

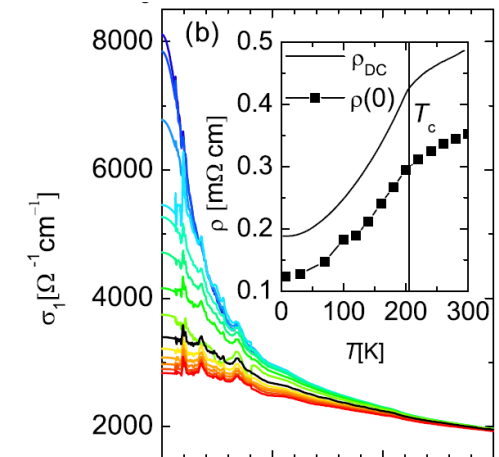
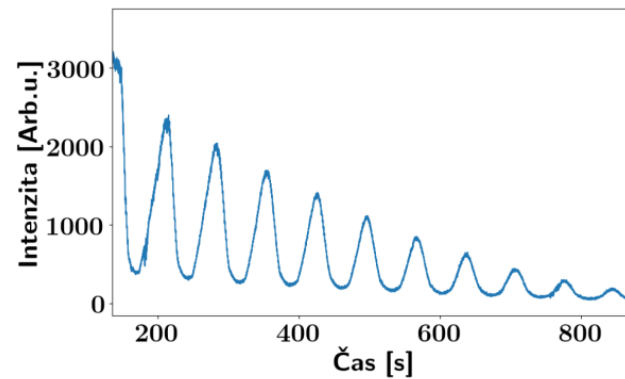
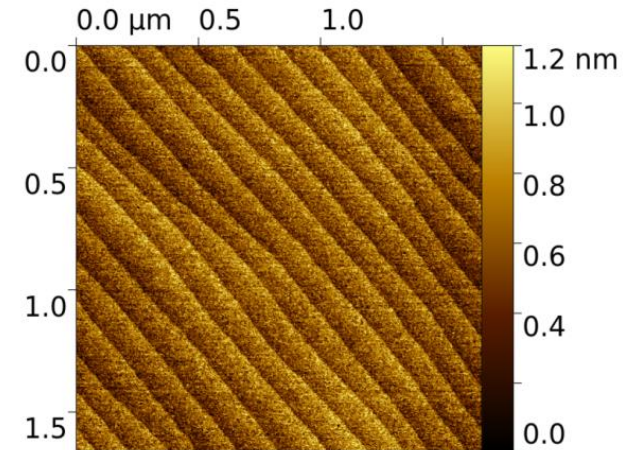
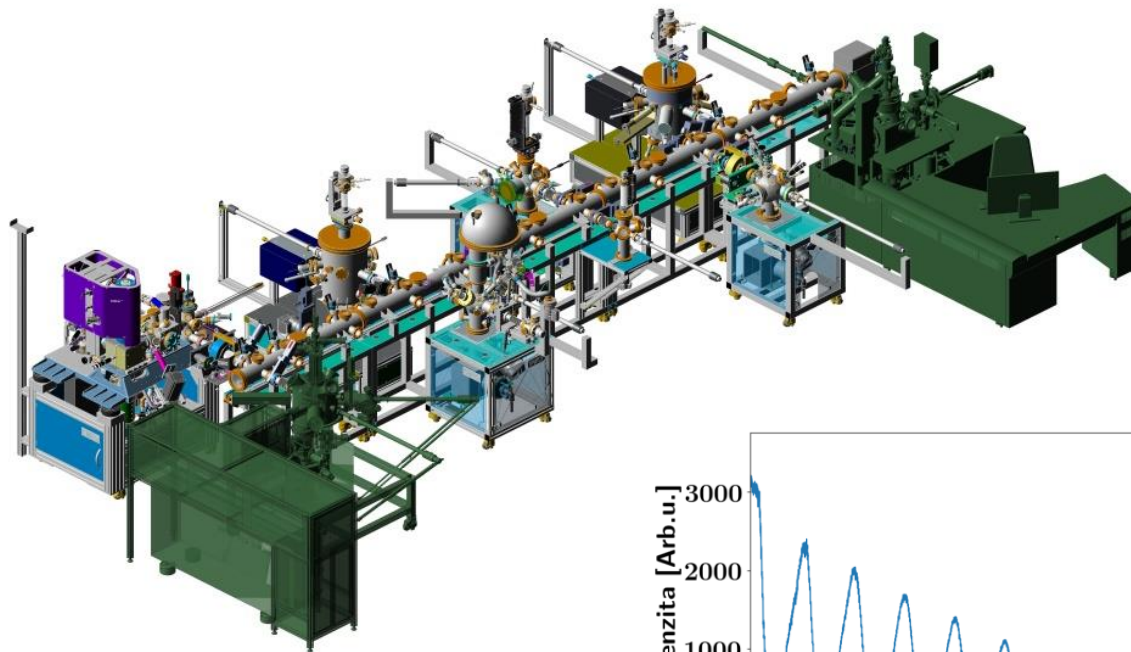
Výzkumné centrum CEITEC a magnetické vrstvy a supermřížky

A. Dubroka, dubroka@physics.muni.cz

Ústav fyziky kondenzovaných látek

Přírodovědecká fakulta, Kotlářská 2

Masarykova univerzita

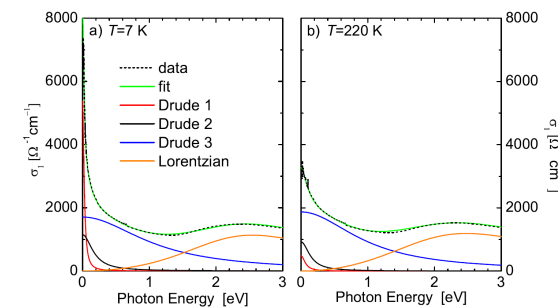
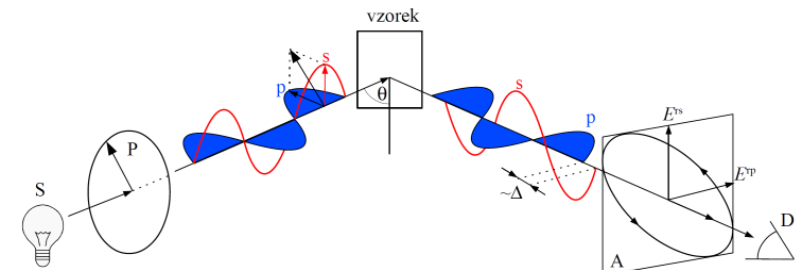
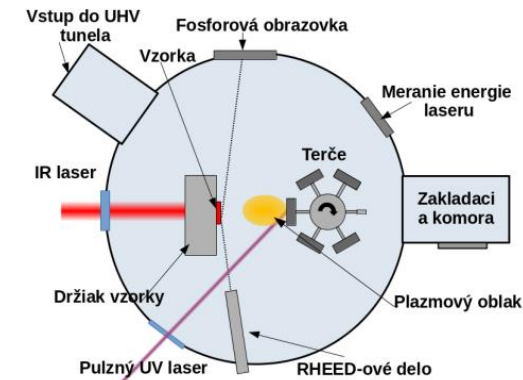


MUNI

CEITEC

Osnova přednášky

- výzkumné centrum CEITEC a přehled jeho vybavení
- princip pulsní laserové depozice a růst SrTiO₃-LaFeO₃ supermřížek
- princip spektroskopické elipsometrie
- výzkum elektronových vlastností feromagnetických vrstev La_{1-x}Sr_xCoO₃ pomocí elipsometrie



CEITEC - nové vědecké centrum v Brně zaštiťované VUT a MU

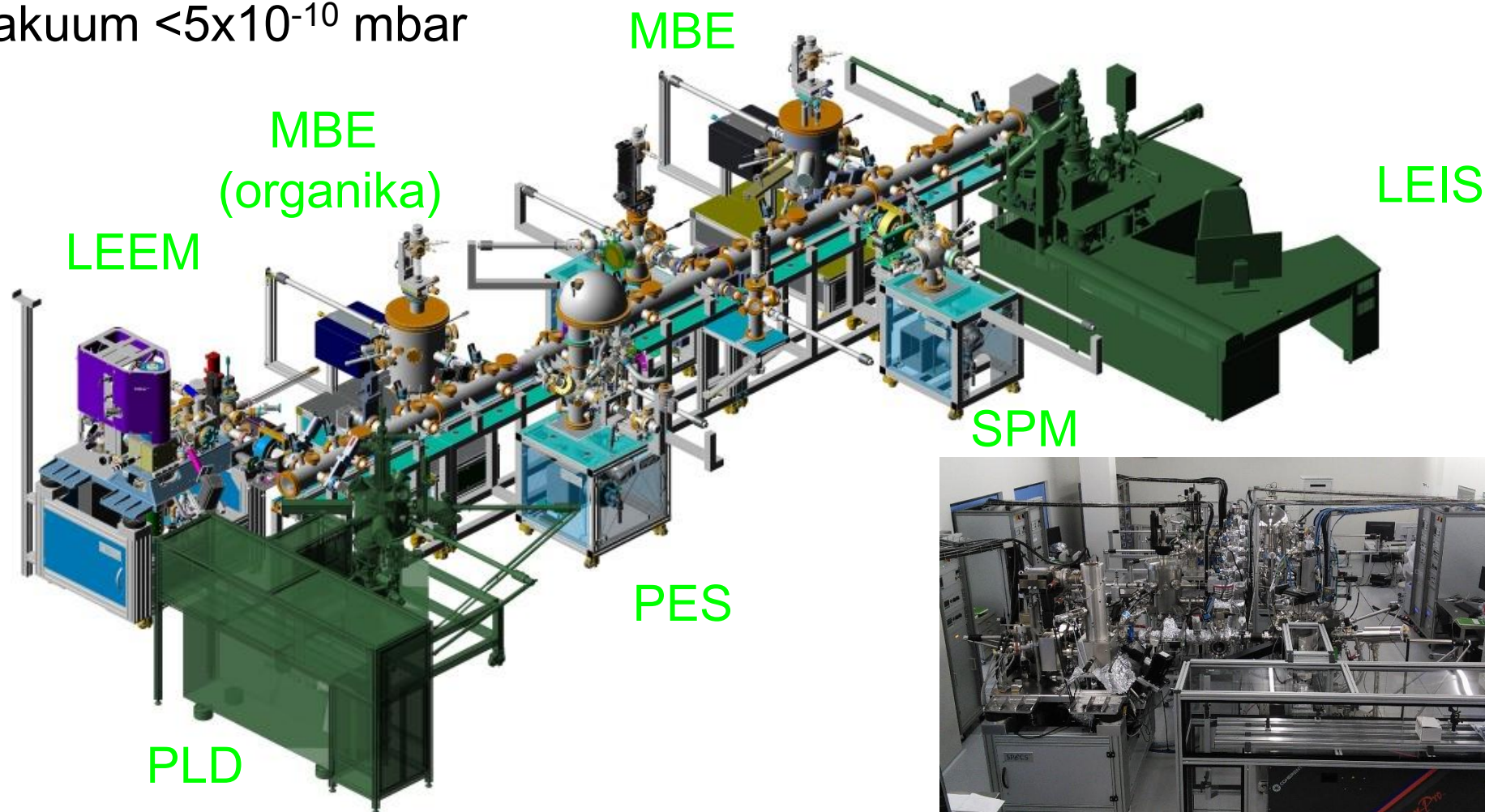


www.nano.ceitec.cz

- nové meziuniverzitní vědecké centrum v Brně, účast VUT a MU
- velké investice do vědecké infrastruktury díky EU (~ 2 mld. Kč)
- možnost přístupu studentů ke špičkovému vybavení a zapojení do výzkumu již od bakalářských prací

Depozice a analýza vzorků v ultravysokém vakuu (UHV klastr)

vakuum $<5 \times 10^{-10}$ mbar



depoziční přístroje:

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

analytické přístroje:

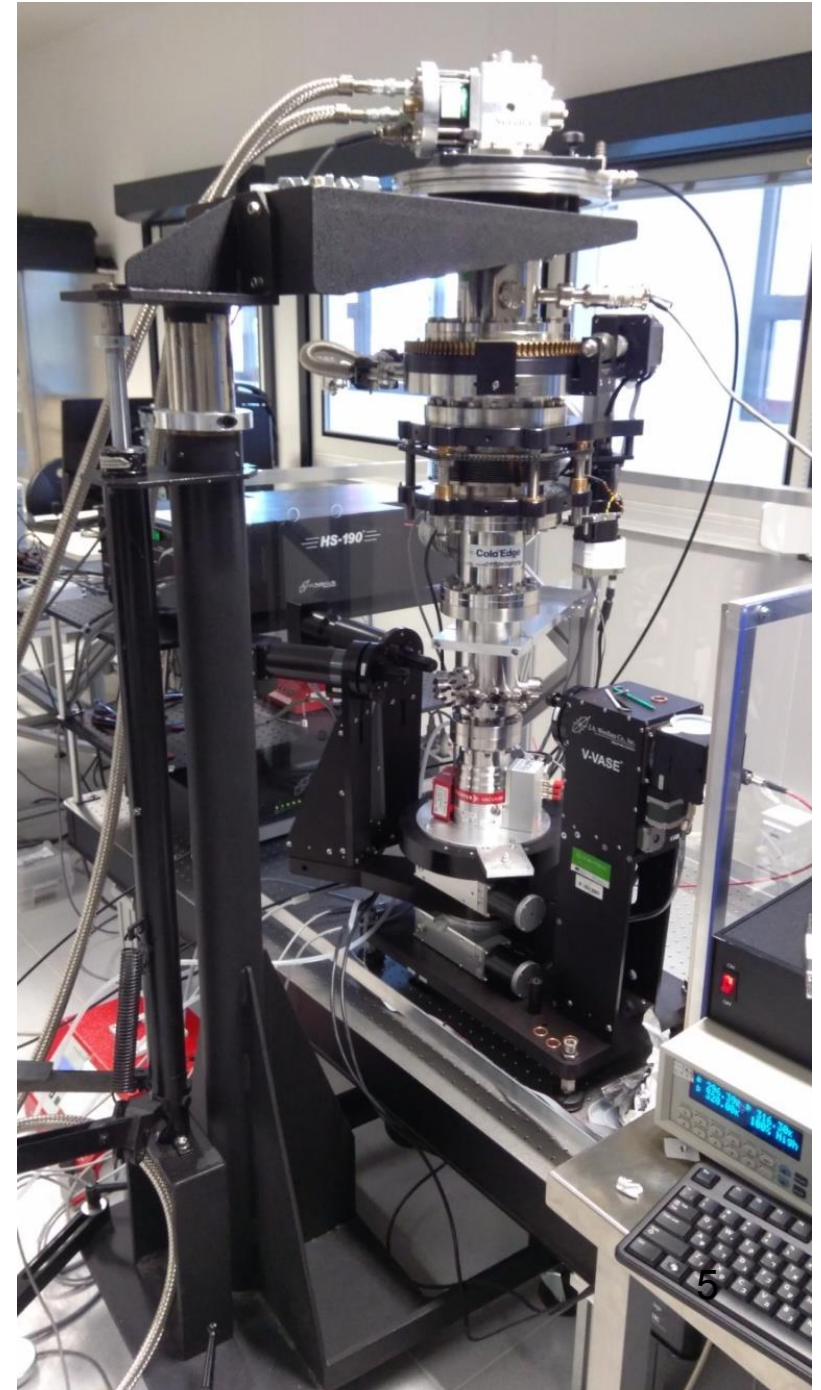
- PES fotoemisní spektroskopie: XPS, UPS
- skenovací mikroskop (SPM)
- elektronový mikroskop na nízkých energiích (LEEM)
- spektr. s ionty na nízkých energiích (LEIS)

