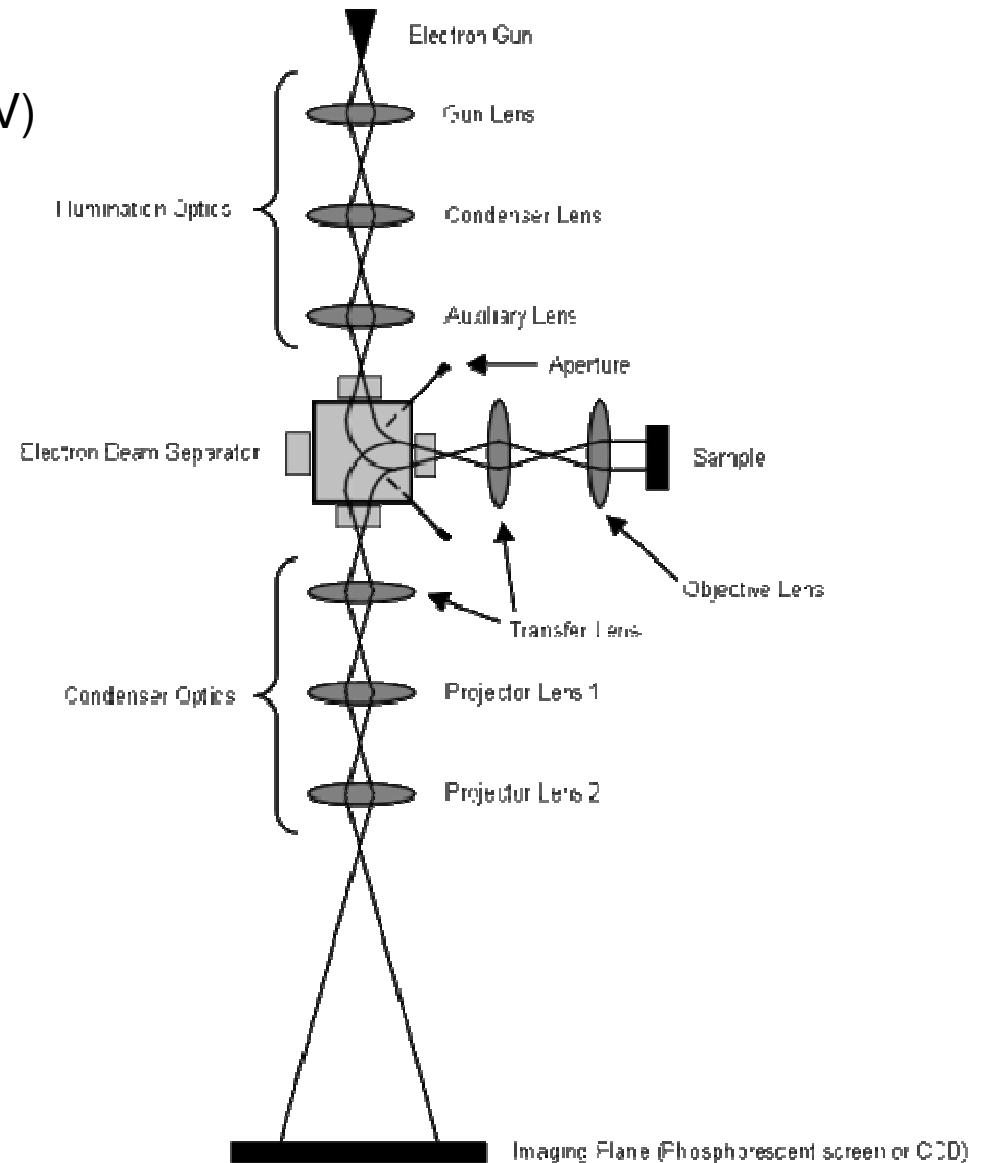
LEEM – Low energy electron microscopy

LEEM – Low energy electron microscopy

- studium struktury povrchů
- vysoce energiové elektrony (15-20 keV) jsou zpomaleny na 1-100 eV a fokusovány na vzorek
- nízká energii lze měnit a tím měnit hloubku průniku do vzorku v řádu horní atomové vrstvy
- elasticky odražené elektrony jsou urychleny, prochází děličem svazků a dopadají na plošný detektor

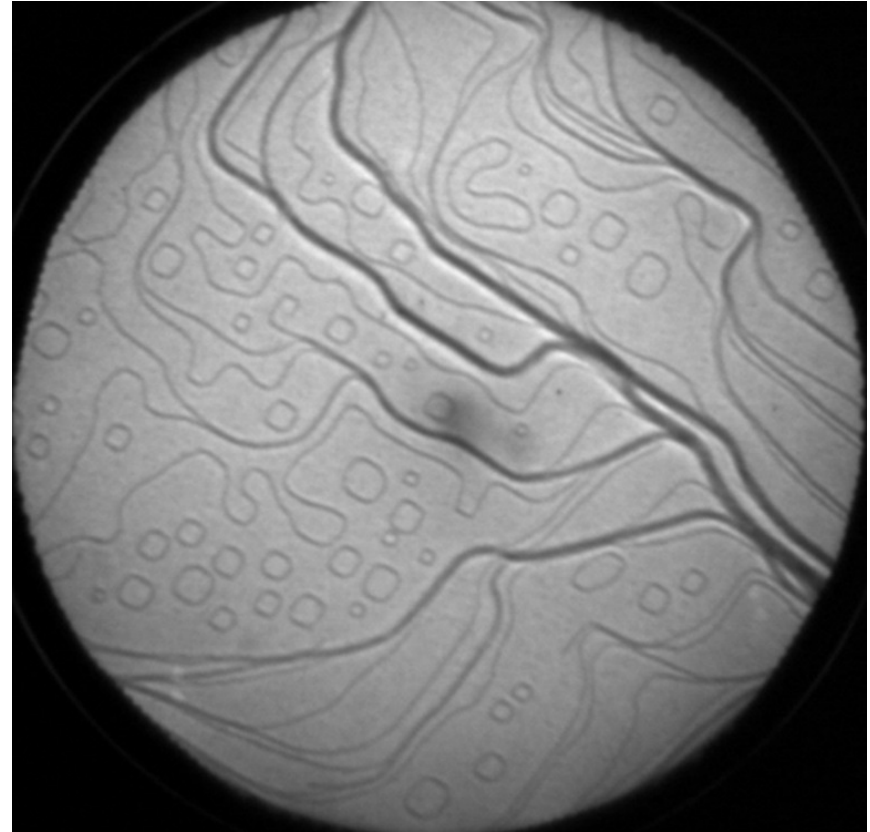
vlnová délka elektronu

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2mE}}; \quad \lambda[\text{Å}] \approx \sqrt{\frac{150}{E[\text{eV}]}}$$



LEEM – Low energy electron microscopy

- povrch Cr(100)
- viditelné atomové schodky
- velikost pohledu 5.6 μm .



LEEM – Low energy electron microscopy

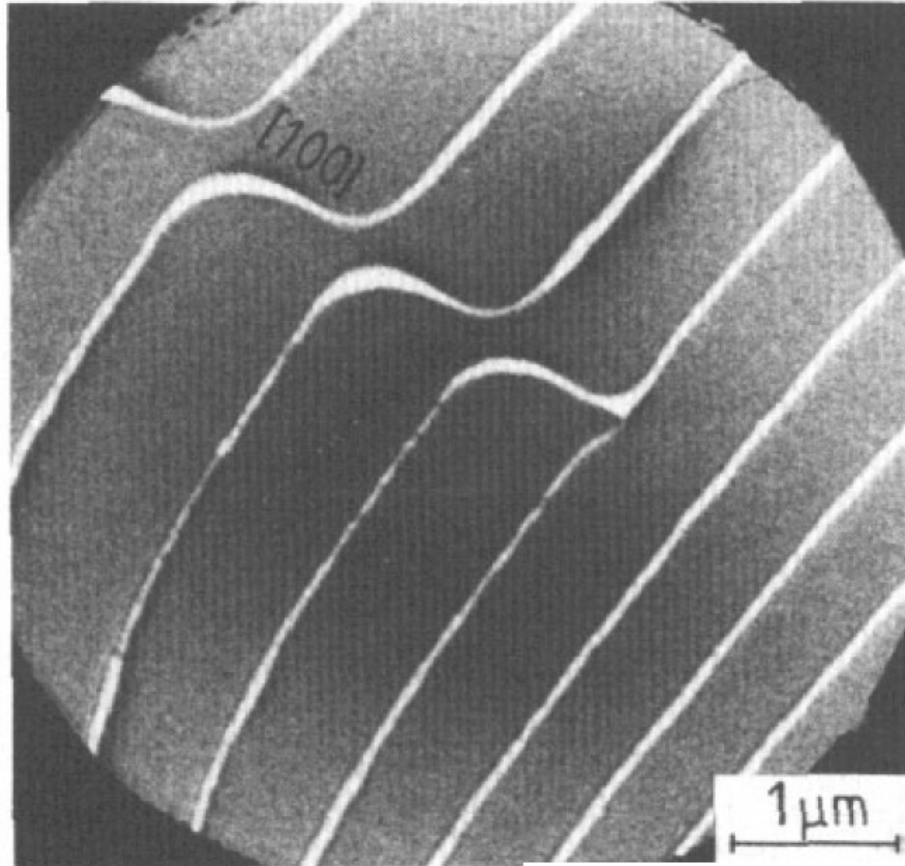


Figure 16. Partially annealed slip trace along [001] on a Mo(110) surface, ending at a screw dislocation. Cu decoration. $E=4$ eV.

LEED – Low energy electron diffraction

- zařízení LEEM lze přepnout do módu kdy se svazek nefokusuje na fluorescenční stínítko ale dopadá na něj difraktovaný svazek. Je pak pozorována difrakce odpovídající povrchu materiálu - LEED

LEED – Low energy electron diffraction

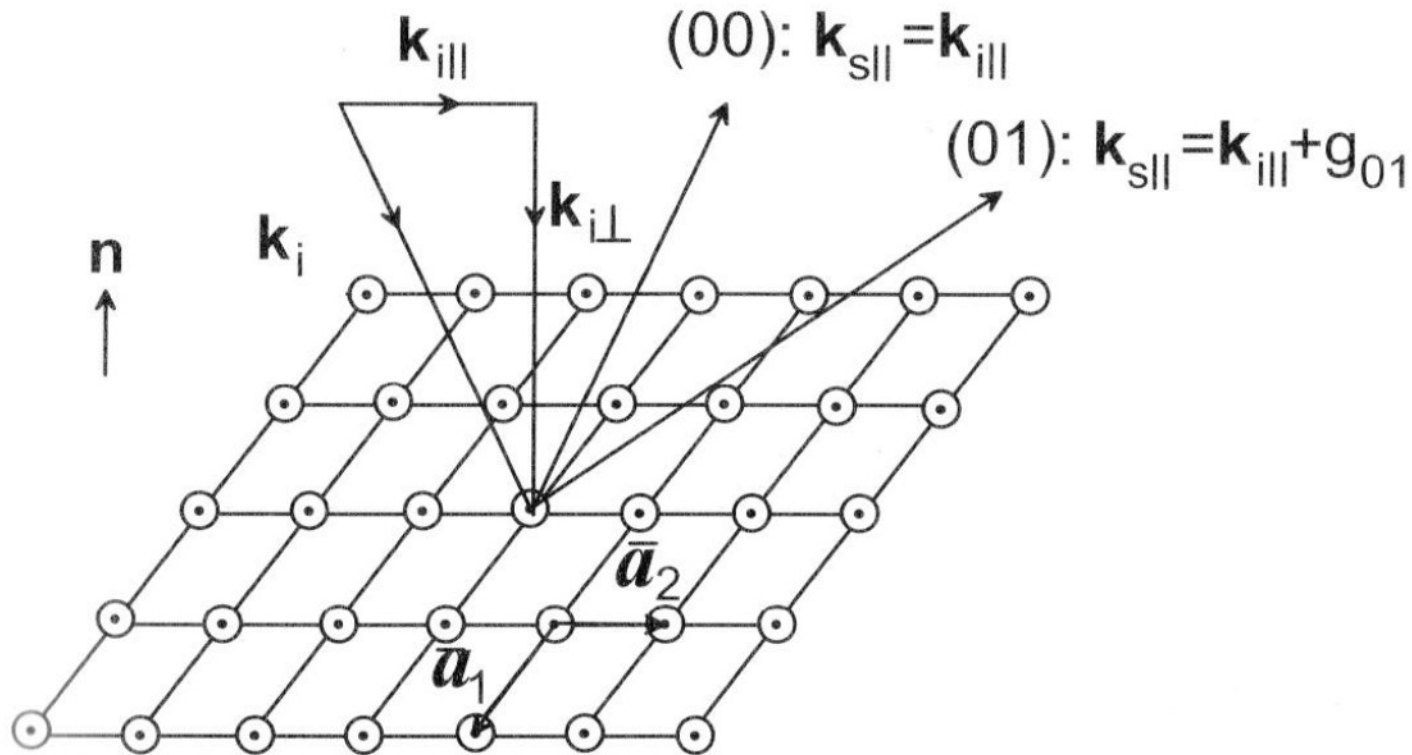


Fig. 1.18. Diffraction of an incident plane wave with wave vector \mathbf{k}_i . The surface is represented by the corresponding 2D Bravais lattice. Parallel momentum conservation with any reciprocal lattice vector \mathbf{g}_{hk} creates well-defined diffracted beams (hk) .