Špičkové vybavení ve výzkumné infrastruktuře CEITEC nano

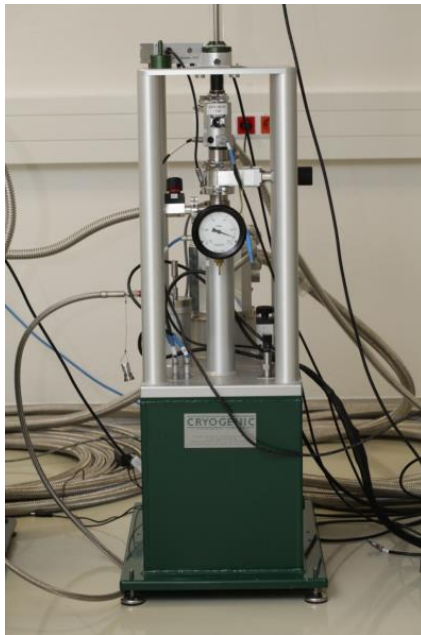
nízkoteplotní IČ elipsometrie (7- 400 K)



nízkoteplotní elipsometrie ve VIS-UV

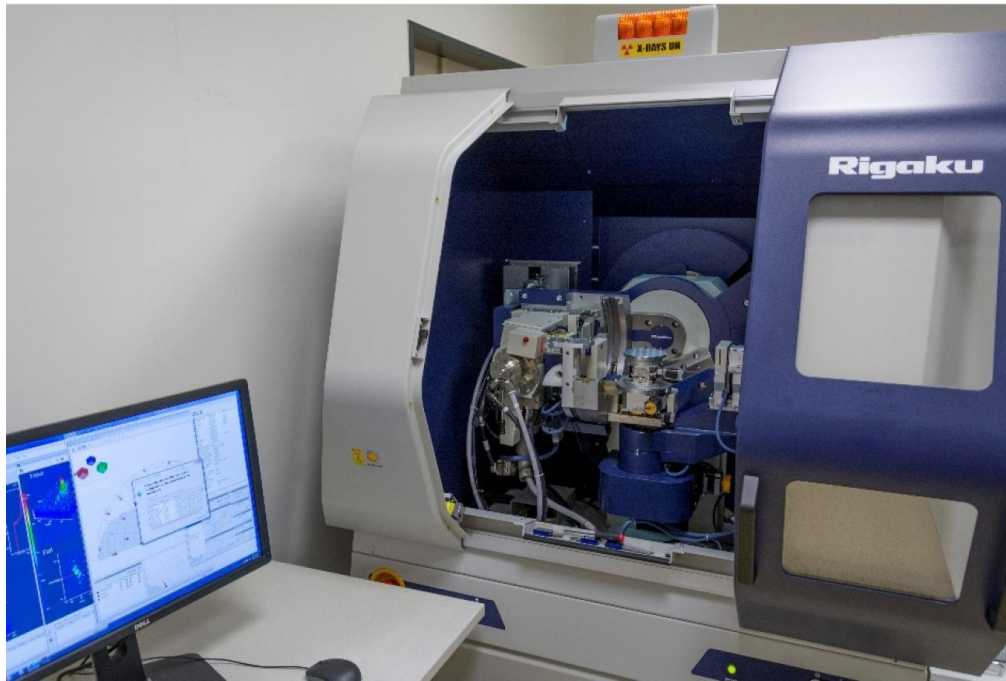


Magnetické a transportní měření
1.6 – 400 K, 9 T



Špičkové vybavení ve výzkumné infrastruktuře CEITEC nano

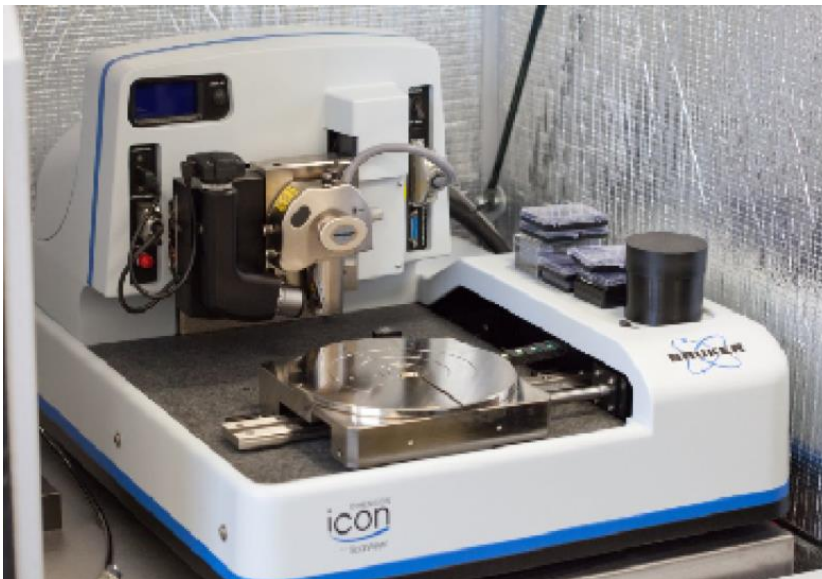
Rentgenová analýza (5-1400 K)



Transmisní elektronový mikroskop Titan



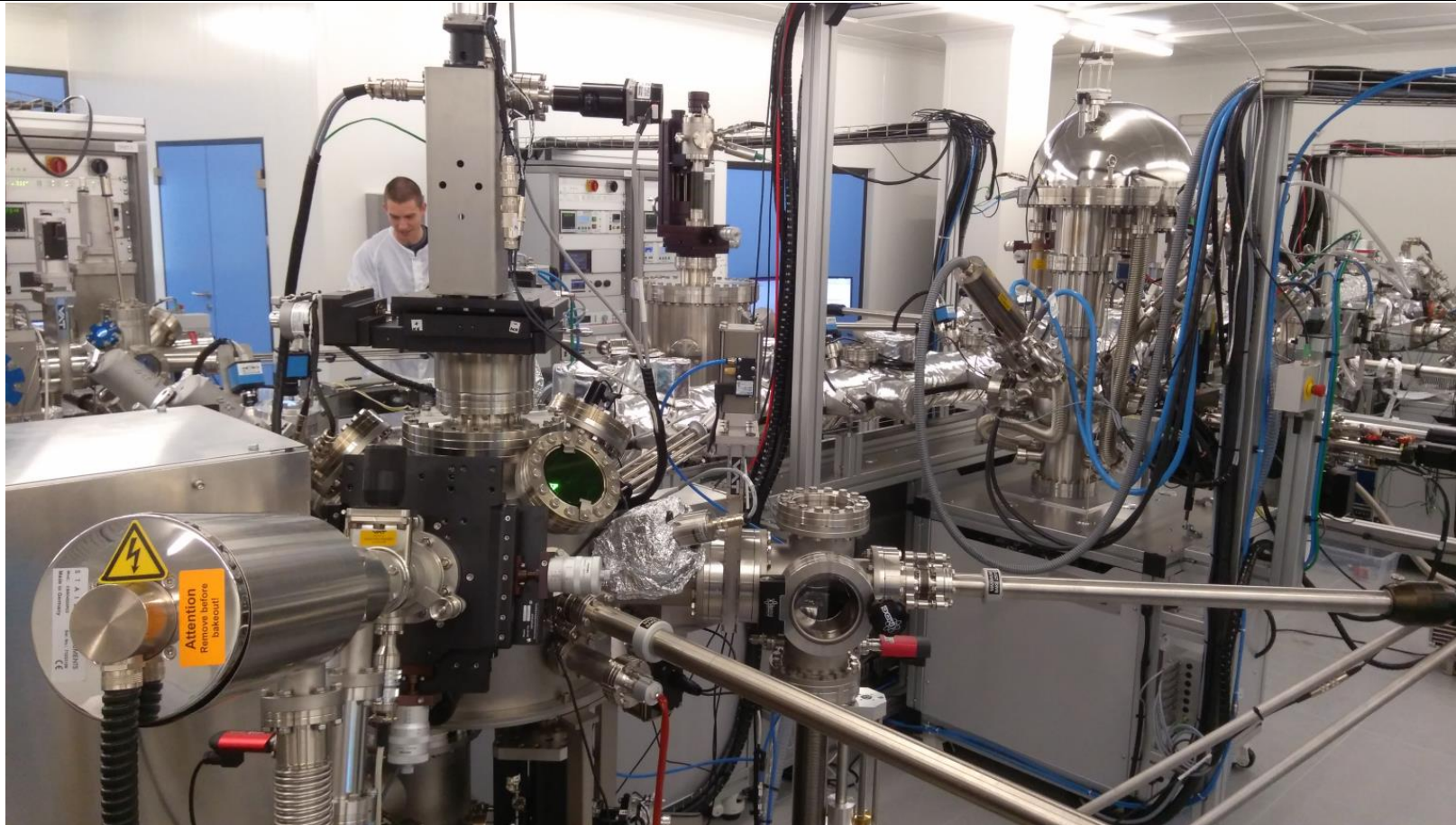
Mikroskopie - AFM



Elektronová a UV litografie

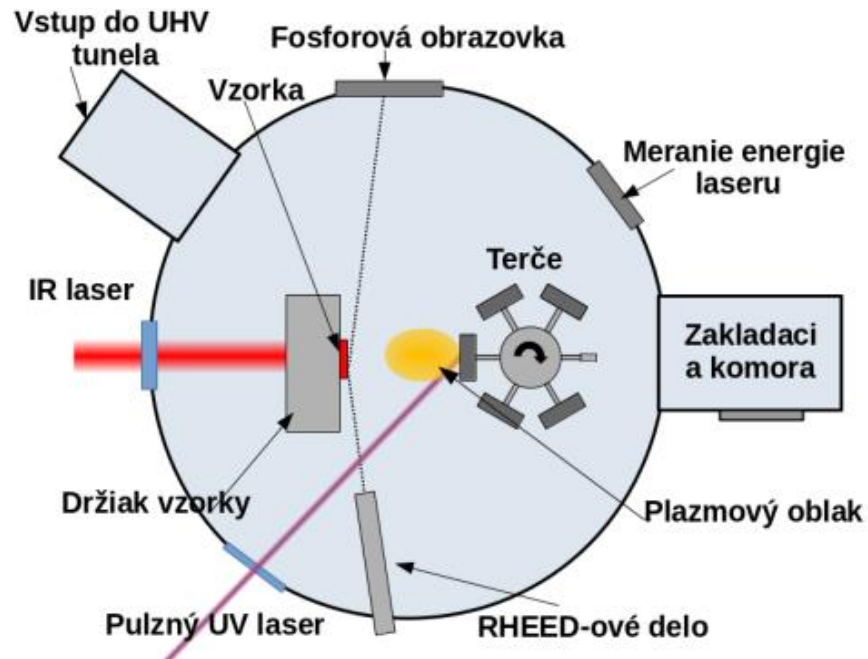


Pulsní laserová depozice (PLD)

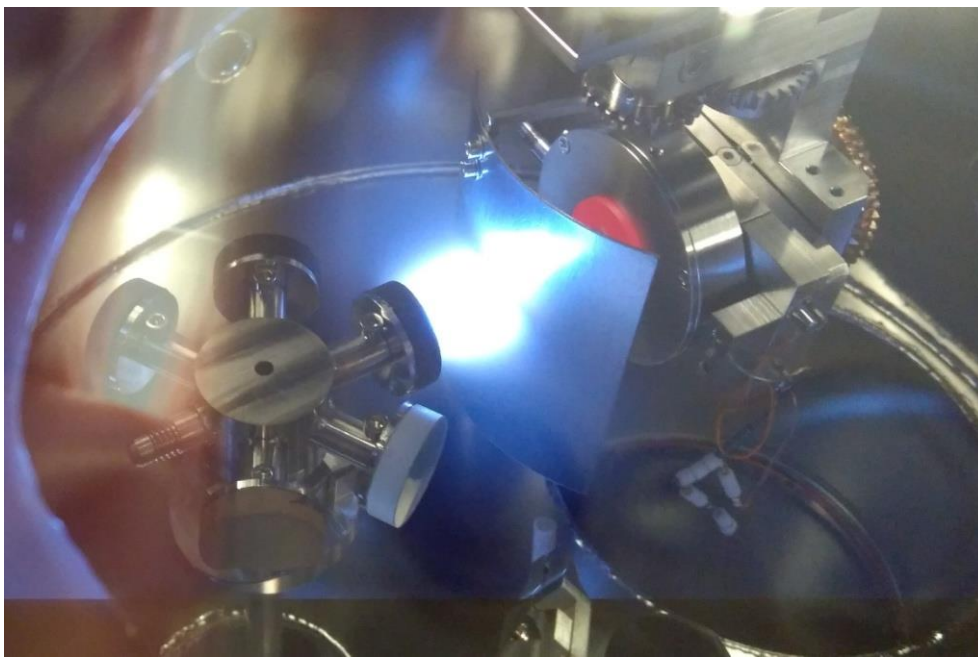
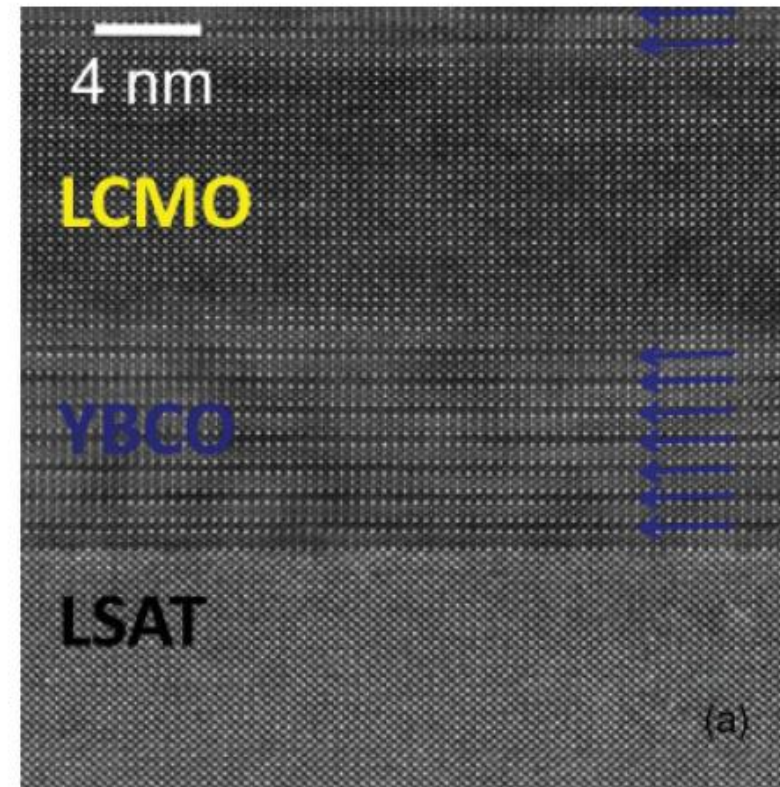


- PLD vybavené špičkovou současnou technologií
- tlak 5×10^{-10} mbar
- kontrola růstu s RHEED
- in situ ozonová atmosféra
- ultra homogenní růst se skenováním laserového svazku
- připojené na UHV klastr s analytickými metodami (XPS, ARPES, LEEM, LEED, STM)

Princip pulsní laserové depozice

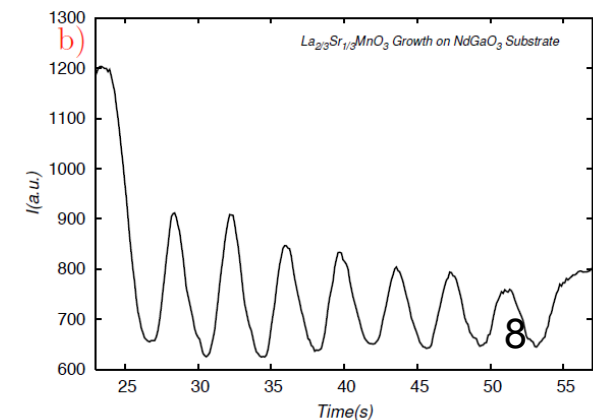


Možnosť kombinovať až 5 materiáľů a rŕst multivrstvy - supermřížky

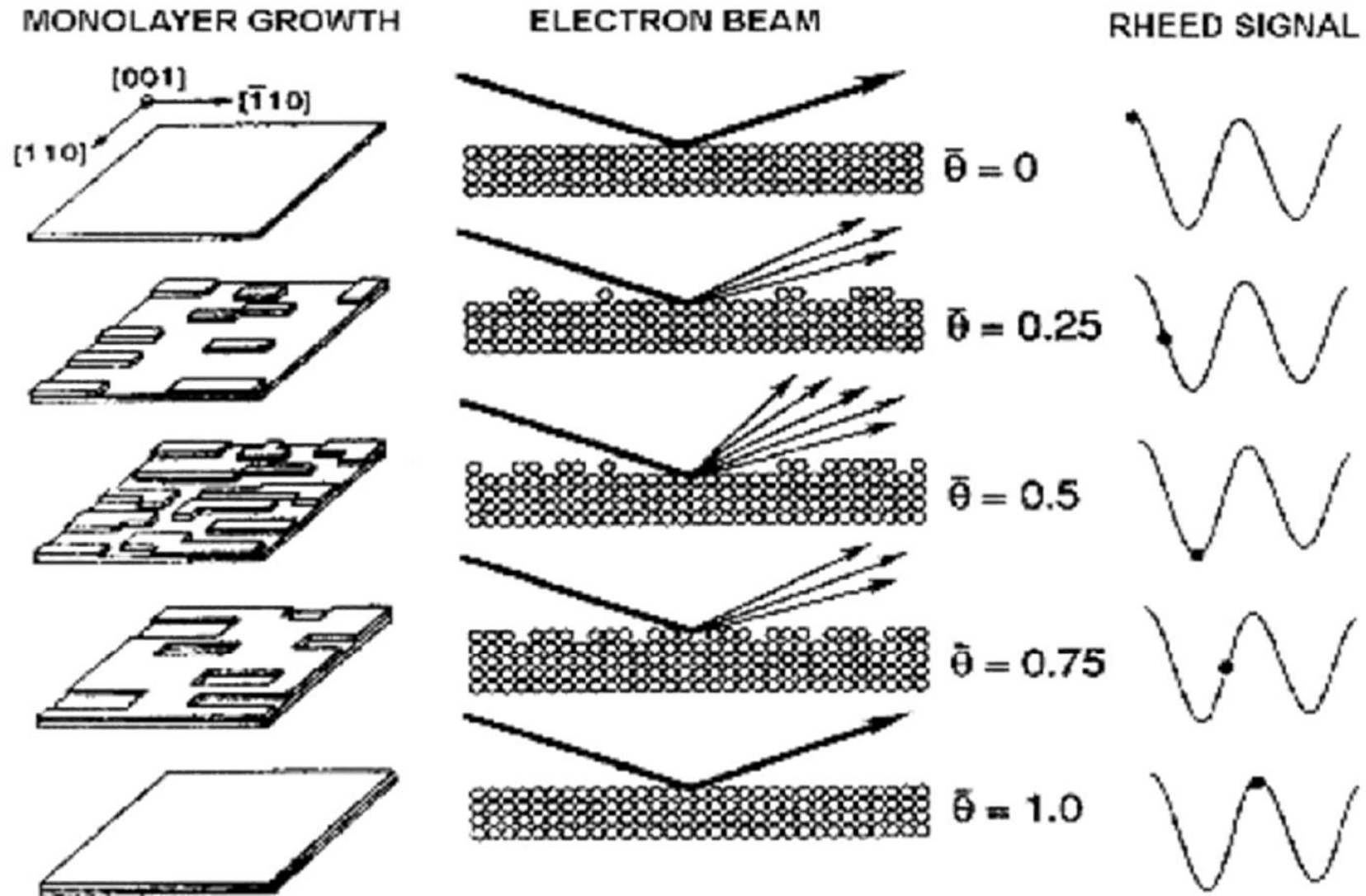


V. K. Malik et al, PRB 2012

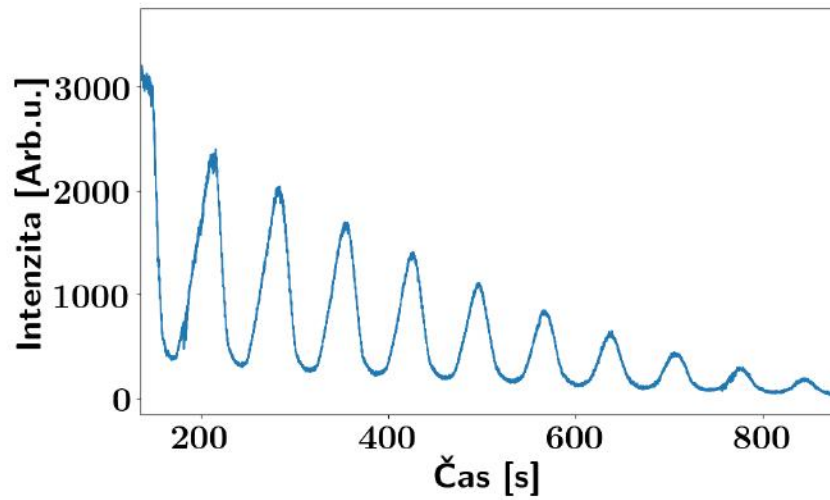
- kontrola rŕstu monovrstev pomocŕ RHEEDu:



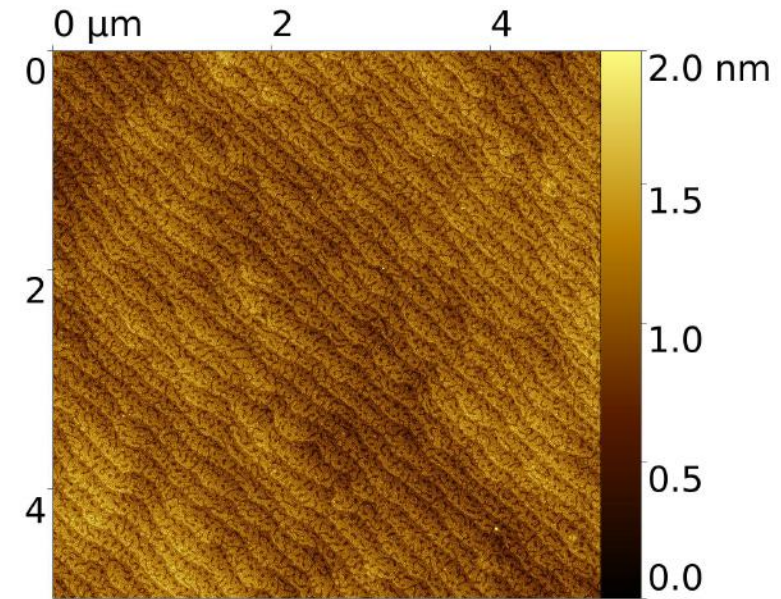
vývoj RHEEDového signálu při růstu jedné monovrstvy



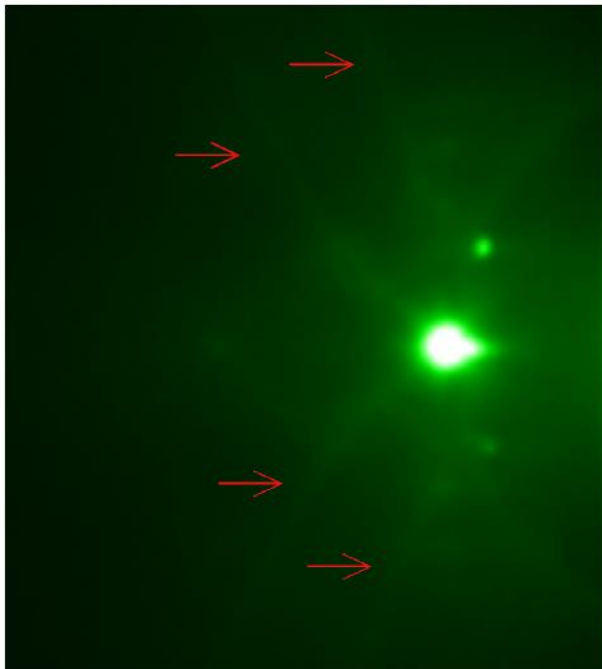
Růst SrTiO₃ (diplomová práce M. Kiaby)



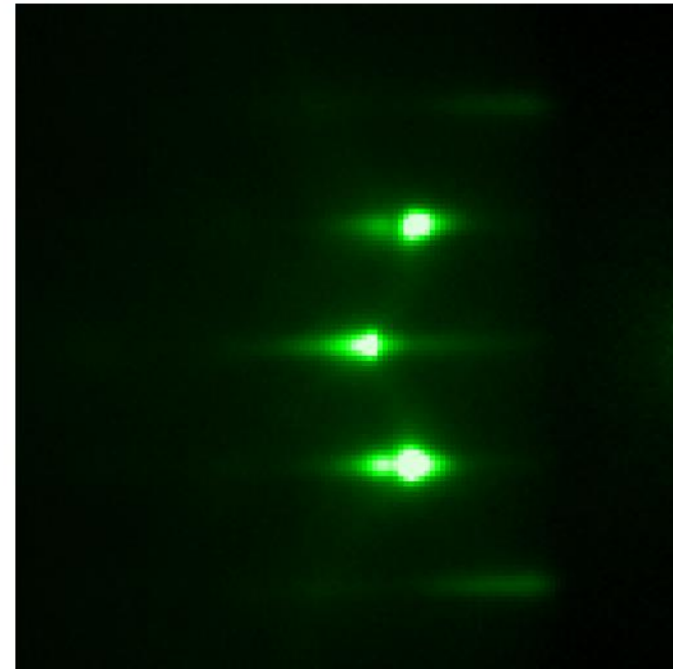
(a)



(b)