LEED – Low energy electron diffraction

- Jelikož elektrony pronikají do materiálu jen jednu nebo dvě monovrstvy, kolmo na povrch nejsou žádné omezující difrakční podmínky – dochází k difrakci pro jakékoliv kolmé hodnoty k vektoru, tedy reciproká mříž se setává z čar kolmých na povrch (truncation rods)
- Evaldova koule pak představuje zákon zachování energie při elastickém rozptylu.
- V průniku koule a reciproké mříže dochází k současnému splnění difrakčních podmínek a zákona zachování energie a tedy se zde realizuje difrakce.

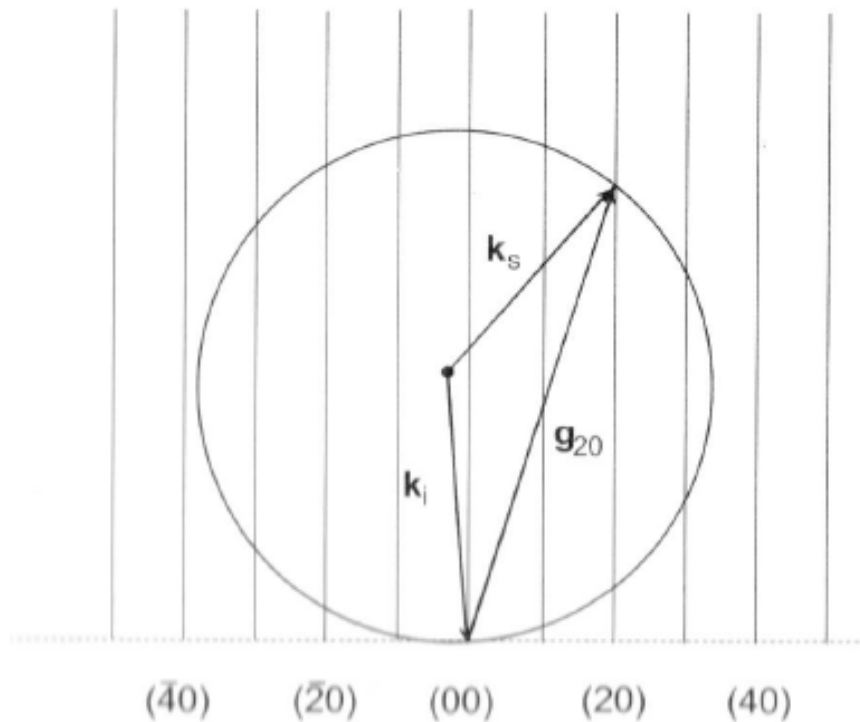


Fig. 1.19. Ewald construction for elastic scattering on a 2D Bravais lattice. A scattering geometry is considered in which the momentum conservation is fulfilled with reciprocal lattice vectors g_{h0} parallel to \hat{b}_1 .

LEED – Low energy electron diffraction

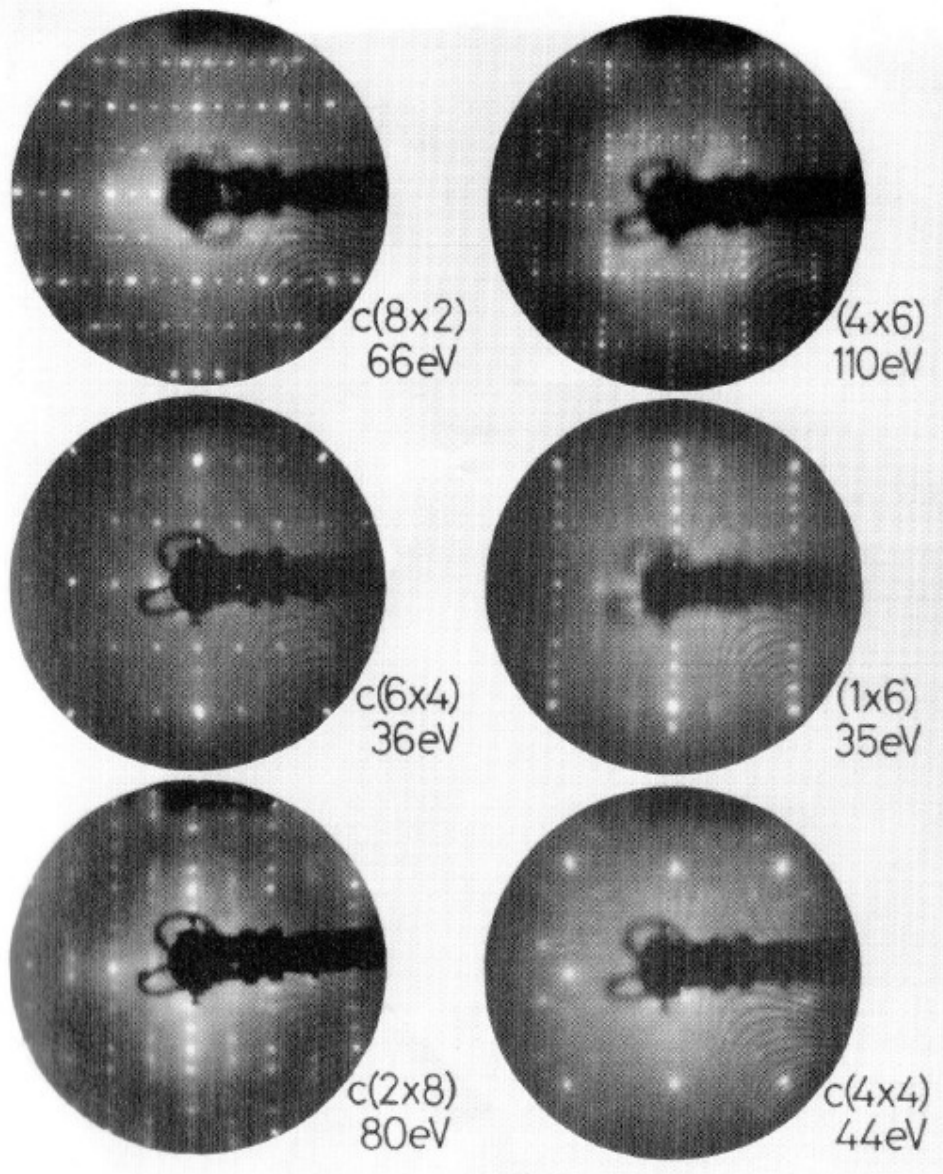
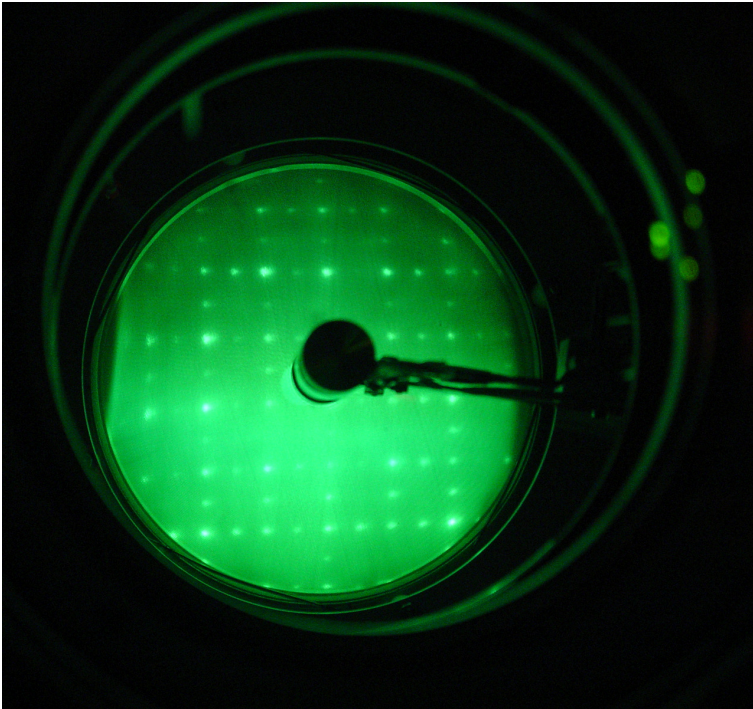


Fig. 1.20. LEED images of six differently prepared GaAs(100) surfaces. After [1.15]. The surface reconstruction and the electron energy are indicated.

LEED – Low energy electron diffraction



- rekonstruovaný povrch Si(100).
- objemová mříž je kubická, povrchová rekonstrukce má periodicitu 2x1, difrakce pochází od různých domén na sebe kolmých

LEIS – low energy ion scattering

LEIS – low energy ion scattering

Energie dopadajícího iontu E_0
ze zákona zachování energie a hybnosti je
energie odraženého iontu

$$E_F \equiv kE_0 = \left\{ \left[\cos \theta + \sqrt{r^2 - \sin^2 \theta} \right] / (1 + r) \right\}^2 E_0$$

$$r = m_2 / m_1$$

řešení této rovnice je jen pro

$$m_2 > m_1$$

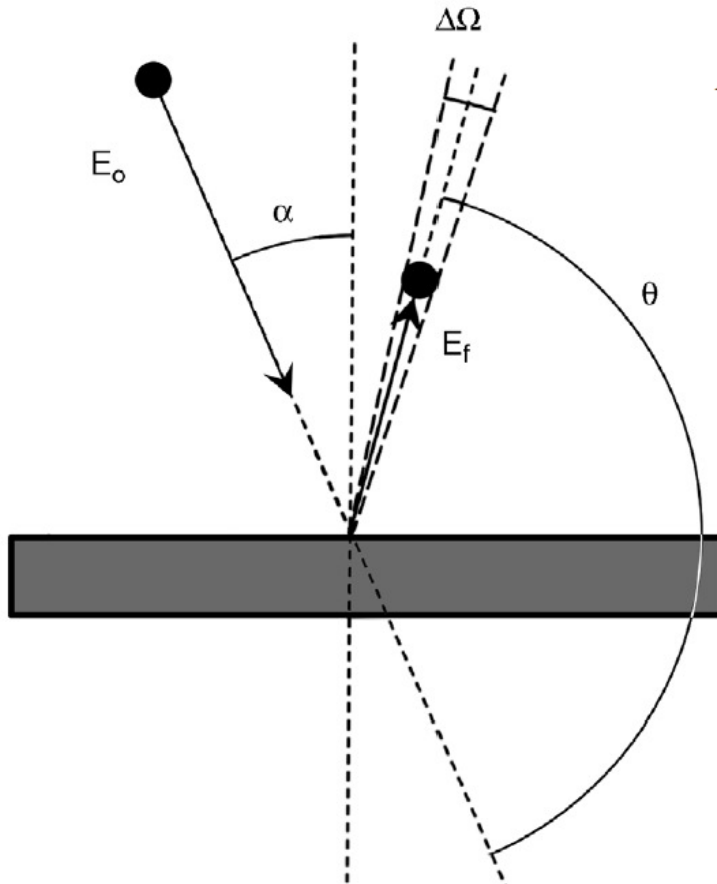


Figure 4. Diagram of the ion scattering process. The scattering angle θ , polar angle α , and acceptance angle $d\Omega$ are indicated, as well as the incident energy E_0 and scattered energy E_f .