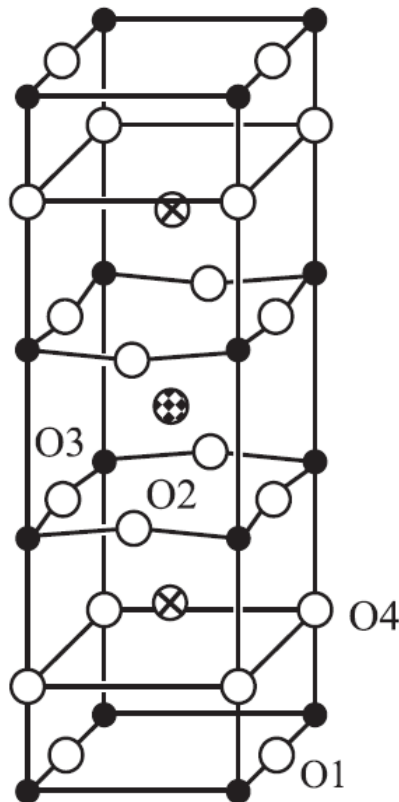
obraz RHEED (c) před depozicí



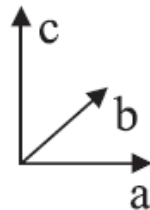
obraz RHEED (d) po depozici

Současný projekt: elektronové stavy v $\text{LaFeO}_3/\text{SrTiO}_3$ supermřížkách

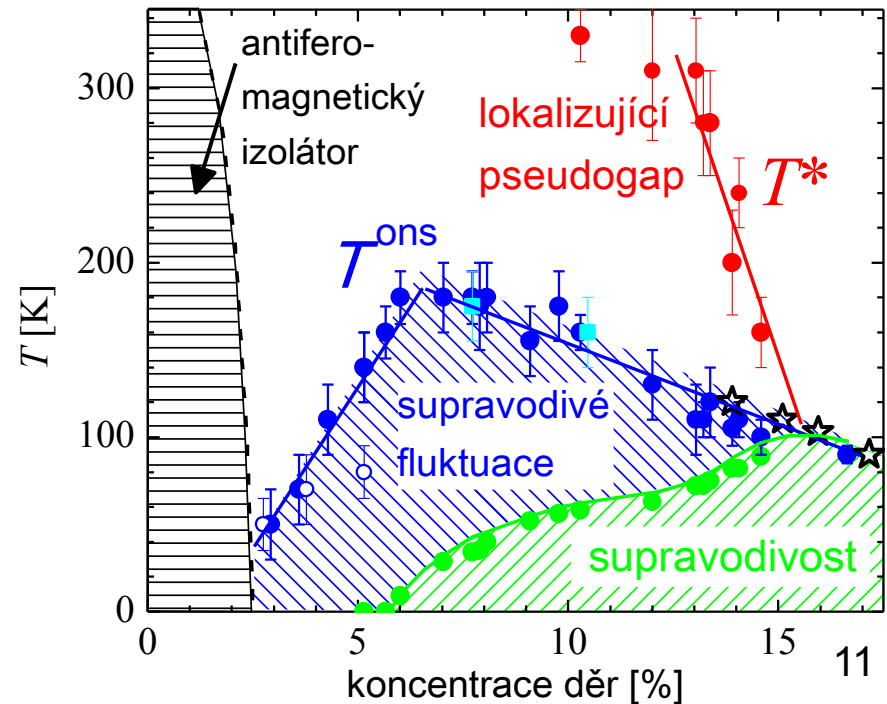
- Cíl: vytvořit supermřížky na atomární úrovni (1-2 monovrstvy) z antiferomagnetického izolátoru LaFeO_3 ($T_{\text{Neel}} = 700 \text{ K}$) a izolantu SrTiO_3
- $\text{La}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{FeO}_3$ je vodivý kov, tedy rozhraní LaFeO_3 a SrTiO_3 mohou být vodivá
- systém bude vykazovat základní elementy vysokoteplotní supravodivosti v kuprátech: blízkost k antiferomagnetickému stavu a dvoudimenzionální vodivé roviny



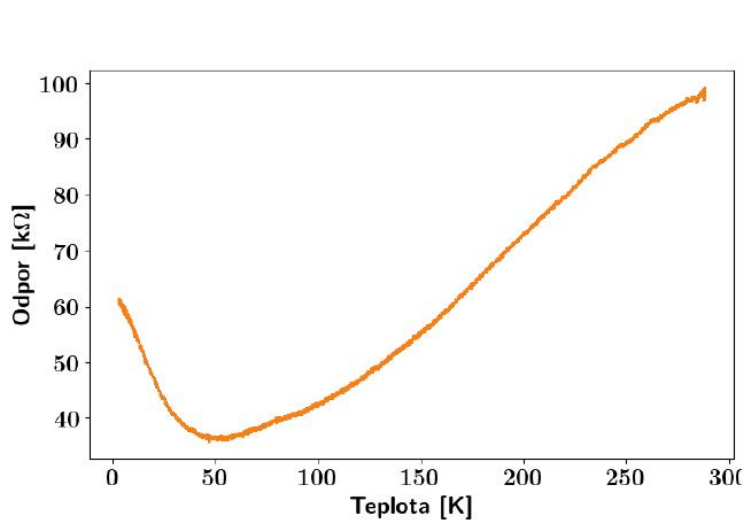
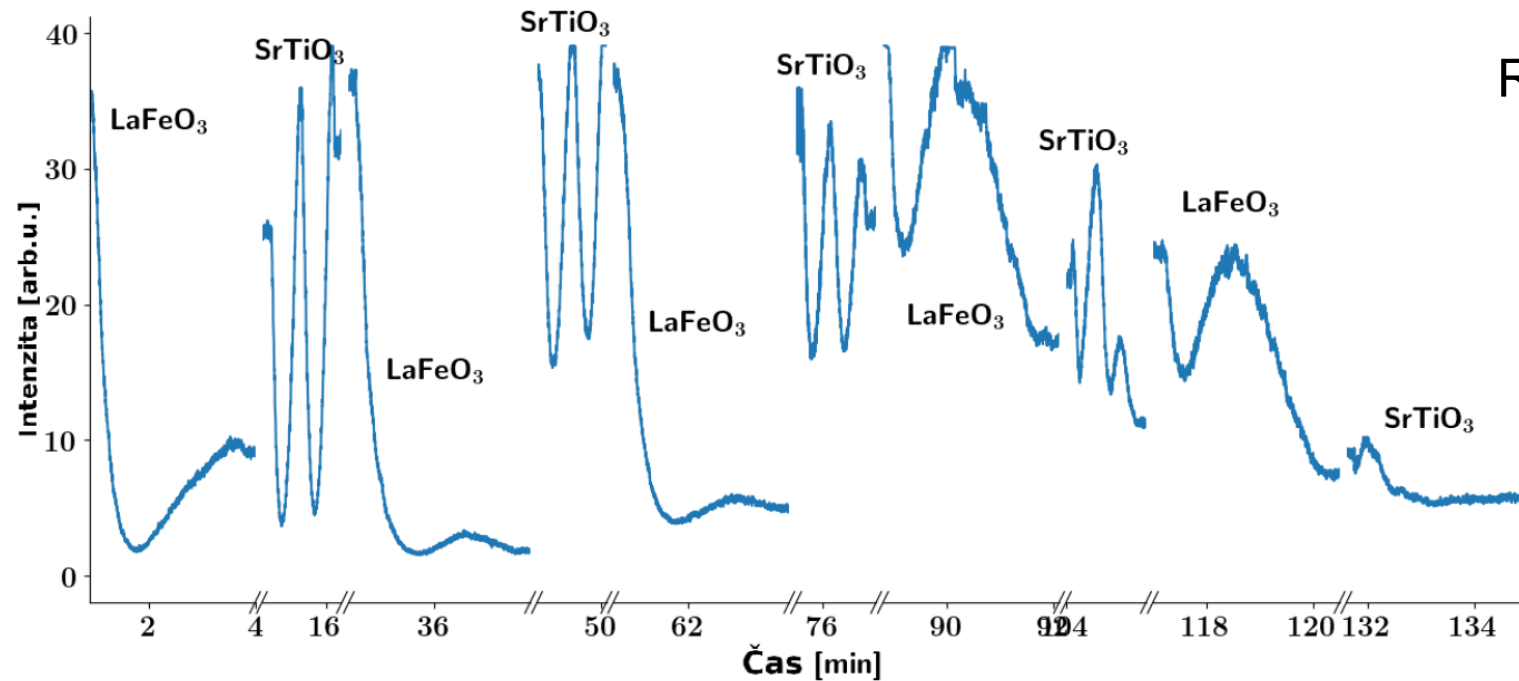
$\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$
supravodič, $T_c = 92 \text{ K}$



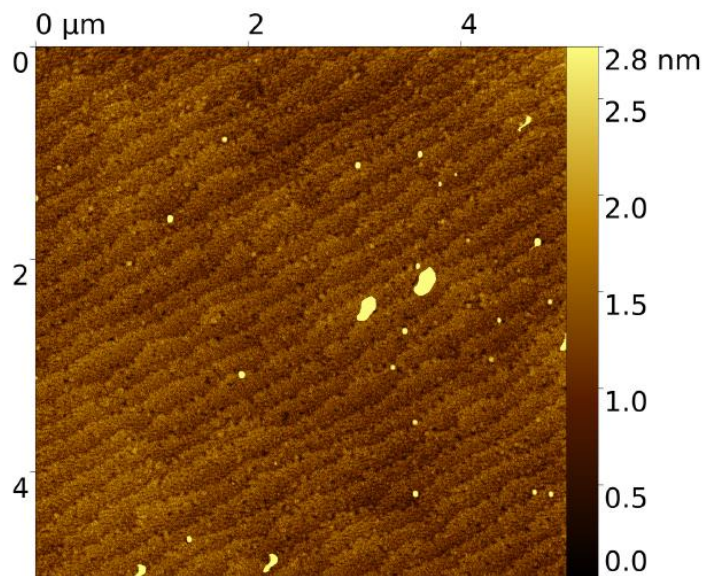
fázový diagram kuprátů



elektronové stavy v $\text{LaFeO}_3/\text{SrTiO}_3$ supermřížkách: první výsledky



(a)

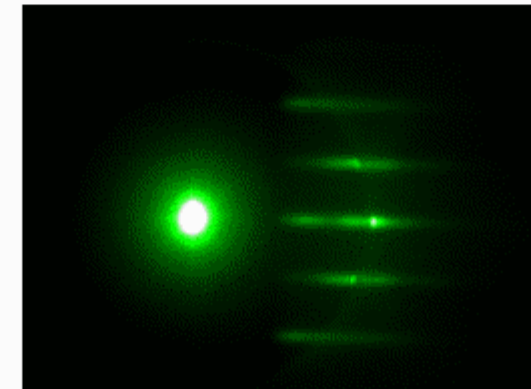
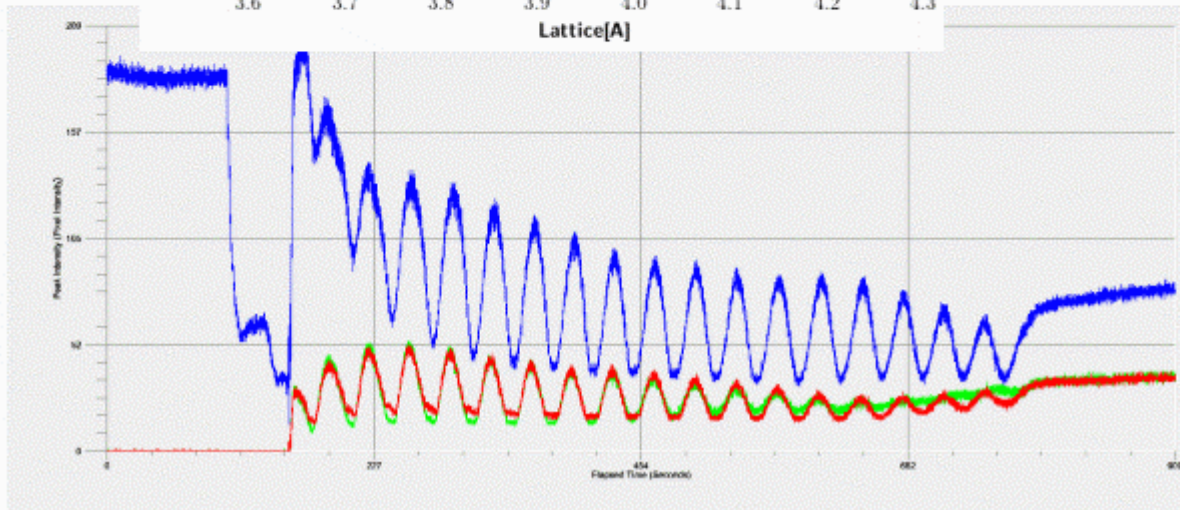
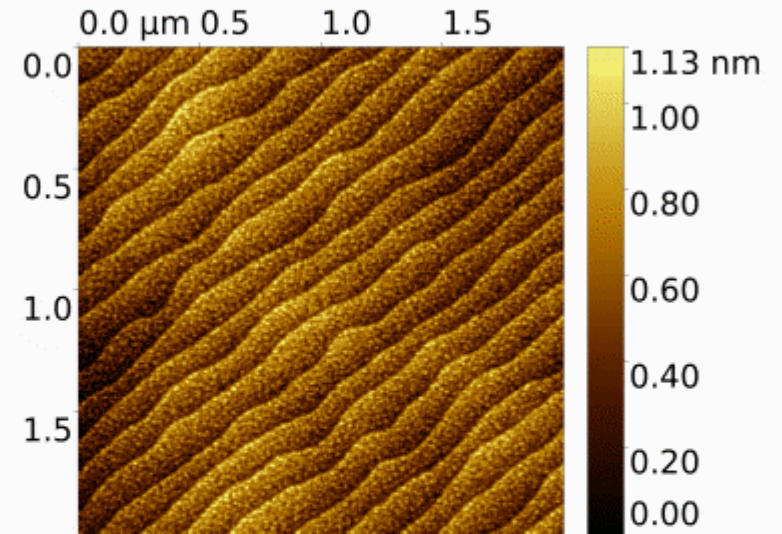
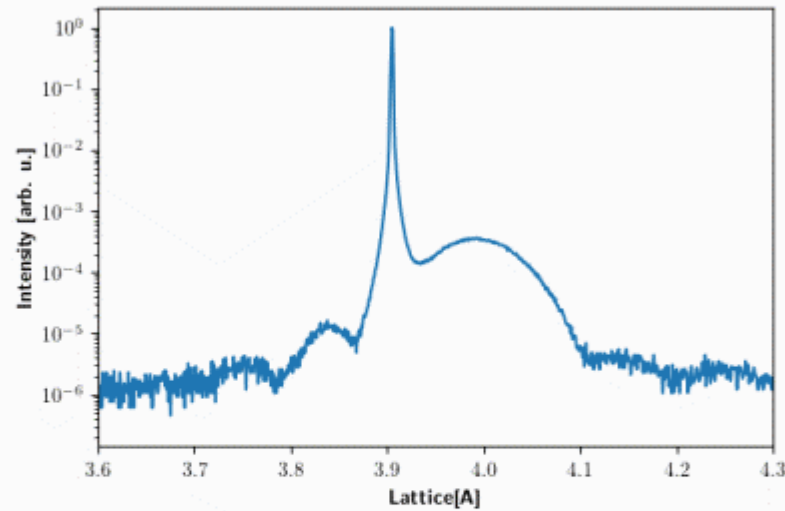


(b)

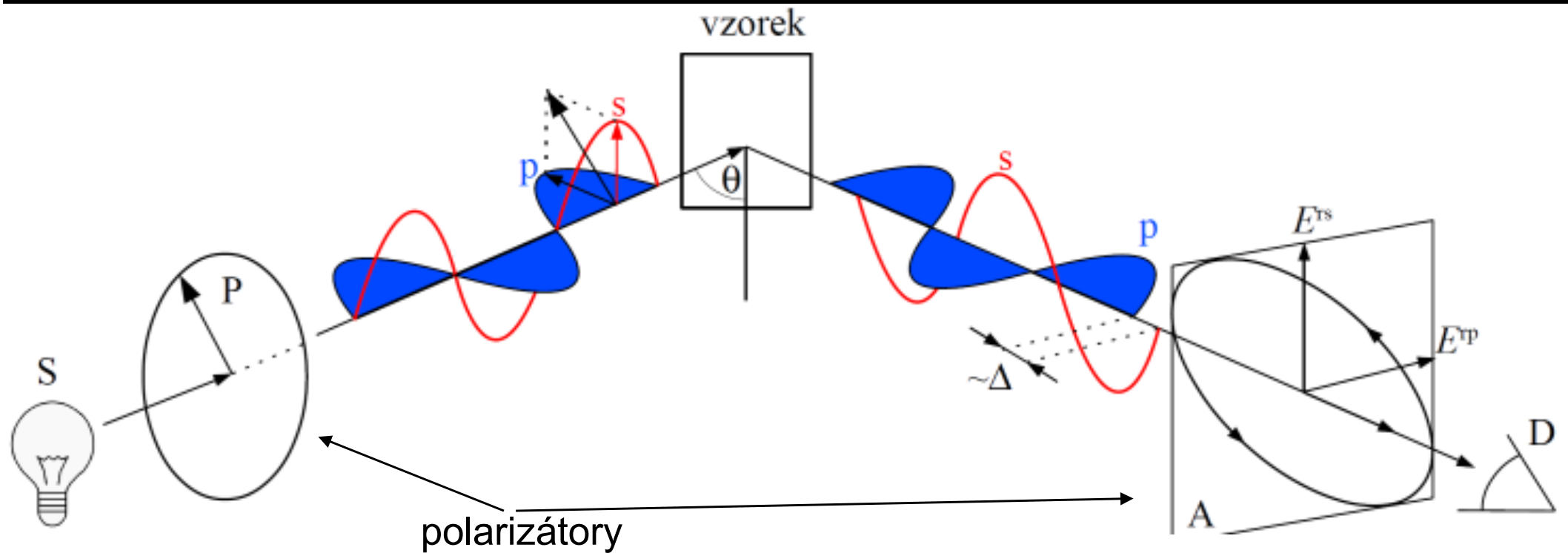
vodivost supermřížky
a
terasovitý povrch
demonstrující
atomární hladkost

(včerejší) depozice LaFeO₃ M. Kiaby
(univerzita Twente, Holandsko)

MK057 LaFeO₃ (20uc - 8nm)



Princip elipsometrie



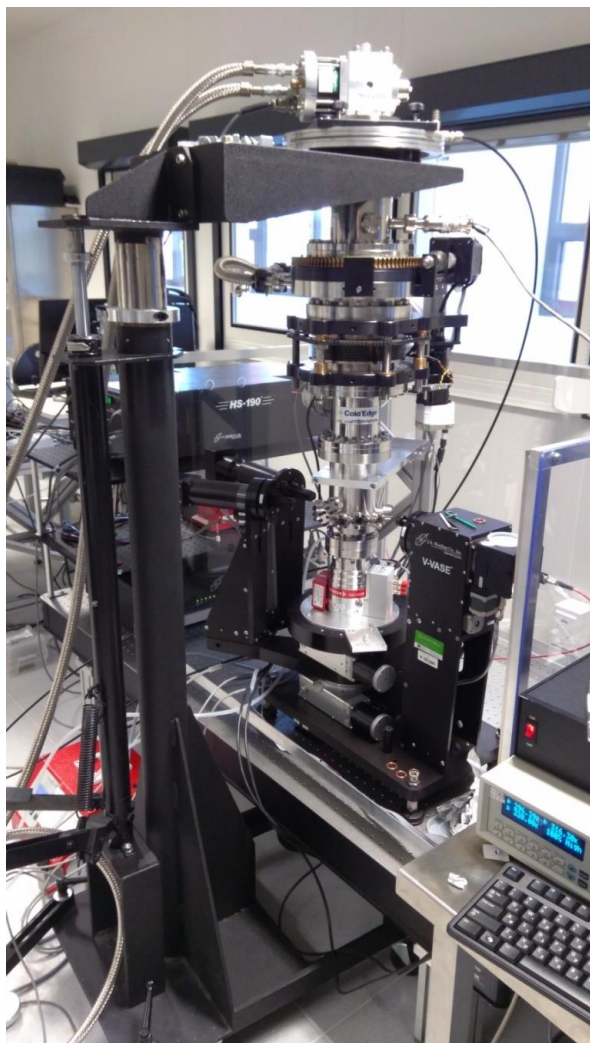
- Elipsometrie je de facto interferenční experiment s komponentou elektrického pole rovnoběžnou (p) a kolmou (s) k rovině dopadu.

Měřené veličiny v elipsometrii:

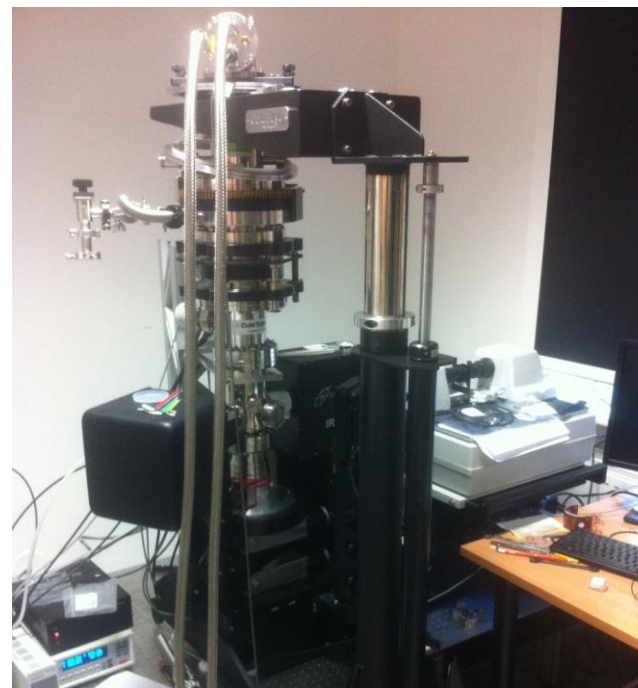
- úhel pootočení elipsy Ψ
- elipticita Δ

\Rightarrow Reálná a imag. část dielektrické funkce ϵ_1, ϵ_2

Woollam VASE, (190nm-2.5 μm)
He kryostat 7-400 K



Woollam IR-VASE, (2.5-30 μm)

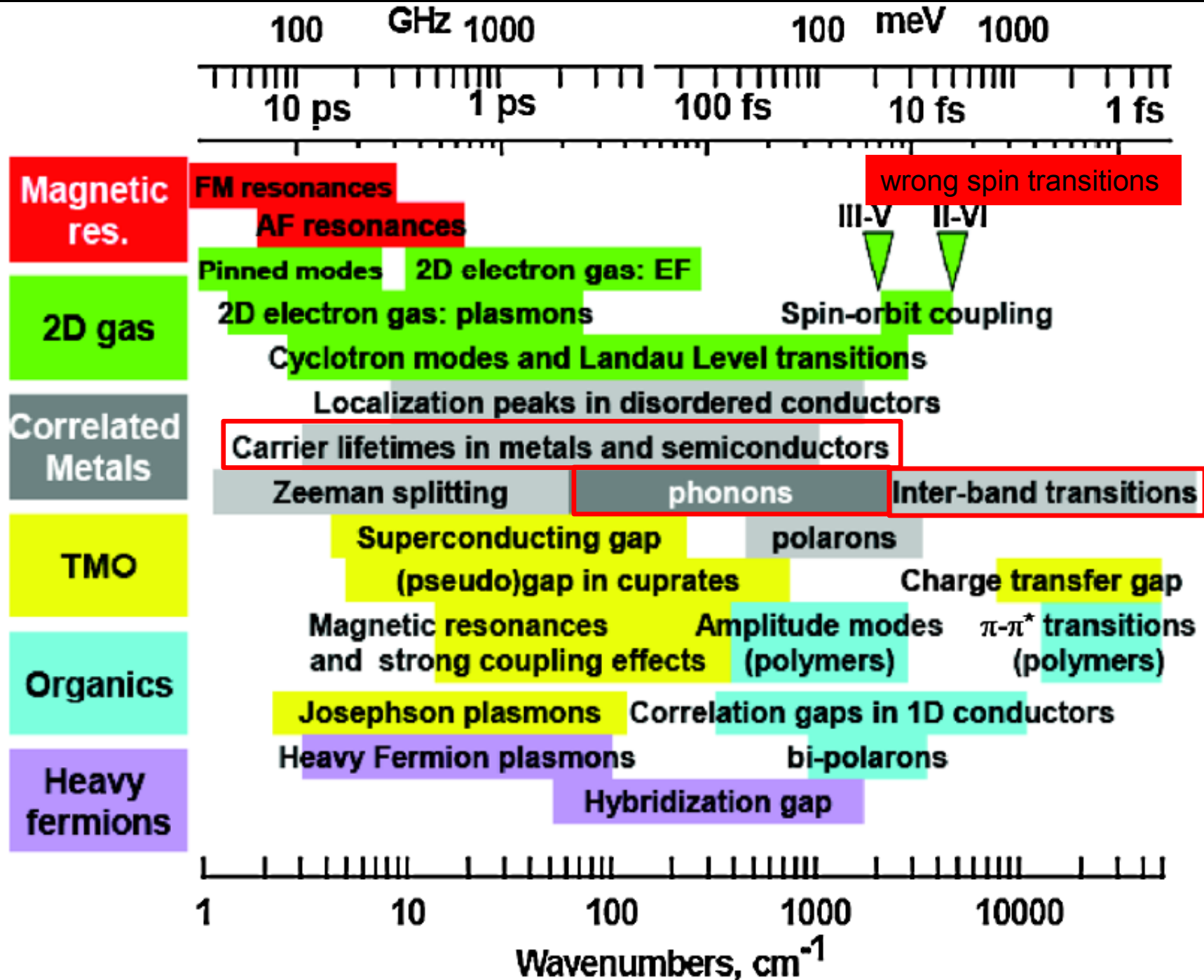


Ellipsometer do vzdálené IČ oblasti (50-700 cm^{-1})



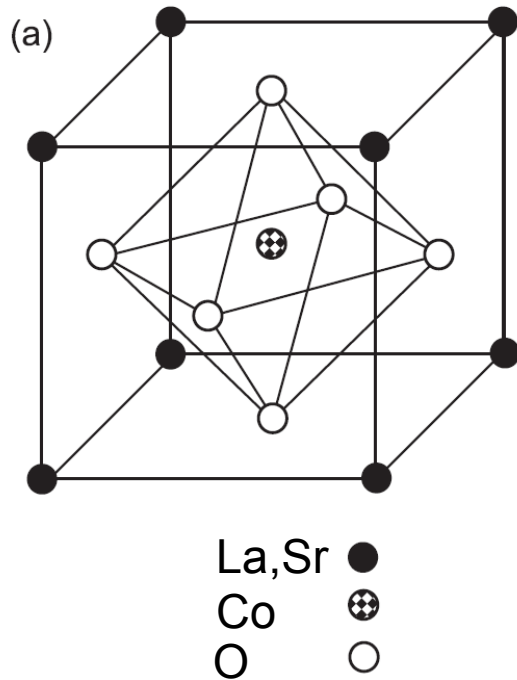
- P. Friš *et al.* Phys. Rev. B **97**, 045137 (2018).
- P. Friš and A. Dubroka, Appl. Surf. Sci., **421**, 430 (2017).
- C.N. Wang *et al.* Appl. Surf. Sci. **421**, 859 (2017)
- P. Friš and A. Dubroka, Appl. Surf. Sci., **421**, 430 (2017).
- O. Caha *et al.* Appl. Phys. Lett. **103**, 202107 (2013)