LEIS – low energy ion scattering

- nízkoenergiová varianta RBS (Rutherford back scattering), pracuje s energiemi 100eV-10 keV
- používá typicky ionty vzácných plynů He⁺, Ne⁺, Ar⁺ and Kr⁺
- díky malé energii je citlivá jen na zcela první vrstvu atomů na povrchu
- energie zpětně odražených atomů určuje atomární složení vyjma H, He (studované atomy musí být těžší než použitá sonda)
- asymetrické ohony od linií určují i hloubkový profil (do 10nm)

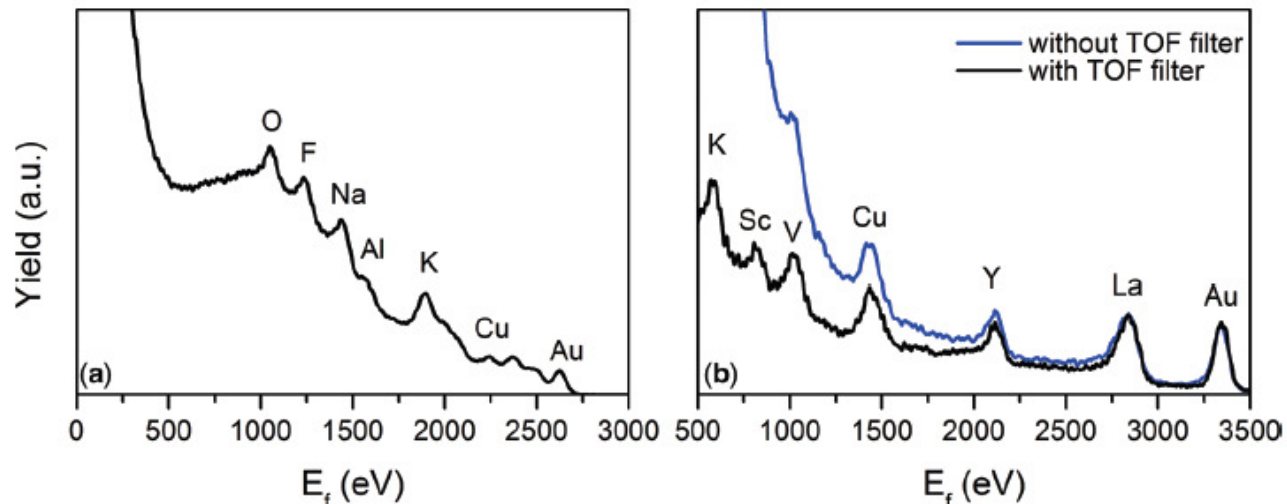


Figure 2. Energy spectra of (a) 3 keV $^4\text{He}^+$ and (b) 5 keV $^{20}\text{Ne}^+$ ions backscattered by a multicomponent sample. The scattering angle is 145° . The heavier Ne^+ ions give a better mass separation, but cannot detect the lighter elements. The rising background at low energies is due to secondary (sputtered) ions. It can be reduced by time-of-flight filtering, thus enabling the detection and quantification of K, Sc, and V with Ne^+ ions Reprinted from (Brongersma et al., 2010a), Copyright (2010), with permission from Elsevier.

LEIS – low energy ion scattering

- asymetrické ohony od linií určují i hloubkový profil (do 10nm)

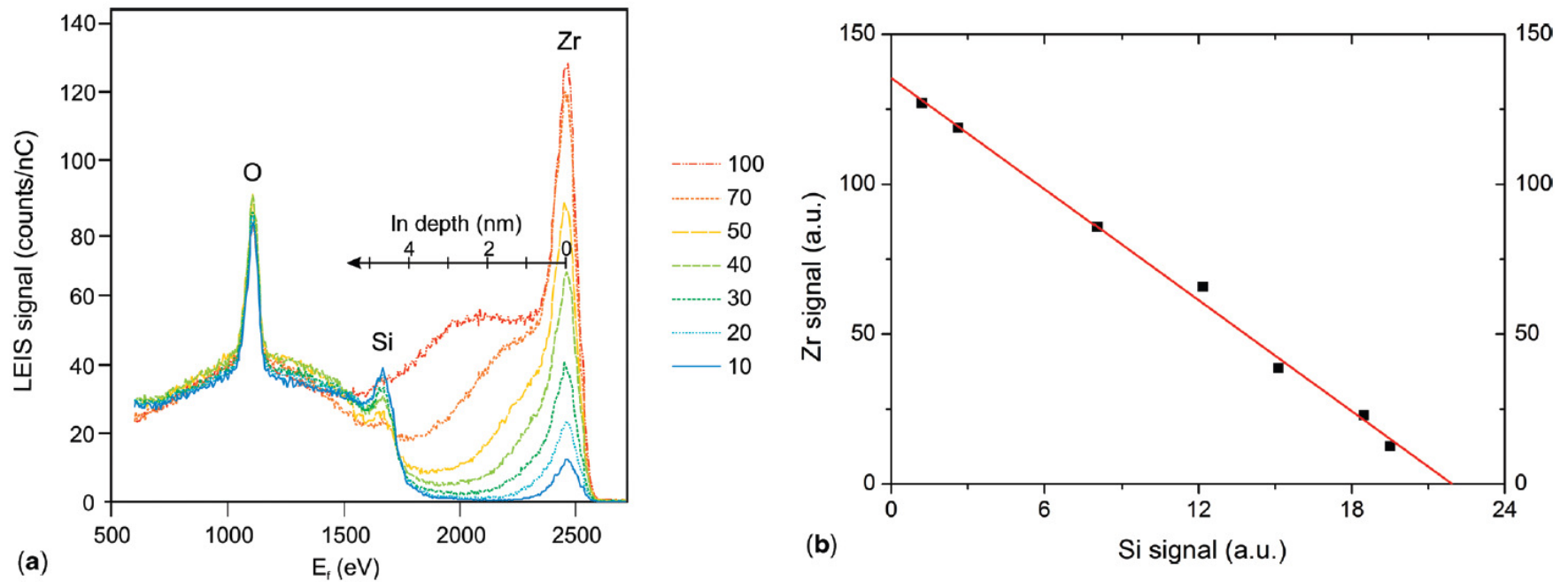
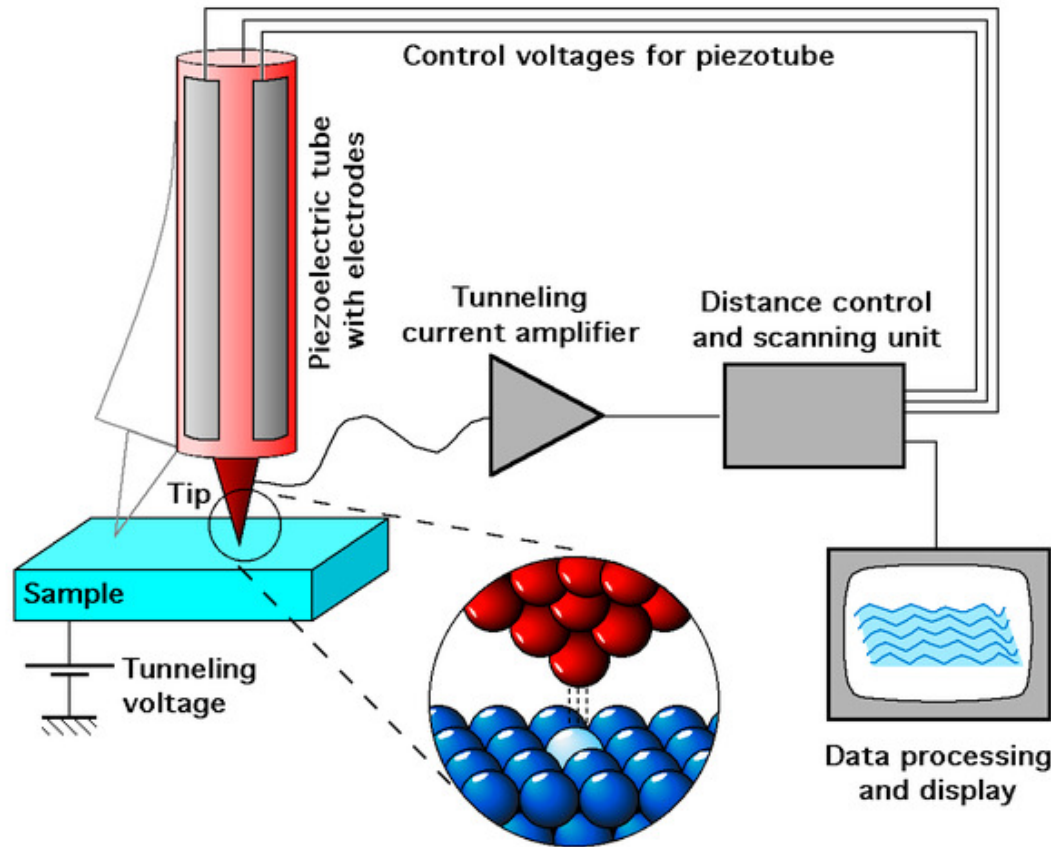


Figure 3. 3 keV He^+ analysis of ZrO_2 films grown by Atomic Layer Deposition (ALD) on a Si wafer (Puurunen et al., 2004). **(a)** In addition to the O and Zr surface peaks, an increasing tail is visible (2300–1700 eV) for the thicker layers. This is the depth profile of Zr. After 70 growth cycles, the pinholes (Si peak) in the layer are still visible. The organic contamination of the layers, as a result of transportation, has been removed with atomic oxygen. This treatment also oxidized the Si surface. **(b)** The Zr surface peak increases linearly with the ZrO_2 coverage, while the Si peak decreases. This linear dependence (Equation 4) results from the unique monolayer sensitivity and the absence of matrix effects of LEIS.

Skenovací tunelovací mikroskopie (STM)

Skenovací tunelovací mikroskopie (STM)



tunelovací proud je exponenciálně závislý na vzdálenosti d a výstupní práci ϕ

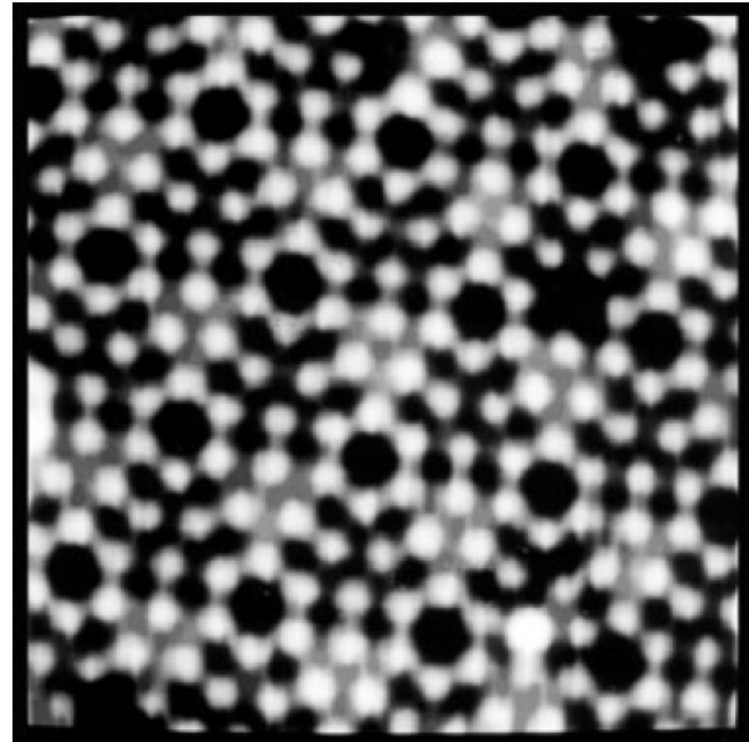
$$I_T \propto \frac{U}{d} \exp\left(-Kd\sqrt{\phi}\right)$$

U ... napětí

- skenování povrchu podobně piezoposuvů (podobně jako při AFM), ale při konstantním tunelovacím proudu mezi hrotem a vzorkem.
- typická vzdálenost hrotu a vzorku 4-7Å
- lze dosáhnout atomárního rozlišení, ~1Å
- hroty typicky z wolframu nebo iridia zpeciálně zašpičatěné do stavu, kdy na konci je ideálně jen jeden atom
- Nobelova cena 1986

Skenovací tunelovací mikroskopie (STM)