Opticky aktivní excitace mezi terahertzovým a ultrafialovým oborem

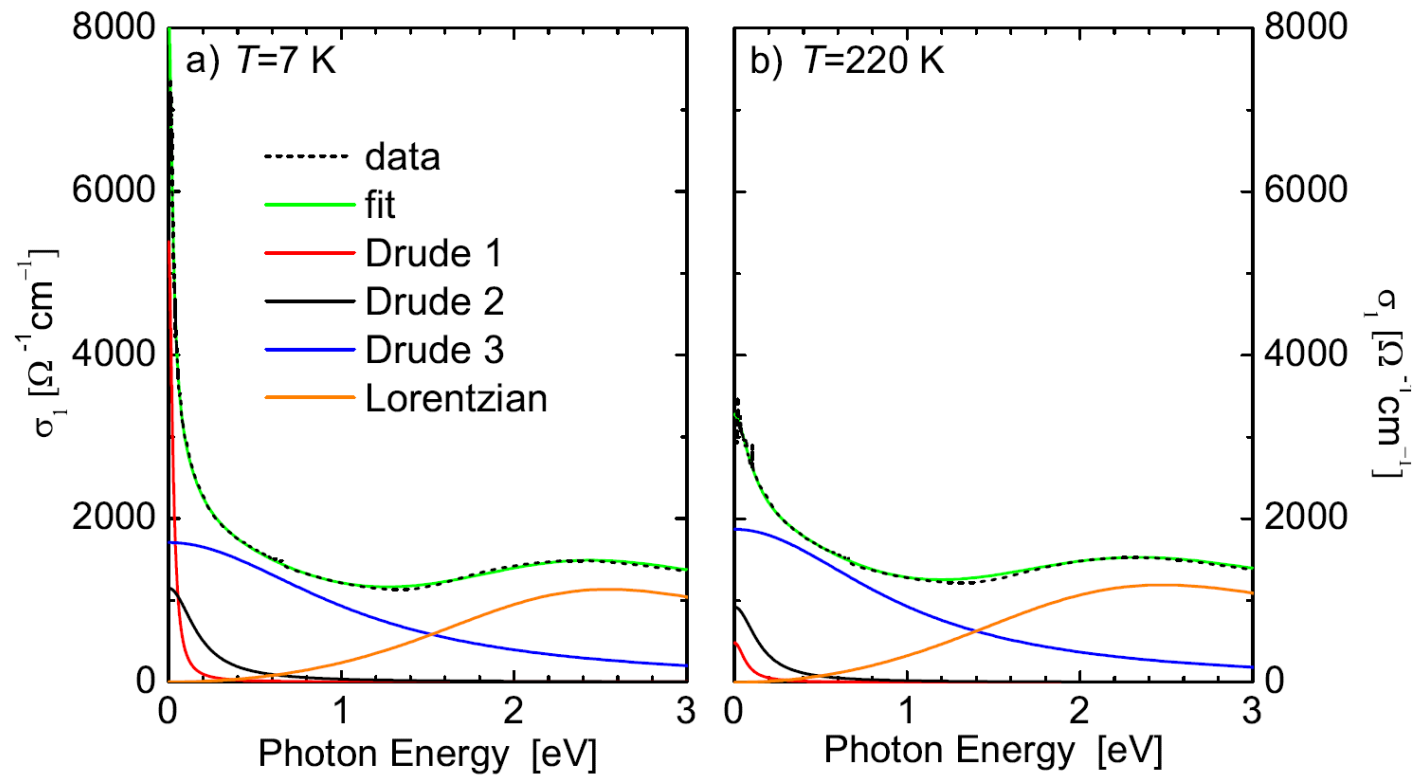


Optická vodivost feromagnetických kobaltátů

$\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{CoO}_3$, $T_c \sim 205$ K



Reálná část optické vodivosti, $\sigma_1(\omega) = \omega \epsilon_0 \epsilon_2(\omega)$, je přímo úměrná absorpci záření na jednotku frekvence



- Modelování vodivosti Drude-Lorentzovým modelem:

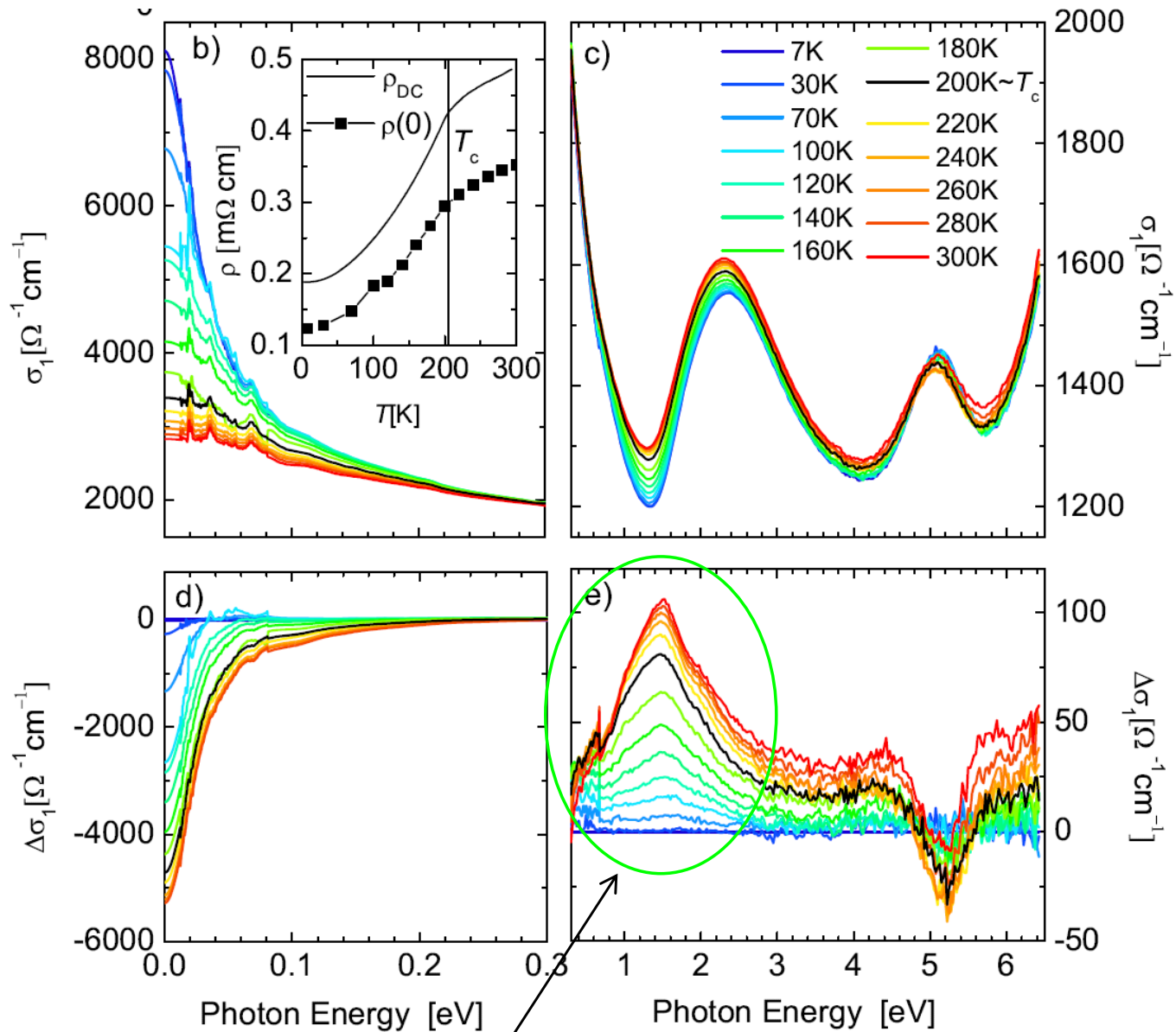
$$\epsilon(\omega) = 1 - \sum_j \frac{\omega_{D,j}^2}{\omega(\omega + i\gamma_{D,j})} + \sum_k \frac{\omega_{L,k}^2}{\omega_{0,k}^2 - \omega^2 - i\omega\gamma_{L,k}}$$

- nutno použít vícero Drudeho členů:- pravděpodobně znak vícepásové vodivosti¹⁷

Optické znaky feromagnetického stavu

$\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{CoO}_3$,
 $T_c \sim 205 \text{ K}$

Absolutní optická
 vodivost



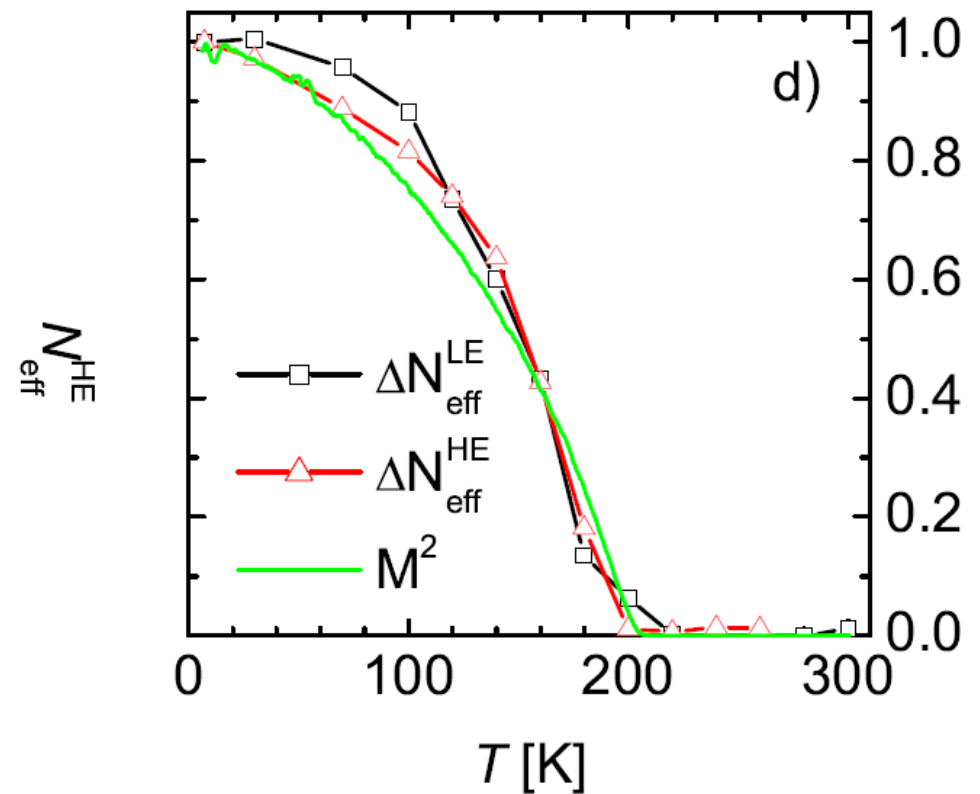
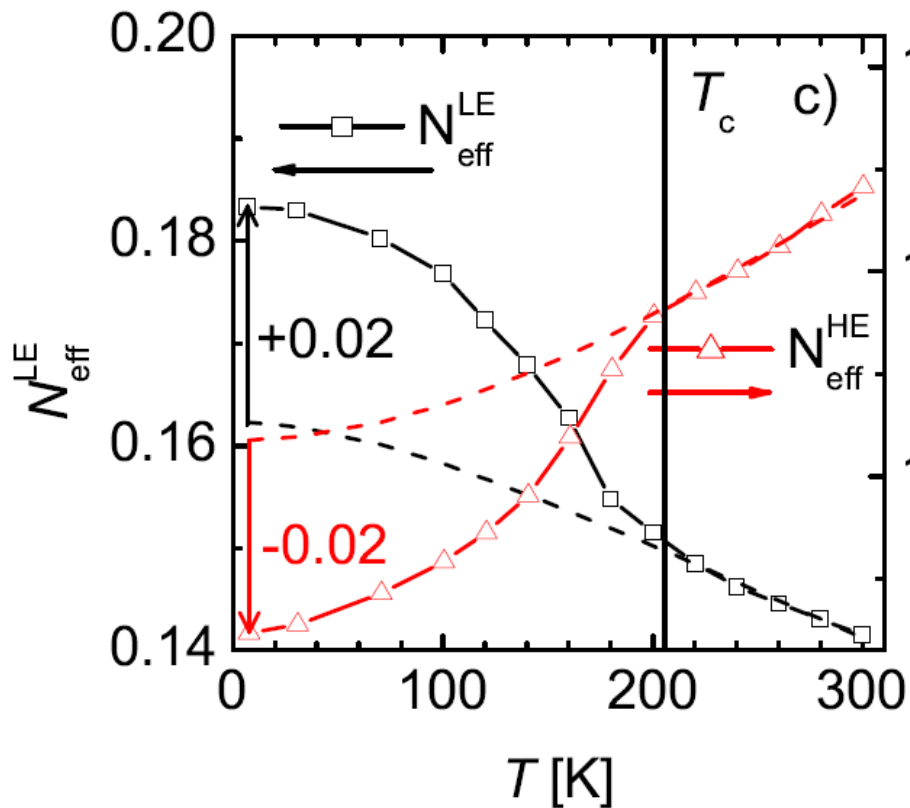
relativní optická
 vodivost
 vzhledem k 7 K

Kandidát přechodu se „špatným spinem“ na $\sim 1.5 \text{ eV}$

Optické znaky feromagnetického stavu

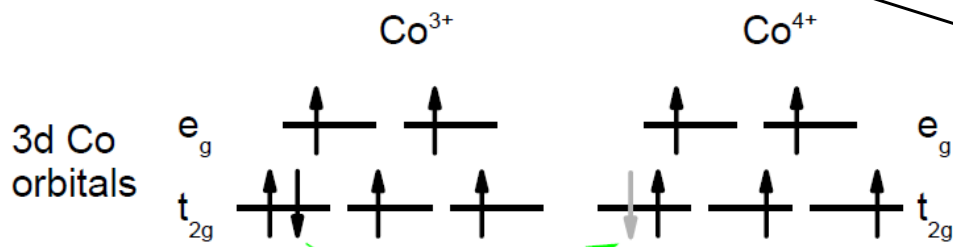
$\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{CoO}_3$, $T_c \sim 205$ K

- Spektrální váhy (integrál z σ_1) od Drudeho píku a pásu na 1.5 eV sledují magnetizaci vzorku - jsou teda spojeni s feromagnetickým přechodem
- Konkrétněji přesuny odpovídají tzv. dvojně výměnné interakci



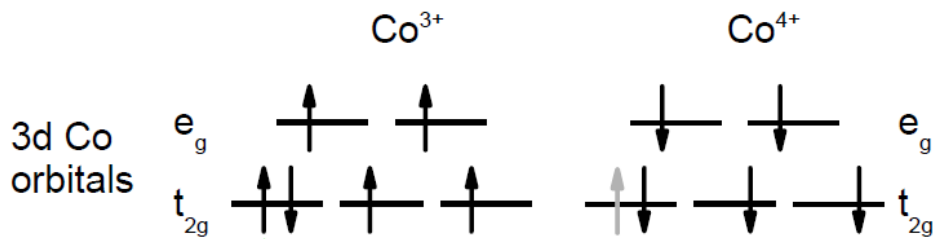
Přechody elektronů mezi kobalty

Ferromagnetický stav:

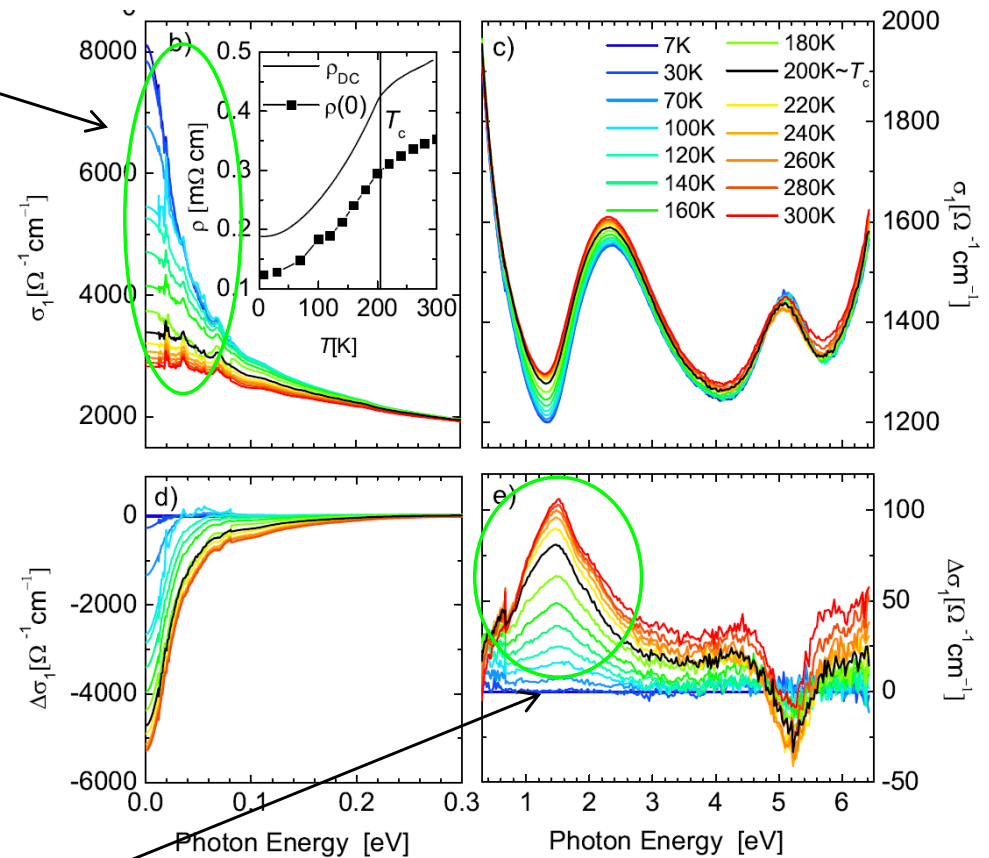


- přeskoky (delokalizace) elektronu jsou hlavní silou vedoucí k ferromagnetickému uspořádání (dvojná výměnná interakce)
- přeskoky vedou k vodivé odezvě

Paramagnetický stav

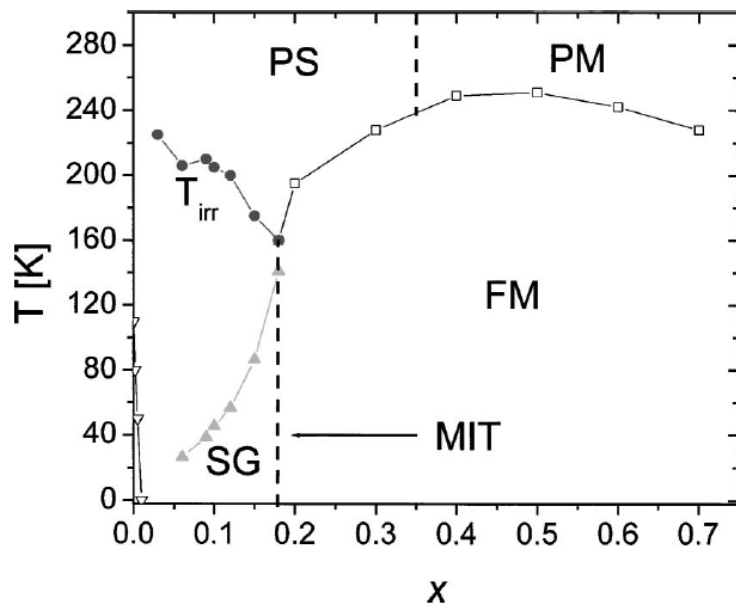


- přeskoky mezy kobalty s antiparalelním spinem (přechod se „špatným spinem“)
- tento přechod porušuje Hundova pravidla a je potřeba na něho energii (v tomto případě ~ 1.5 eV)

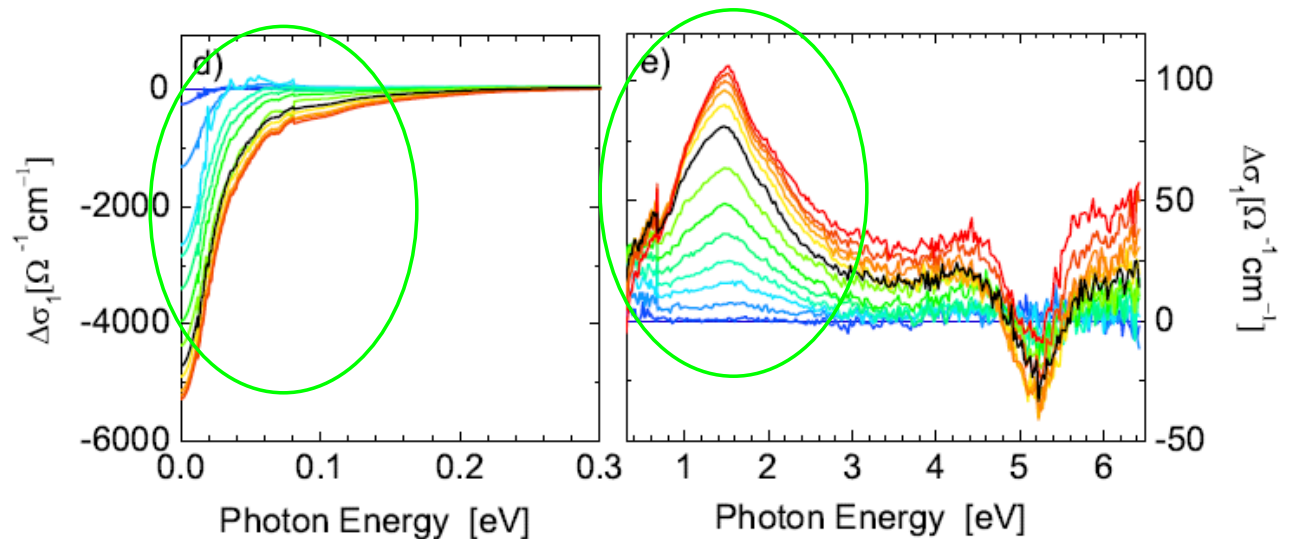


Současný výzkum: elektronové vlastnosti feromagnetu $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{CoO}_3$ v závislosti na dopování Sr

- elektronová struktura (Drude a “wrong spin transition”) feromagnetického stavu v $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{CoO}_3$ v závislosti na koncentraci děr x . Evoluce z izolujícího stavu ($x=0$) do feromagnetu ($x>0$)



- dopování $x=0.3$



- dopování $x=0.5, 0.7$, a 0.2

Děkuji za pozornost

dodatky

P. Klenovský, výpočty elektronových stavů kvantových teček: Ukázka: kvantové tečky GaAs/InAs/GaAs_{1-y}Sb_y

elektronové stavy pro

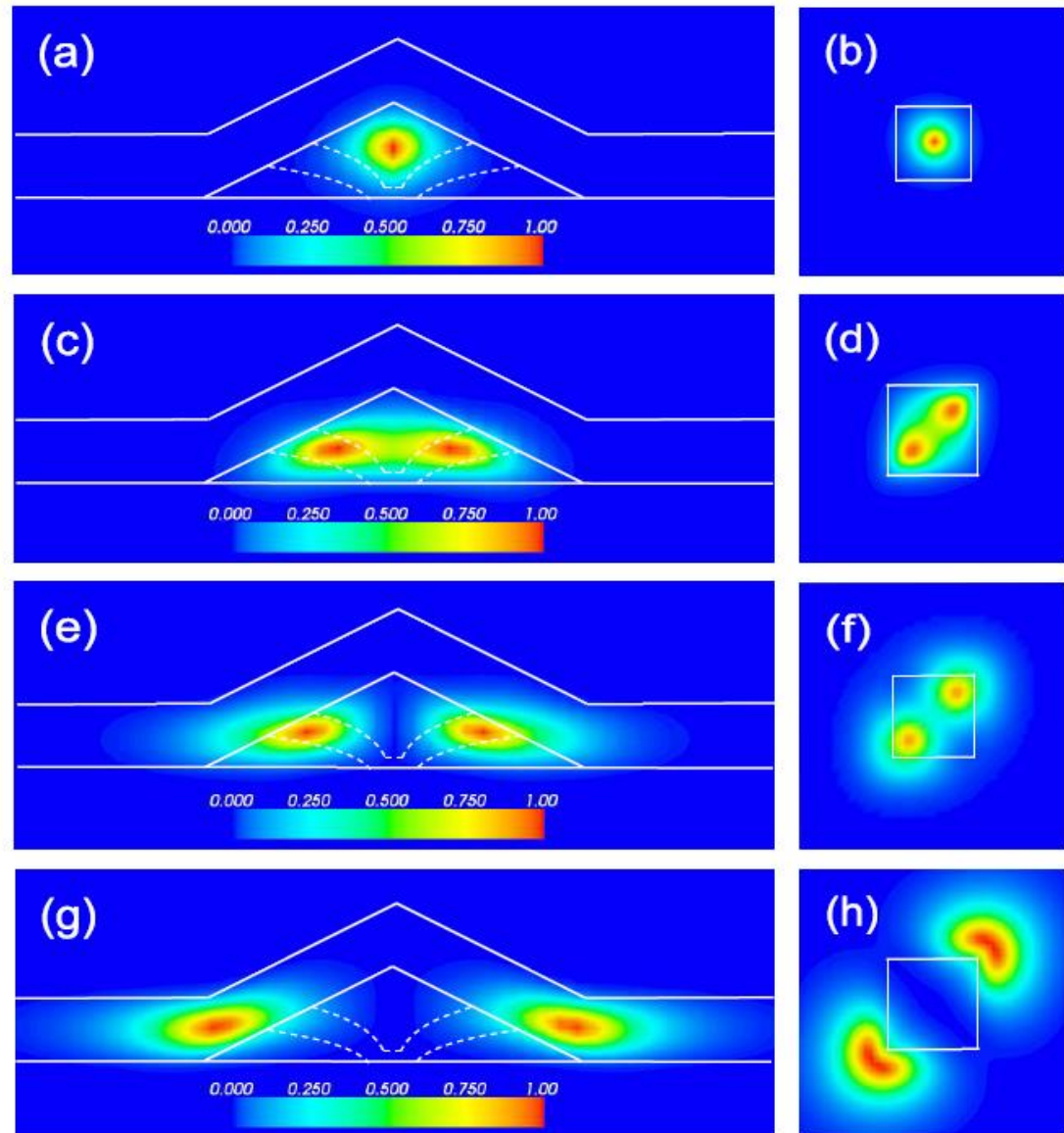
$y=0.10$

děrové stavy pro

$y=0.10$

$y=0.17$

$y=0.22$



P. Klenovský et al, PRB 100 115424 (2019)

P. Klenovský et al, PRB 97 542 (2018)

P. Klenovský et al, PRB 96 045414 (2017)

Optická vodivost

Optická vodivost se pojí s dielektrickou funkcí: $\sigma(\omega) = -i\omega\varepsilon_0(\varepsilon(\omega) - 1)$

Je to komplexní funkce podobně jako dielektrická funkce: $\sigma(\omega) = \sigma_1(\omega) + i\sigma_2(\omega)$

- Reálná část vodivosti, $\sigma_1(\omega) = \omega\varepsilon_0\varepsilon_2(\omega)$, je přímo úměrná absorpci záření na jednotku frekvence

- $\sigma_1(\omega=0) = \sigma_{DC}$

- pro σ_1 existuje sumační pravidlo $\int_0^{\infty} \sigma_1(\omega) d\omega = \frac{\pi n q^2}{2\varepsilon_0 m} = \text{constant}$

- Integrál z $\sigma_1(\omega)$ přes určitý frekvenční obor je úměrný koncentraci náboje způsobující absorpci

základní rovnice elipsometrie

Definice elipsometrických úhlů Ψ a Δ : $\rho = \frac{r_p}{r_s} = \tan \Psi e^{i\Delta}$

Fresnelovy koeficienty:

$$r_p = \frac{N_2 \cos \theta_1 - N_1 \cos \theta_2}{N_1 \cos \theta_2 + N_2 \cos \theta_1} \quad r_s = \frac{N_1 \cos \theta_1 - N_2 \cos \theta_2}{N_1 \cos \theta_1 + N_2 \cos \theta_2}$$