Fig. VI.4 STM relief of the (7×7) reconstructed Si(111) surface [VI.8]. The large unit mesh is discernible by the deep corner minima. The two halves of the unit mesh are not equivalent as evidenced by the different intensities of the minima and maxima



manipulace s atomy pomocí STM

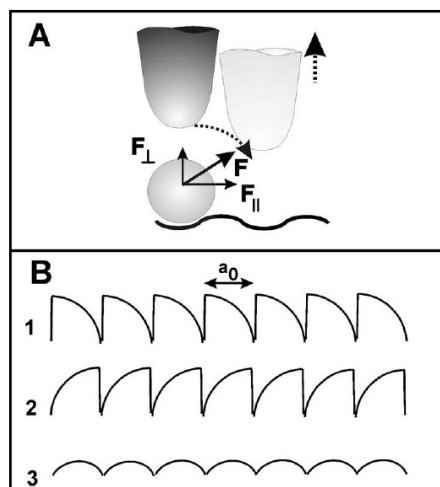
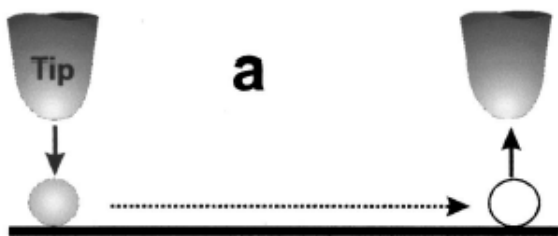
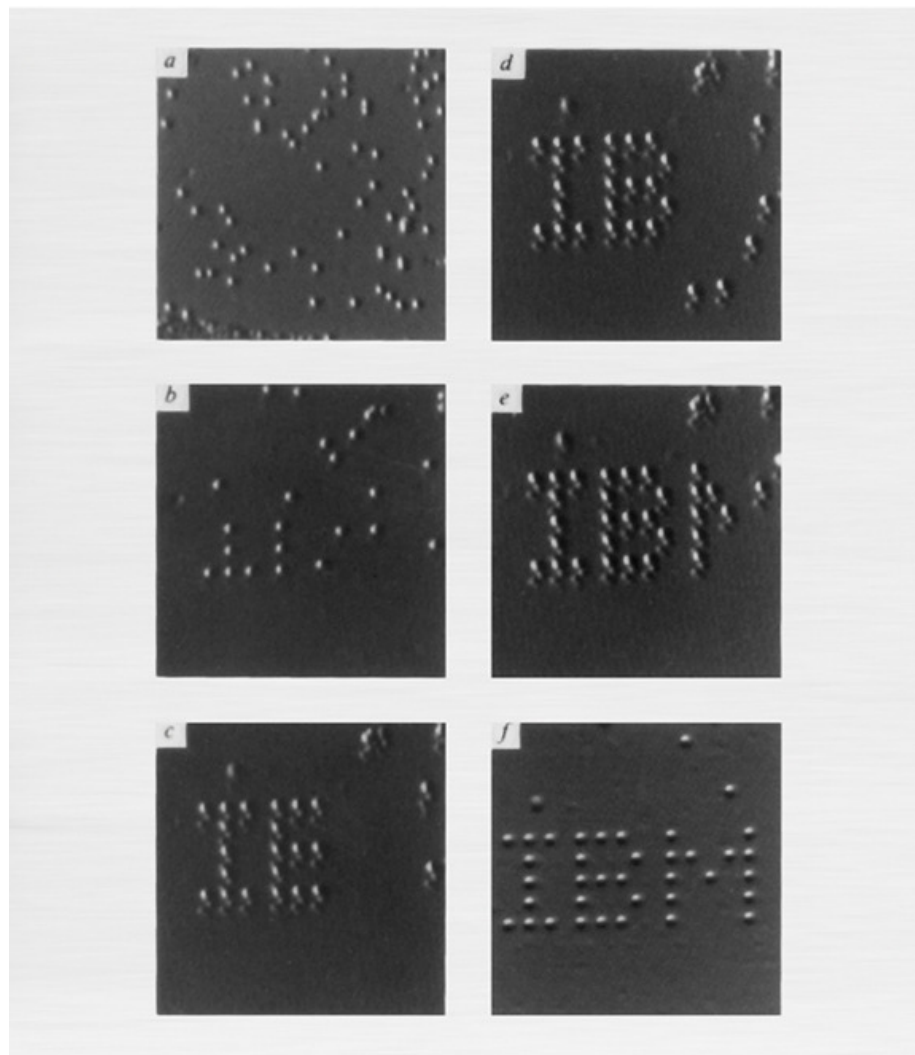


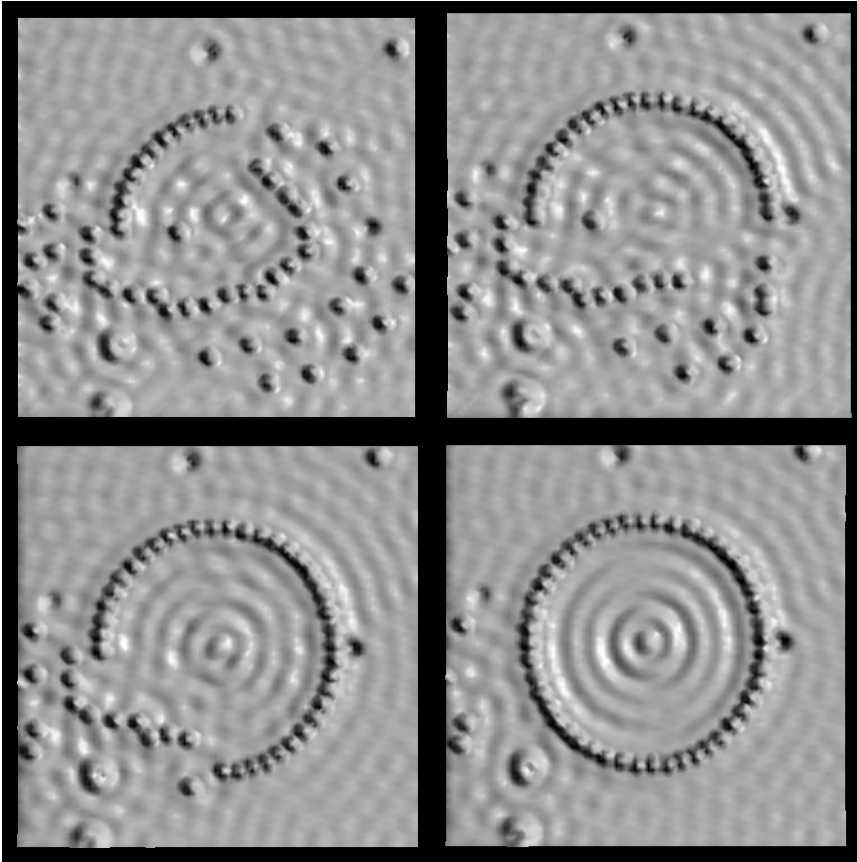
FIG. 5. (a) Demonstration of the vertical and parallel force components involved in LM. (b) STM tip-height manipulation curves correspond to (1) pulling, (2) pushing, and (c) sliding modes.



35 Xe atomů na Ni povrchu

Eigler, D. M. & Schweizer, E. K. *Nature* **344**, 524–526 (1990).

Friedelovy oscilace pozorované s STM



- opět IBM, Fe on Cu (111)
- Friedelovy oscilace elektronové hustoty vzniklé díky interferenci elektronů blízko Fermiho meze

měření hustoty stavů pomocí STM

derivace tunelovacího proudu je úměrná lokální hustotě stavů ρ

$$\frac{dI}{dV}(x, y, s, V) = A \exp\left(-\frac{s}{s_0}\right) \rho_s(x, y, eV)$$

s ... vzdálenost hrotu a vzorku

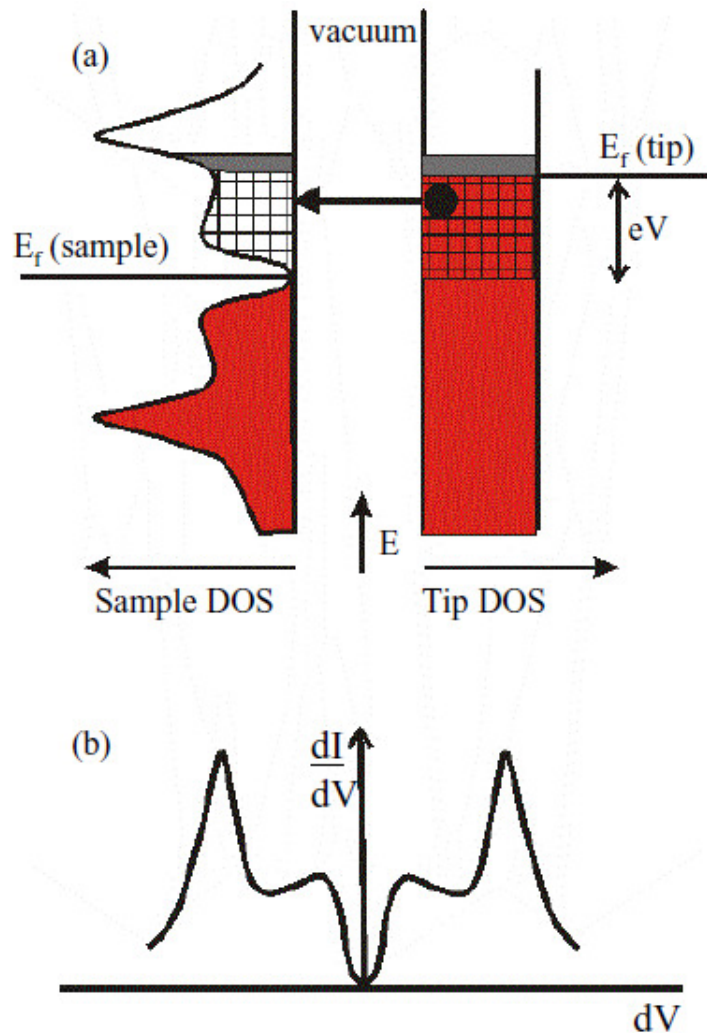
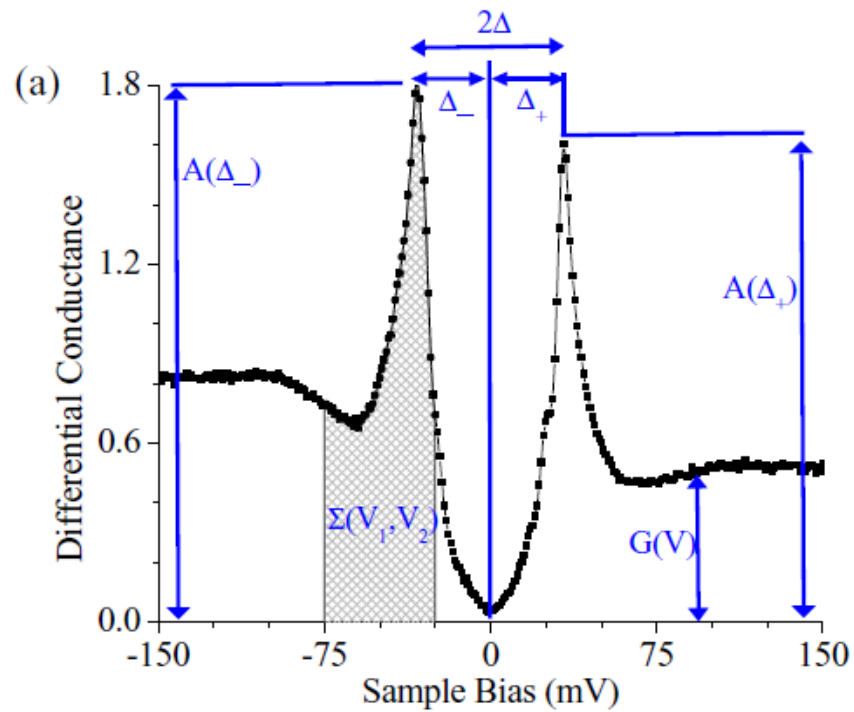


Figure 1.11: Technique for making a direct measurement of dI/dV .
 (a) Diagram indicating how to make a direct measurement of dI/dV . The black outlines indicate the density of states. Filled states are given in red. The total current which flows depends on the product of the hatched areas. When the bias is modulated by an amount given by the height of a gray shaded area, a modulated current signal is detected which is proportional to the product of the two gray shaded areas. Given knowledge of the magnitude of the bias modulation and the assumption that the tip LDOS is constant, the sample LDOS may then be determined from this measurement of the modulated current signal. (b) Shows the resulting plot of dI/dV vs. V which can be generated from such a direct measurement of differential conductance.

měření hustoty stavů pomocí STM



- supravodivá mezera v derivaci proudu v supravodiči $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+x}$

Optická spektroskopie

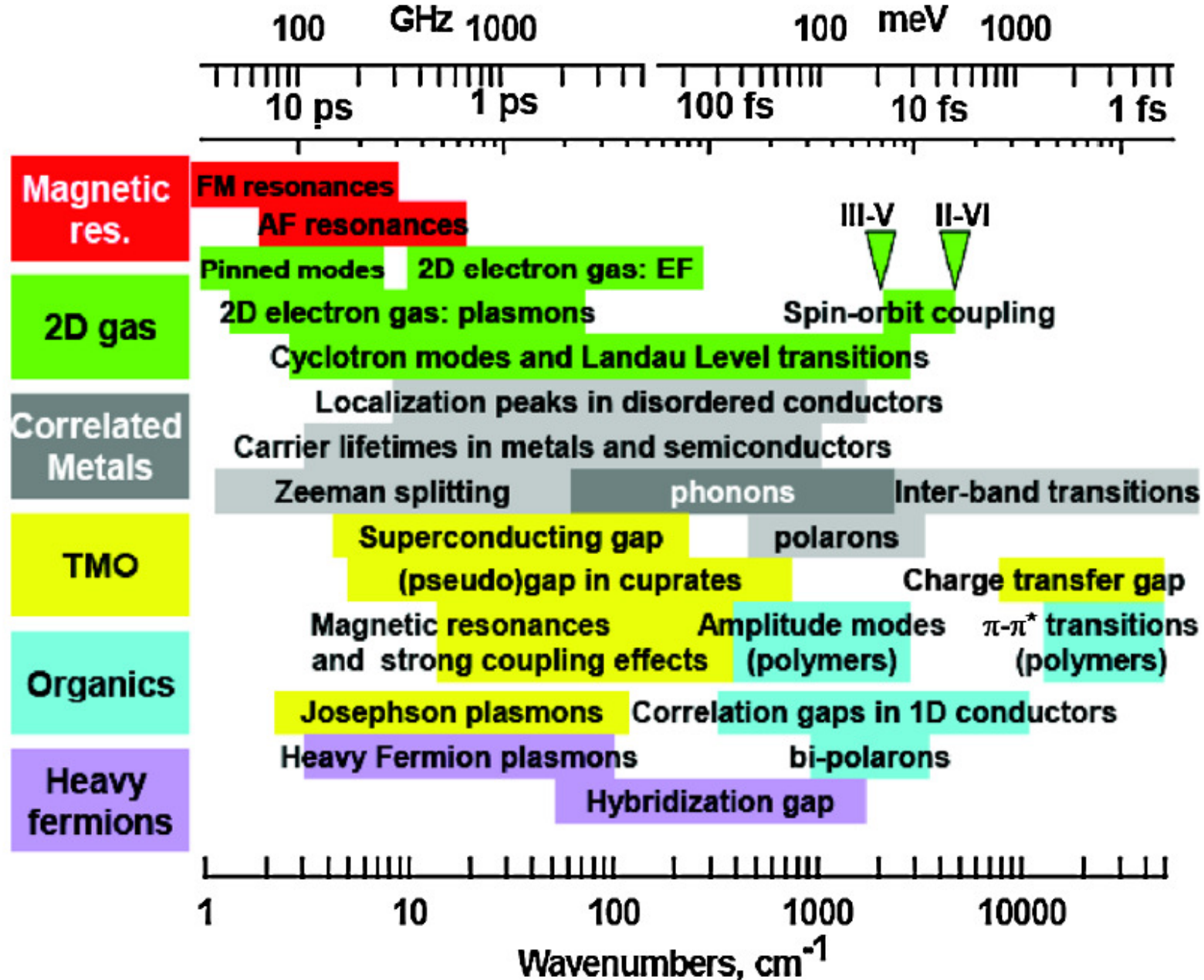
Optická spektroskopie

určení optické vodivosti $\sigma(\omega) = -i\omega\epsilon_0(\epsilon(\omega) - 1)$

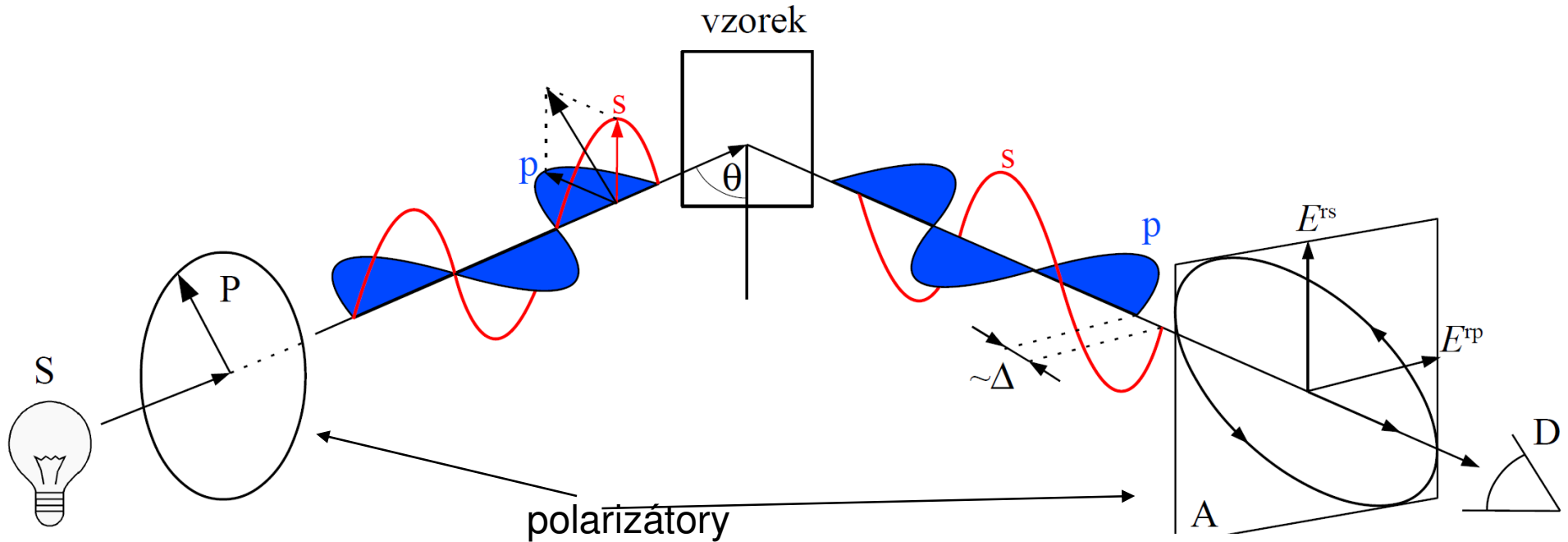
reálná část vodivosti - absorpce
elmag. vlny na jednotku frekvence: $\sigma_1(\omega) \quad (= \omega\epsilon_0\epsilon_2(\omega))$

sumační pravidlo: $\int_0^\infty \sigma_1(\omega) d\omega = \frac{\pi}{2} \frac{nq^2}{\epsilon_0 m} = \text{const.}$

Excitace mezi THz a UV oborem



Princip elipsometrie



- Elipsometrie je de facto interferenční experiment s komponentou elektrického pole rovnoběžnou (p) a kolmou (s) k rovině dopadu.

Měřené veličiny v elipsometrii:

- úhel pootočení elipsy Ψ
- elipticita Δ

\Rightarrow

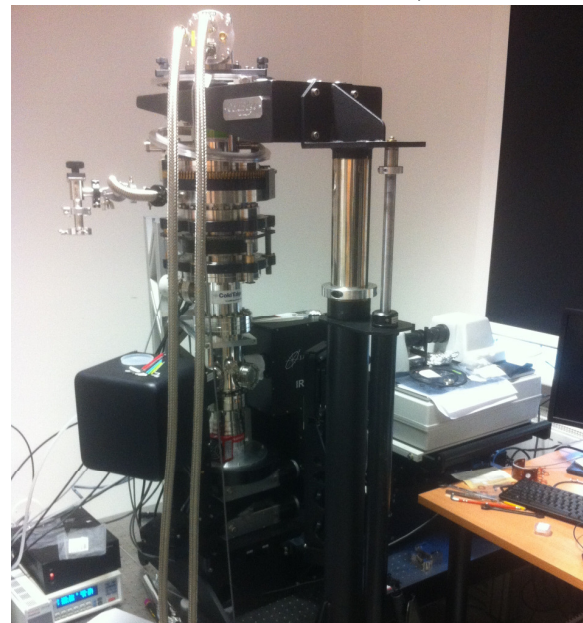
n, k nebo ϵ_1, ϵ_2
bez dalších předpokladů

optické spektroskopické vybavení v CEITECu

Woollam VASE , rozsah NIR-UV ,

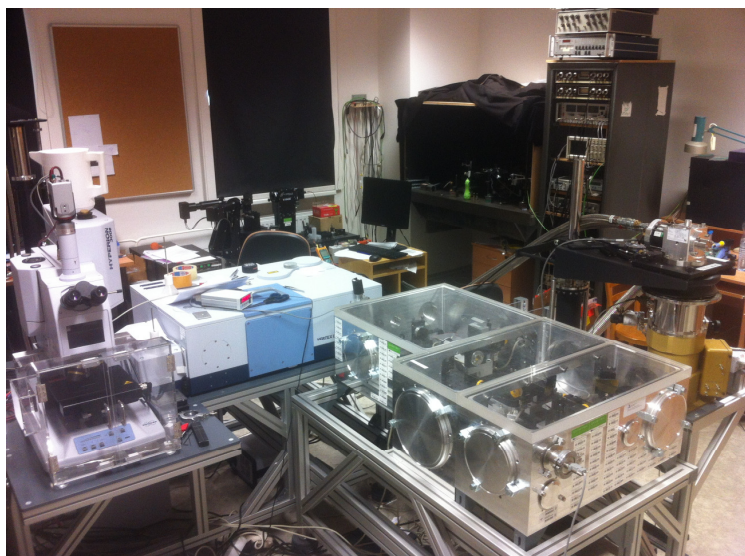


Woollam IR-VASE, rozsah střední IČ



+ kryostat
4-390 K

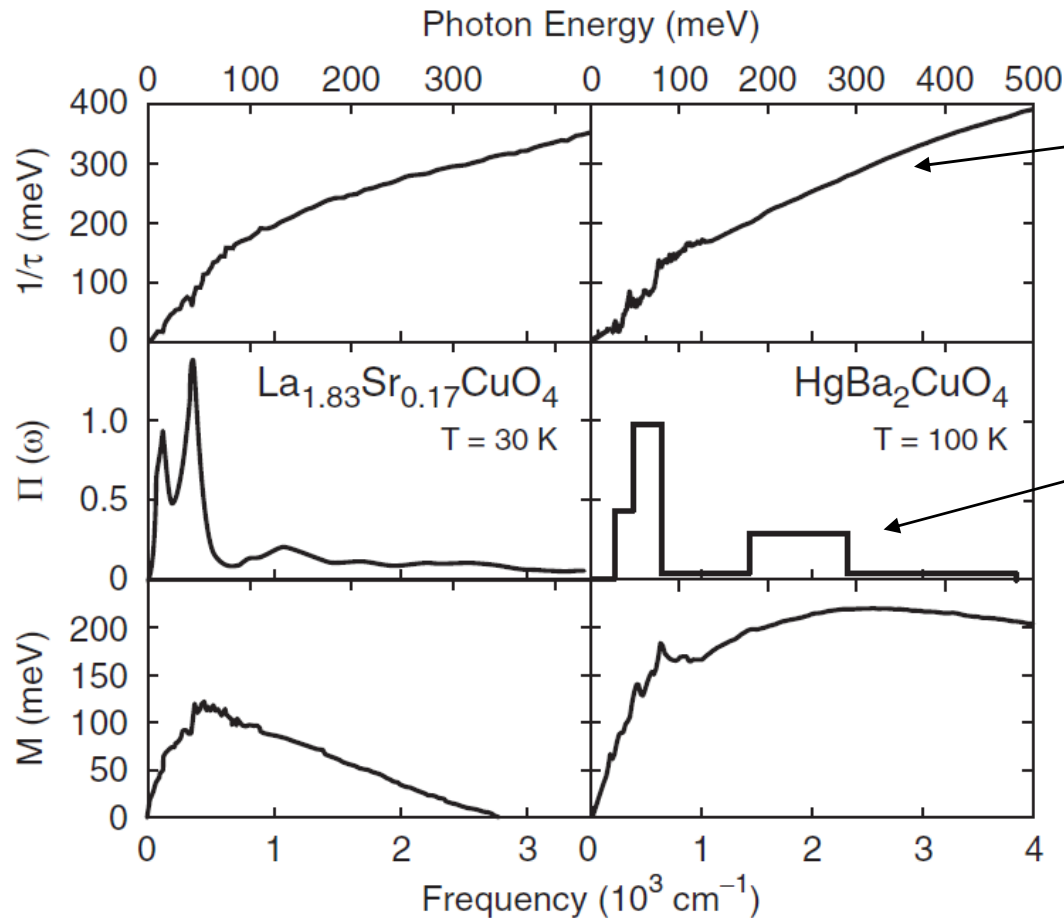
IR spectrometer Vertex 80+micro+elli



elipsometr do vzdálené IČ



určení interakce mezi elektrony ve vysokoteplotních supravodičích

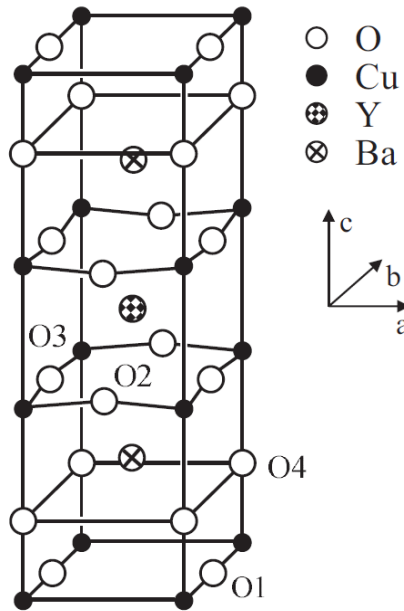


frekvenčně závislé $\tau(\omega)$ značí interakci mezi elektrony

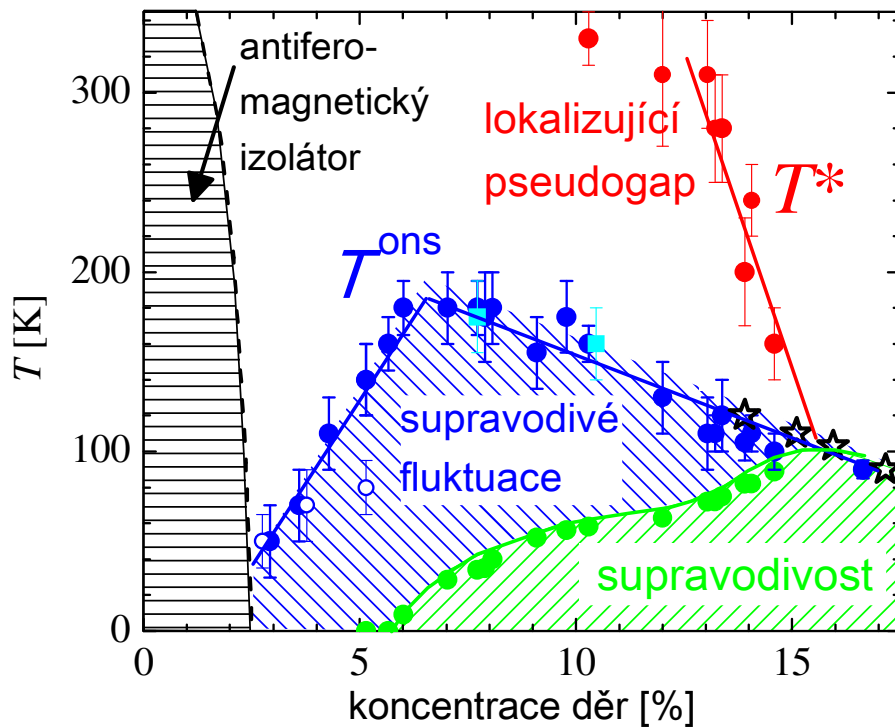
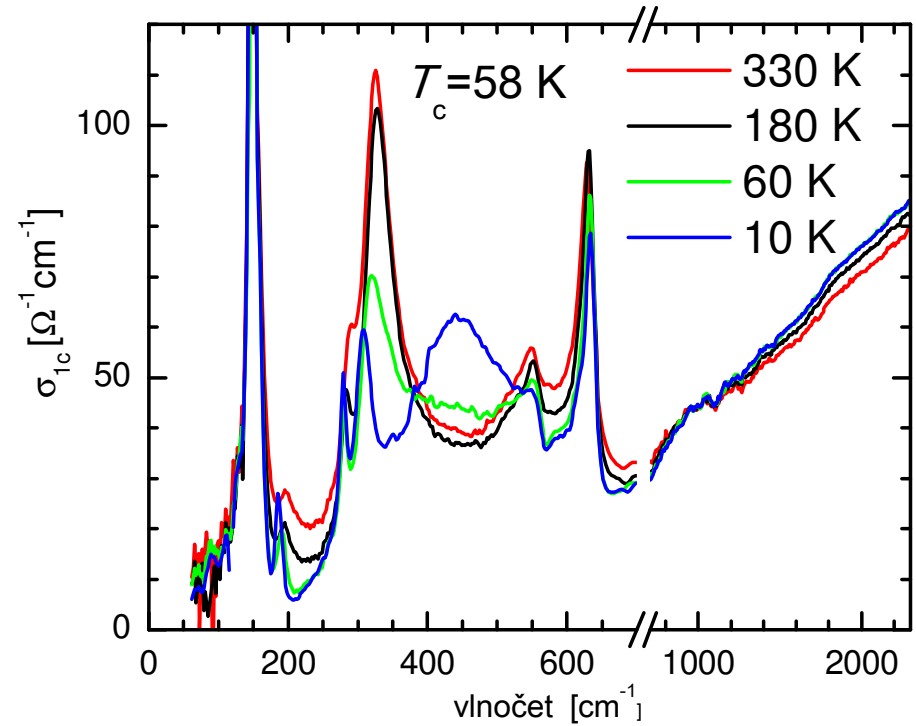
- frekvenčně závislé interakční funkce (glue-lepidlo) odvozená z dat.
- Její složka na vysokých energiích 250 meV značí, že glue nemůže být pouze díky fononům.
- na základě tohoto glue byla vypočtena kritická supravodivost ~ 200 K

FIG. 13. Comparison at $T \approx T_c$ of the imaginary part [$1/\tau(\omega)$] and the real part [$M(\omega)$] of the optical self-energy, and the electron-boson coupling functions of $\text{La}_{1.83}\text{Sr}_{0.17}\text{CuO}_4$ ($T_c = 31$ K) (Hwang *et al.*, 2008) and $\text{HgBa}_2\text{CuO}_4$ ($T_c = 97$ K). From van Heumen, Muhlethaler *et al.*, 2009.

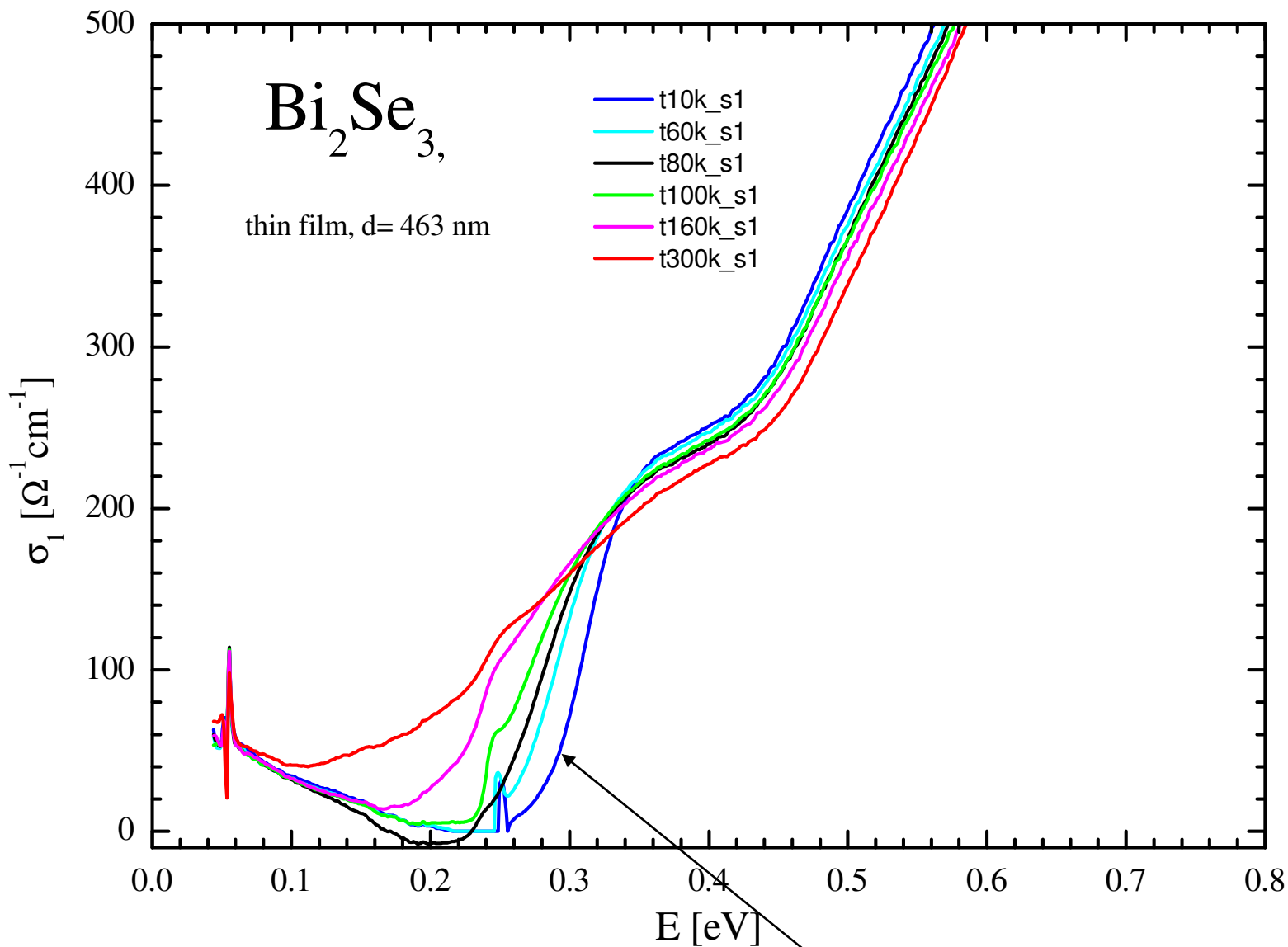
supravodivé fluktuační teploty ve $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-d}$



ritická
teplota
v uprátech
max



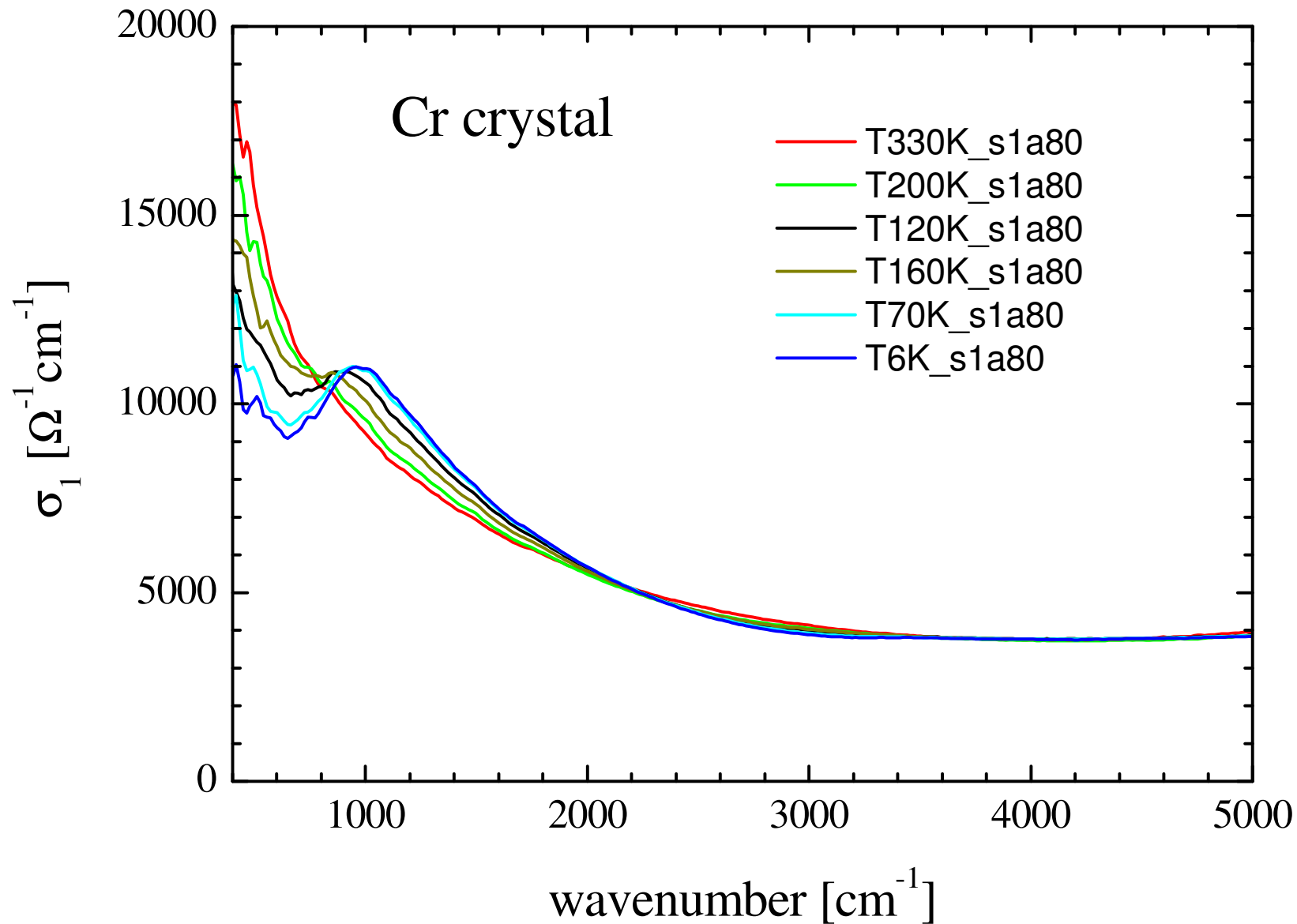
absorpční hrana v topologickém izolátoru Bi₂Se₃



veliká závislost na teplotě

mezipásový přechod

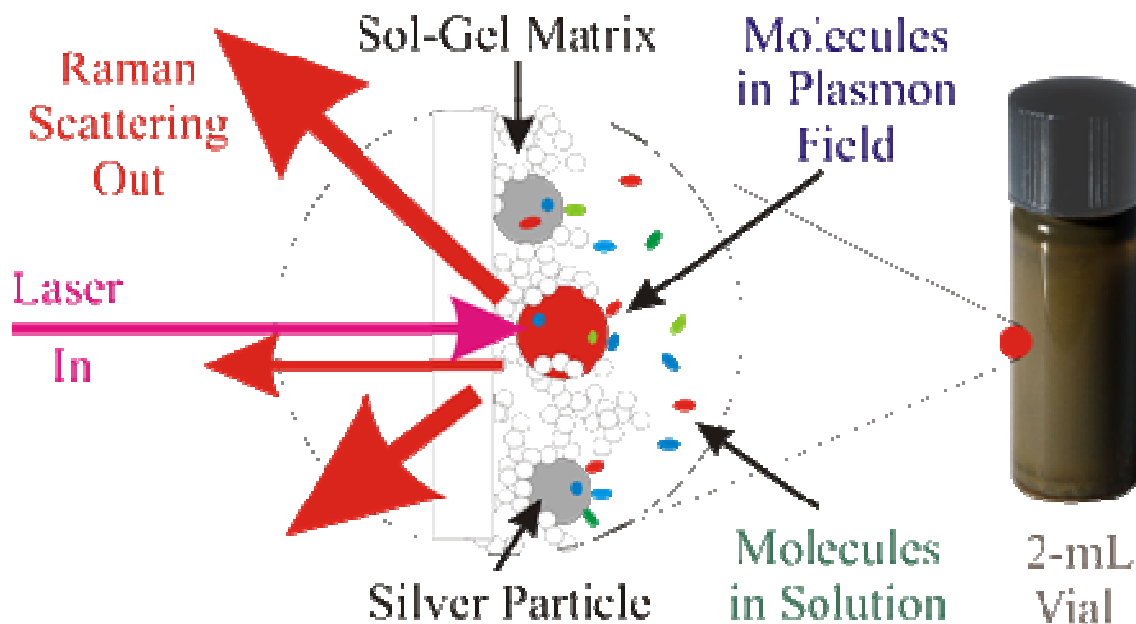
vlna spinové hustoty v krystalu chromu, $T_c=310$ K



TERS – tip enhanced raman spectroscopy

SERS (surface enhanced Raman spectroscopy)

- Ramanský signál může být zesílen o mnoho řádů (až 10^7 i vyšší) když je detekovaný materiál v blízkosti strukturovaného kovového materiálu. Typicky se používá buď drsná kovová podložka nebo nanokuličky (zlato, stříbro).
- Světlo vybudí v kovu povrchový plazmon který na rezonanční frekvenci řádově zesílí pole a tedy i ramanský signál.



TERS – tip enhanced raman spectroscopy

kombinace Ramanského spektrometru s AFM: řádové zesílení ramanského signálu mezi pozlaceným hrotem AFM a kovovou podložkou -

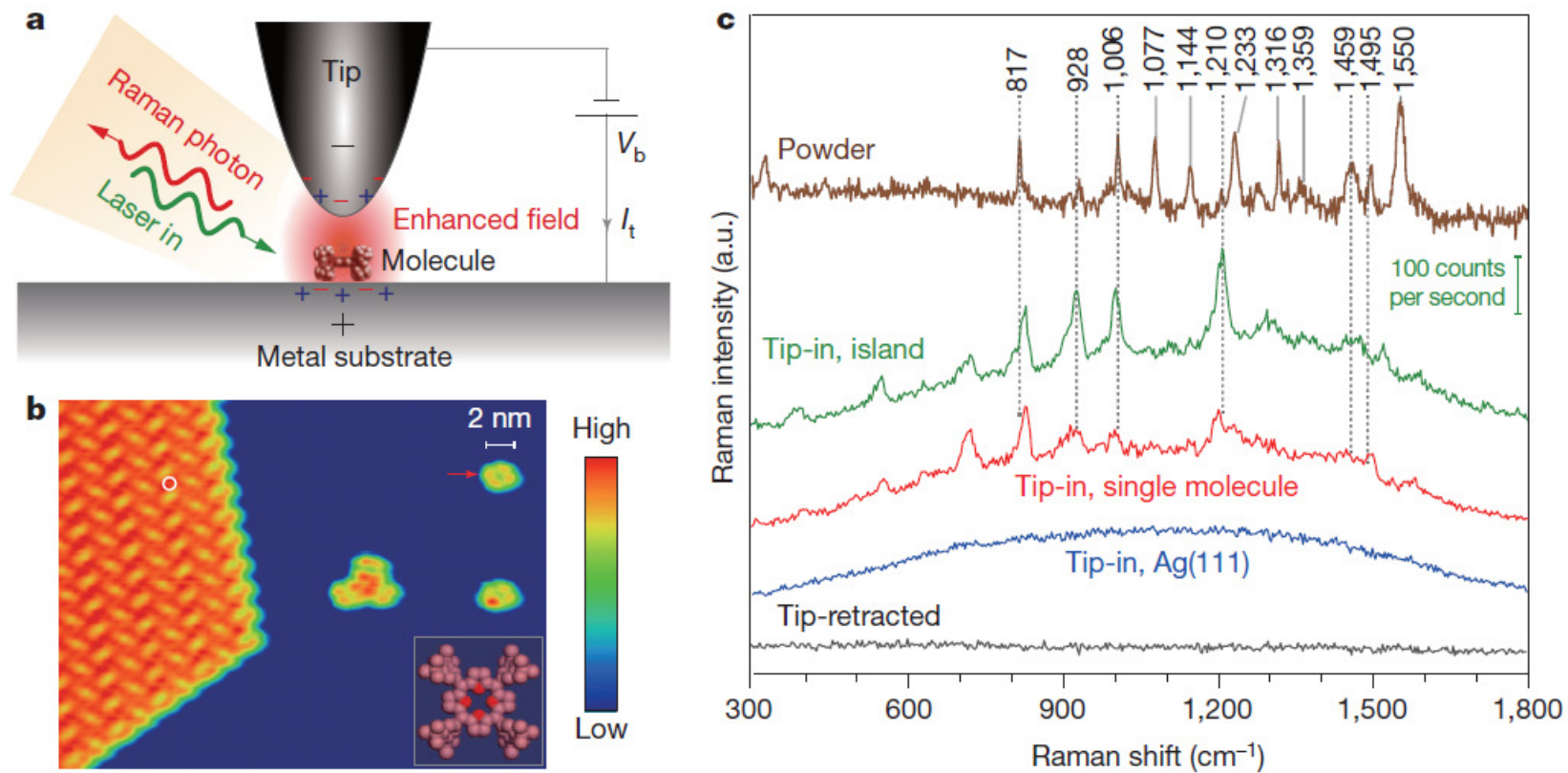


Figure 1 | Clean TERS spectra using well-defined tip and sample.

a, Schematic tunnelling-controlled TERS in a confocal-type side-illumination configuration, in which V_b is the sample bias and I_t is the tunnelling current. b, STM topograph of sub-monolayered H_2TBPP molecules on $Ag(111)$ (1.5 V, 30 pA, $35 \text{ nm} \times 27 \text{ nm}$). The inset shows the chemical structure of H_2TBPP and the white circle indicates one representative site for TERS measurements on the molecular islands. c, TERS spectra for different conditions. The tip-in spectra were acquired at 120 mV, 0.5 nA and 3 s. The green spectrum is taken on top of

the molecular island (the green scale bar shows the signal level detected by charge-coupled device (CCD)). The red spectrum is taken on top of a single molecule (marked by the red arrow in b). The blue spectrum is taken on bare $Ag(111)$. The black spectrum is taken on top of the molecular island but with the tip retracted 5 nm from the surface (120 mV, 3 s). For comparison, a standard Raman spectrum (brown) is shown on the top for a powder sample of H_2TBPP molecules.

R. Zhang et al. , Nature (2013)

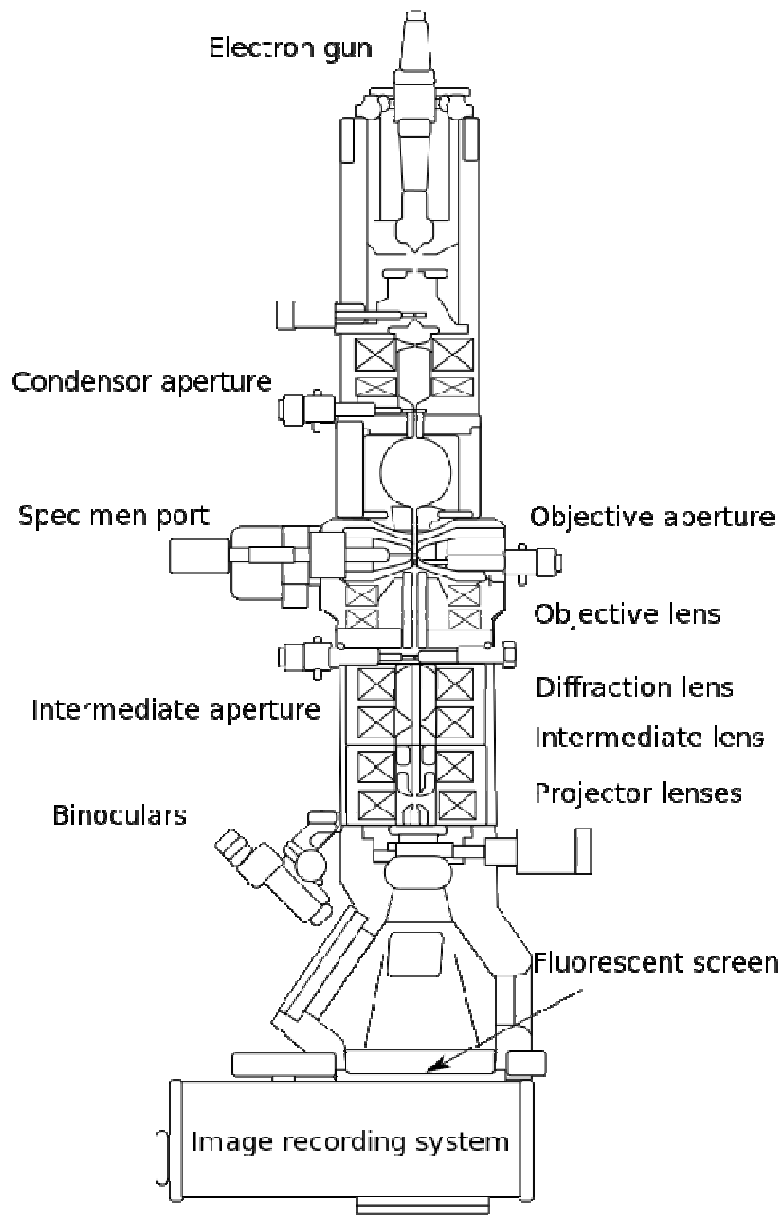
TERS – tip enhanced raman spectroscopy



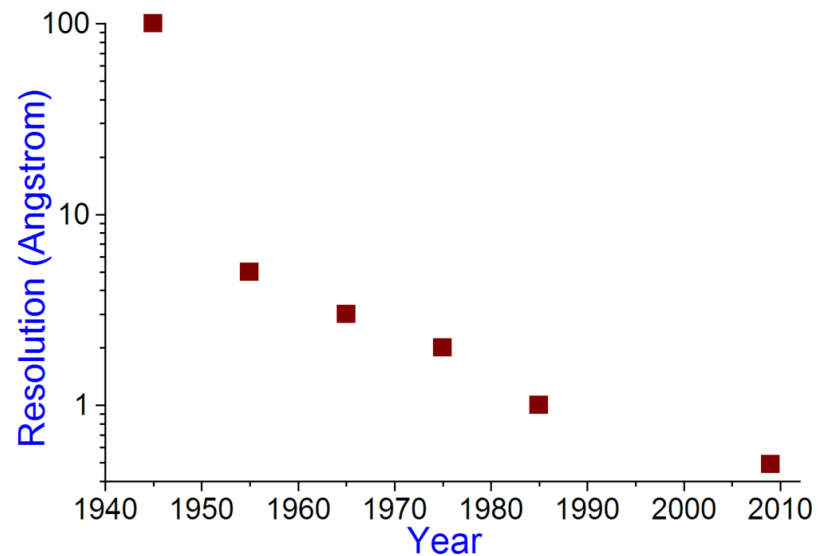
zařízení potenciálně pro TERS od firmy NTMDT na CEITECu (UFKL)

transmisní elektronový mikroskop (TEM)

transmisní elektronový mikroskop (TEM)

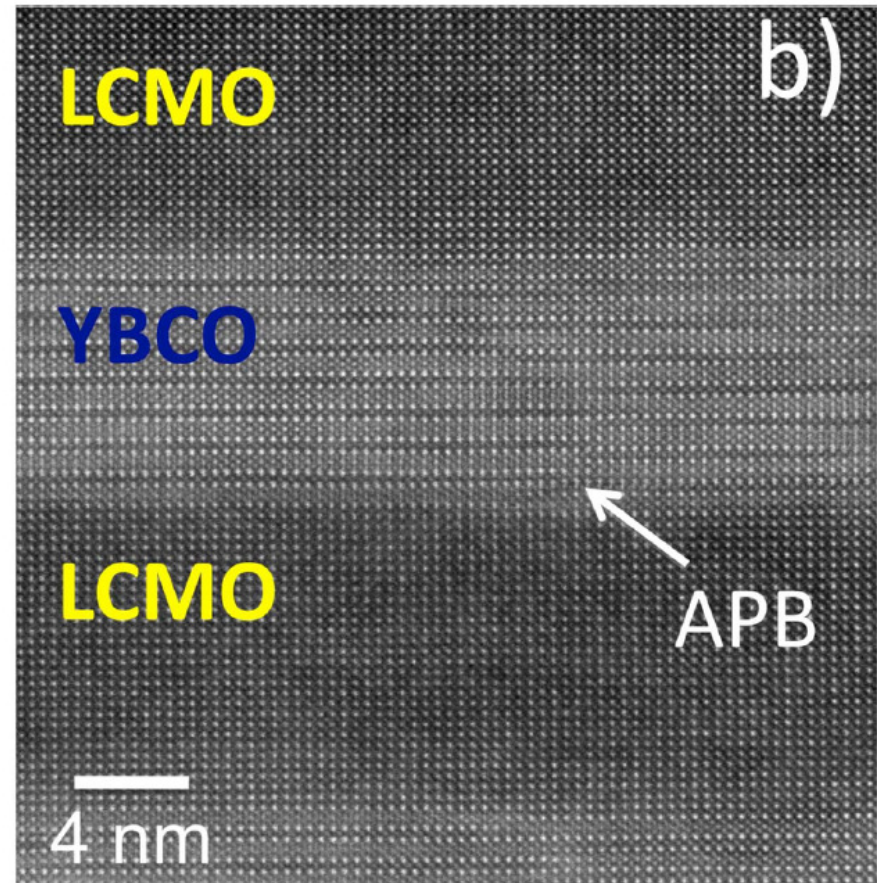
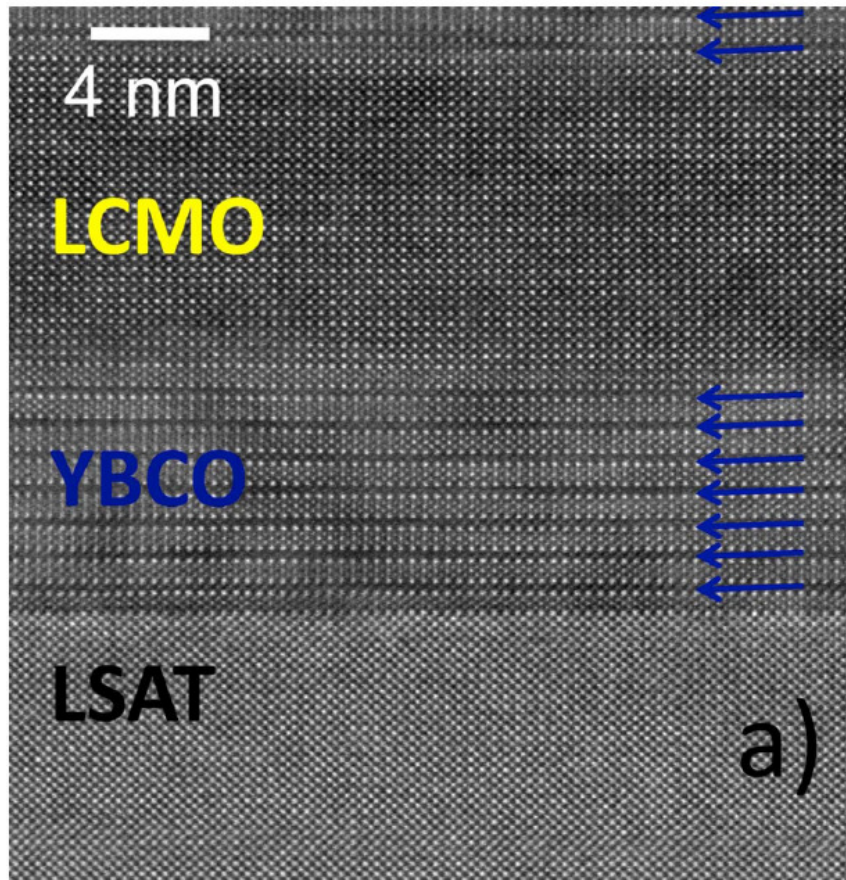


- průchod svazku elektronů vzorkem, dopad na luminiscenční stínítko a detekce pomocí CCD
- vzorky maximálně několik set nm tlusté - náročná příprava
- možné atomové rozlišení
- cena instrumentu s atomovým rozlišením ~ 100 MKč
- v Brně tři světoznámí producenti: Tescan, FEI, Delong Instruments



multivrstvy $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7(n)/\text{La}_{0.7}\text{Ca}_{0.3}\text{MnO}_3(m)$

snímek z transmisního elektronového mikroskopu – atomární rozlišení



snímek z transmisního elektronového mikroskopu – atomární rozlišení

Fig. 3.32 High-resolution TEM of an AlAs/GaAs double heterostructure. The dark and bright points are correlated with single rows of atoms [3.28]



SIMS – secondary ion mass spectroscopy

SIMS – Hmotnostní spektroskopie sekundárních iontů

- odprašování vzorku a následná hmotnostní spektroskopie
- analýza složení látek, hloubkový profil
- velmi citlivá metoda, citlivost až 1ppm i 1ppb
- destruktivní metoda

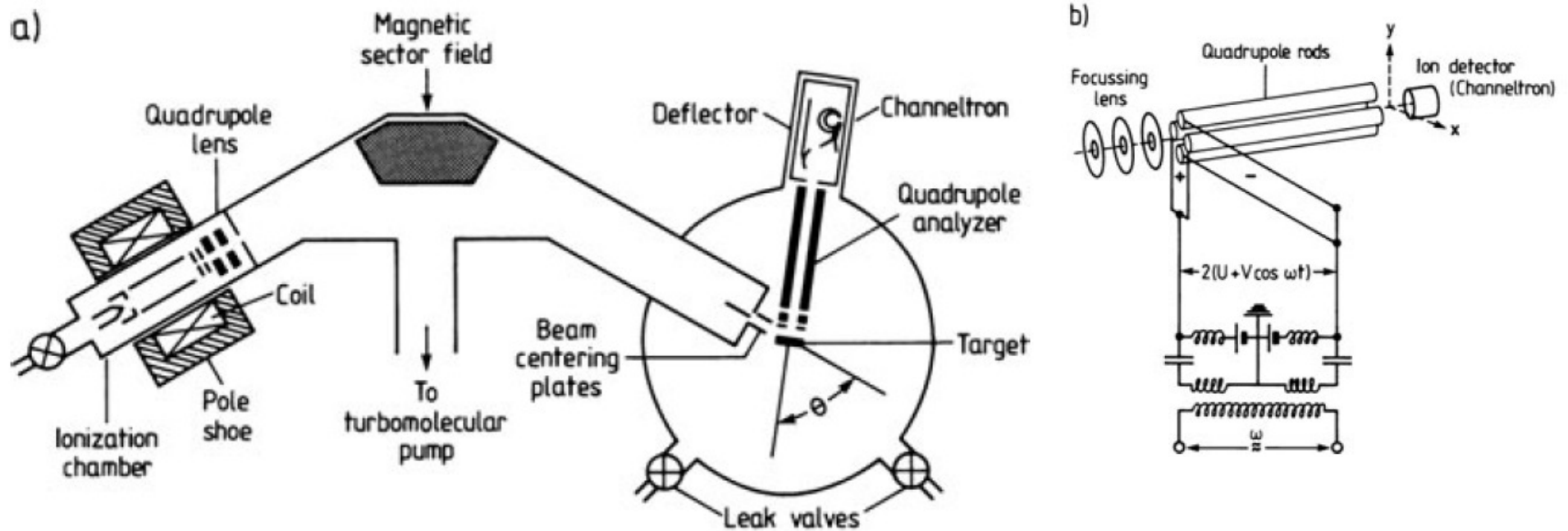
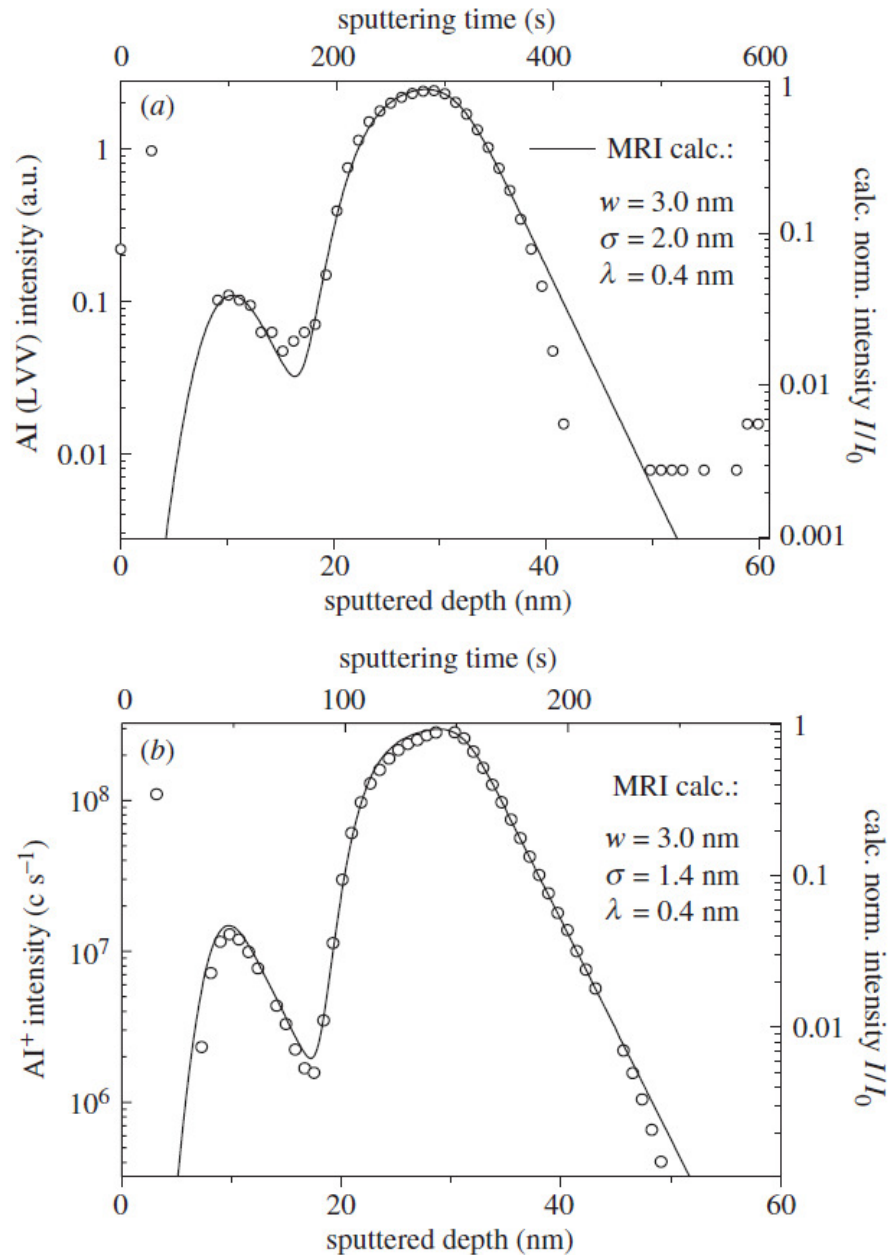


Fig. IV.1 a,b Schematic view of the experimental set-up for Secondary Ion Mass Spectroscopy (SIMS). (a) General overview of the whole apparatus. The main components are: ion source consisting of ionization chamber and lens system, magnetic mass separator (sector field analyzer), sample contained in UHV chamber, quadrupole mass analyzer with channeltron as detector. (b) Components of a Quadrupole Mass Spectrometer (QMS)



SIMS – analýza odprášeného materiálu

AES – Auger electron spectroscopy - analýza odprášeného povrchu

Figure 2. (a) AES (Al(LVV) intensity) and (b) SIMS (Al^+ intensity) depth profile of a double layer structure of AlAs (1 and 20 monolayers) in GaAs obtained with 3 keV Ar^+ ions at (a) 52° and (b) 58° incidence angles (open circles), and fitted by MRI calculation (solid line) with the parameters shown in the figure. (Adapted from Hofmann *et al.* (2001).)