Snellův zákon: $N_1 \sin \theta_1 = N_2 \sin \theta_2$

Index lomu okolí: $N_1 = \sqrt{\epsilon_a}$ Index lomu vzorku: $N_2 = \sqrt{\epsilon_s}$

Inverzí výše uvedených rovnic obdržíme v případě polonekonečného izotropního vzorku explicitní analytický výraz pro dielektrickou funkci (jak její reálnou tak i imaginární část):

$$\epsilon_s(\Psi, \Delta) = \epsilon_a \sin^2 \theta_1 \left(1 + \tan^2 \theta_1 \left(\frac{1 - \rho(\Psi, \Delta)}{1 + \rho(\Psi, \Delta)} \right)^2 \right)$$

shrnuto: ze dvou měřených veličin Ψ a Δ určíme dvě veličiny ϵ_1 a ϵ_2

Lorentzův oscilátor

Newtonova rovnice harmonicky buzeného mechanického oscilátoru:

$$m \frac{d^2 x(t)}{dt^2} = -k x(t) - m\gamma \frac{dx(t)}{dt} + qE_0 e^{-i\omega t}$$

Řešení:

$$x_0(\omega) = \frac{F}{\omega_0^2 - \omega^2 - i\omega\gamma}$$

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}, \quad F = \frac{qE_0}{m}$$

polarizace je hustota dipólového momentu

$$P(\omega) = \sum_j nq x_{0,j}(\omega) \quad n: \text{koncentrace}$$

z definice dielektrické funkce:

$$\epsilon(\omega) = 1 + \frac{P(\omega)}{\epsilon_0 E(\omega)} = 1 + \sum_j \frac{\omega_{pl,j}^2}{\omega_{0,j}^2 - \omega^2 - i\omega\gamma_j}$$

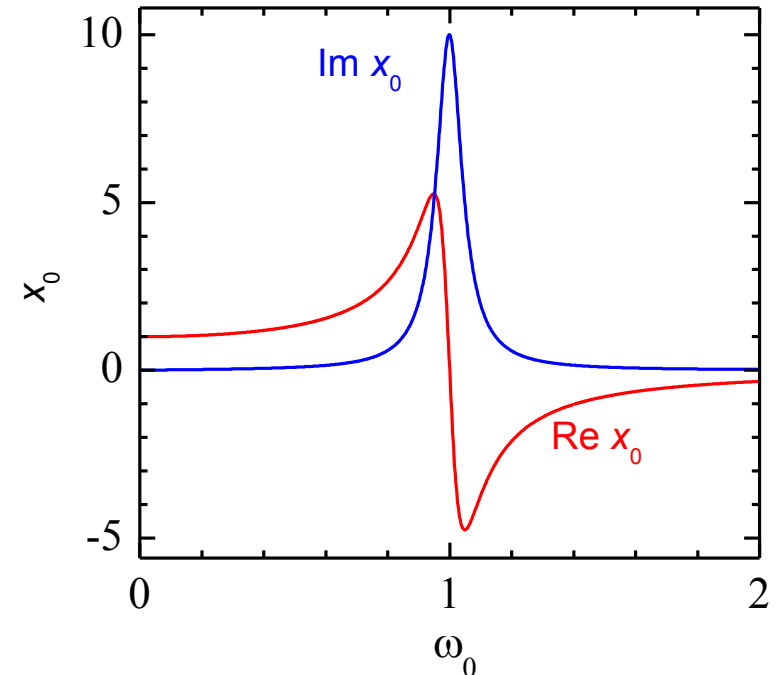
plasmová frekvence:

$$\omega_{pl,j} = \sqrt{\frac{q_j^2 n_j}{\epsilon_0 m_j}}$$

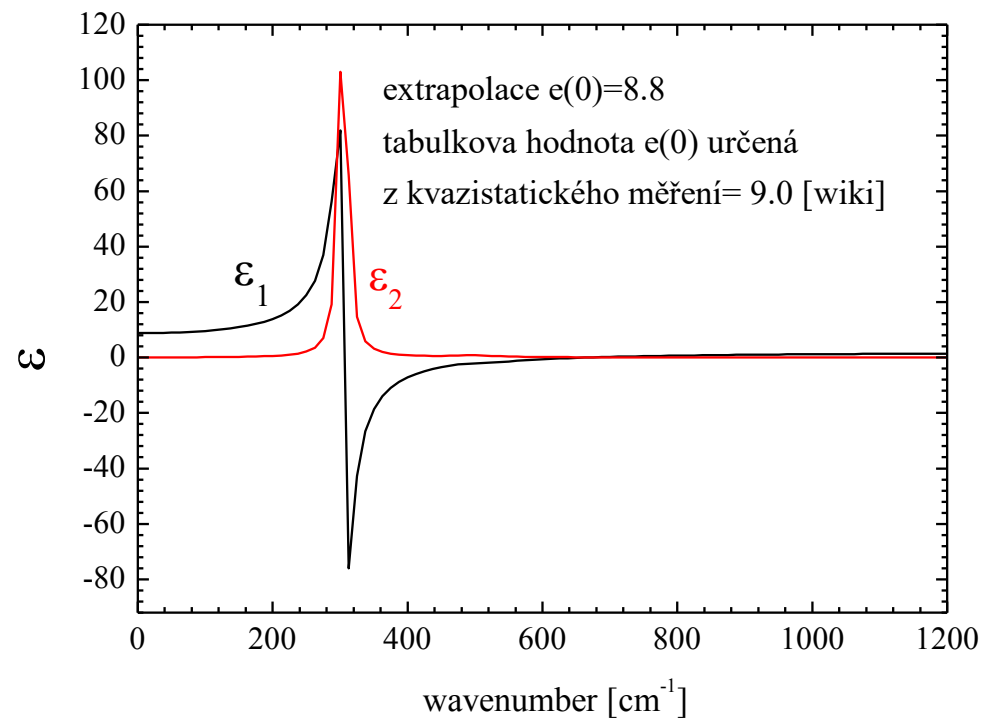
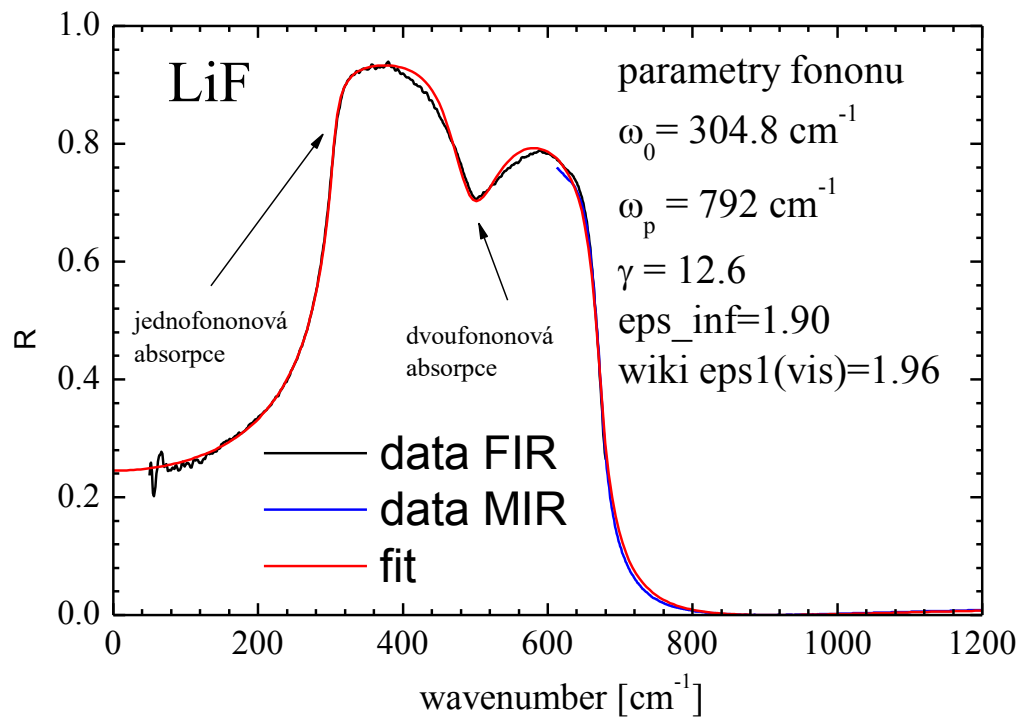
příspěvek vysokofrekvenčních přechodů lze nejhruběji aproximovat konstantou:

$$\epsilon(\omega) = \epsilon_\infty + \sum_j \frac{\omega_{pl,j}^2}{\omega_{0,j}^2 - \omega^2 - i\omega\gamma_j}$$

- dielektrická funkce nezávislých Lorentzových oscilátorů. Typicky dobře funguje pro fonony. Drudeův model kovů dostaneme dosazením $\omega_0=0$



ukázka: IČ Reflektivita LiF



Drudeova formule

- odezvu volných nosičů náboje získáme pro $\omega_0=0$

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_\infty - \frac{\omega_{pl}^2}{\omega(\omega + i\gamma)}$$

plasmová frekvence $\omega_{pl} = \sqrt{\frac{q^2 n}{\varepsilon_0 m^*}}$

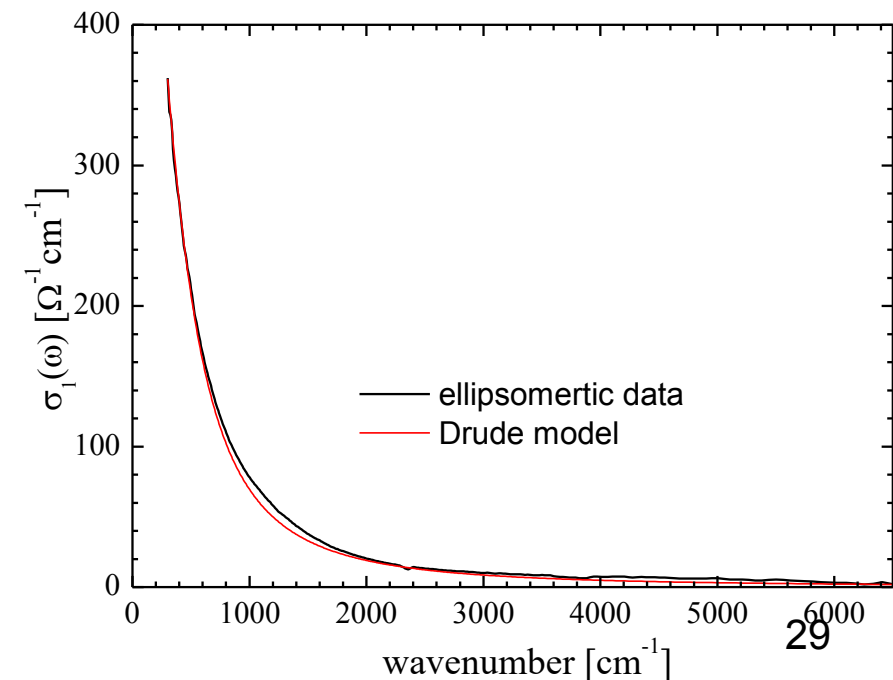
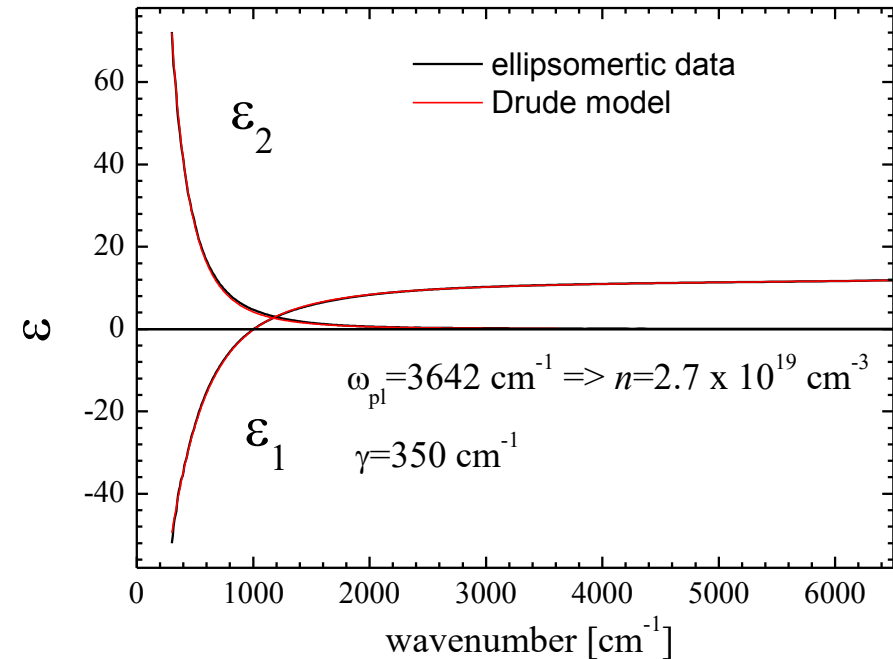
závisí na koncentraci nositelů n a na jejich efektivní hmotnosti m^*

ε_1 prochází nulou (pro $\gamma \sim 0$) pro

$$\omega = \frac{\omega_{pl}}{\sqrt{\varepsilon_\infty}}$$

pro $\varepsilon_\infty = 1$ je to přímo ω_{pl} . Na této frekvenci se v látce propaguje longitudinální plasmon, proto se této frekvenci říká plasmová.

Ukázka dielektrické funkce n-dopovaného křemíku



Drude model

A classical model of dielectric response of free and *mutually non-interacting* charge carriers

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_{\infty} - \frac{\omega_{\text{pl}}^2}{\omega(\omega + i\gamma)}$$

where ω_{pl} is the plasma frequency $\omega_{\text{pl}} = \sqrt{\frac{q^2 n}{\varepsilon_0 m^*}}$

Example on n-doped silicon:

