



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,  
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY



OP Vzdělávání  
pro konkurenceschopnost

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Moderní technologie ve studiu aplikované fyziky  
Reg.č. CZ.1.07/2.2.00/07.0018

# Fyzika pevných látek SLO/PL syllabus přednášky

**Jan Soubusta, Ph.D.**

Společná laboratoř optiky UP a Fyzikálního ústavu AV ČR  
17. listopadu 50A, 779 07 Olomouc

Olomouc 2011

Typeset by L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X

TVORBA TOHOTO UČEBNÍHO MATERIÁLU JE SPOLUFINANCOVÁNA EVROPSKÝM  
SOCIÁLNÍM FONDEM A STÁTNÍM ROZPOČTEM ČESKÉ REPUBLIKY

## Sylabus přednášky fyzika pevných látek SLO/PL

1. Prostorové uspořádání krystalu  
Historický vývoj pohledu na strukturu pevných látek a atomu. Pevná látka z pohledu kvantové mechaniky. Periodické uspořádání atomů v krystalu, krystalografie. 14 Bravaisových mřížek, 7 krystalografických skupin. Mřížka, elementární/primitivní buňka, báze. Operace symetrie, Millerovy indexy krystalových rovin. Nejčastější krystalové struktury a jejich parametry: SC, FCC, BCC, HCP (hexagonální nejtěsnější uspořádání). Zaplnění prostoru tuhými koulemi.
2. Difrakce na krystalu, reciproká mřížka  
Studium prostorového uspořádání krystalu pomocí rozptylu rentgenového záření, svazku neutronů nebo elektronů. Bázové vektory reciproké mřížky, vztah mezi symetrií přímé a reciproké mřížky. Braggův zákon rozptylu, Brillouinova podmínka, Laueho podmínka. Experimentální difrakční metody. Brillouinova zóna, Fourierova analýza, strukturní faktory.
3. Krystalová vazba  
Definice kohezní energie. Opakování základních vazeb, které umožňují vytvářet stabilní krystaly. Van der Waalova vazba, krystaly inertních plynů, Lennard-Jonesův potenciál, rovnovážné mřížkové konstanty,  $\sum_j p_{ij}^{-12}$ ,  $\sum_j p_{ij}^{-6}$ . Iontové krystaly, elektrostatická neboli Madelungova energie. Kovalentní krystaly, Pauliho vylučovací princip, výměnná interakce. Kovové krystaly, kladné ionty v moři vodivostních elektronů. Vodíková vazba.
4. Fonony, kmity mřížky  
Rovnovážné polohy jader, harmonický rozvoj ve výchylkách, silové konstanty. Malé výchylky  $\rightarrow$  diagonalizace (normální souřadnice)  $\rightarrow$  nezávislé oscilátory  $\rightarrow$  kvantování normálních modů  $\rightarrow$  fonony. Energetické hladiny fononů jsou  $E = (n + \frac{1}{2})\hbar\omega$ . Grupová/fázová rychlost, podélné/příčné, akustické/optické fonony. Disperzní závislosti  $\omega(\vec{q})$ , popis pomocí vektoru kvazihybosti  $\vec{q}$  z 1.BZ. 1D řetězek atomů stejných/různých atomů.  
Tepelné vlastnosti krystalové mřížky: Einsteinův model, Debyeův model měrných tepel  $C_v$ . Hustota modů  $D(\omega)$ , Debyeova teplota. Anharmonické efekty, tepelná roztažnost a tepelná vodivost mřížky.
5. Kovy - Fermiho plyn volných elektronů  
Přiblížení, kdy se krystal bere jako potenciálová krabice. Získáme diskrétní energetické stavy v pravoúhlé potenciálové jámě. Model volných elektronů, Fermiho-Diracovo rozdělení, Fermiho energie, chemický potenciál. Přejít k Boltzmannovu rozdělení. Hustota stavů elektronů v kovech  $\mathcal{D}(E)$ . Tepelná vodivost elektronů, měrné teplo elektronového plynu  $C_V$ . Experimentální měrné teplo s příspěvkem od elektronů i od mřížky. Elektrická vodivost  $\sigma$ , Ohmův zákon, experimentální relaxační doby  $\tau_L$ ,  $\tau_i$ . Odezva elektronového plynu na vnější pole  $\vec{E}$ ,  $\vec{B}$ , Hallův koeficient, cyklotronová frekvence  $\omega_c$ .
6. Energetické pásy  
Periodický potenciál, pásová struktura, vznik zakázaných pásů. Schrödingerova rovnice v jednoelektronovém přiblížení, přechod k Fourierovým komponentám. Blochův teorém, Blochovy funkce. Ústřední rovnice a speciální případy jejího řešení na hranici Brillouinovy zóny. Kvazihybost elektronu. Kronigův-Penneyův model. Model téměř volných elektronů, model prázdné mřížky.
7. Polovodiče  
Charakteristické vlastnosti polovodičů, pásová struktura, přímý a nepřímý zakázaný pás. Pohybové rovnice pro elektron v energetickém pásu, kvazičástice, díra. Efektivní hmotnost elektronu a díry v pásovém schématu. Typické energetické disperzní relace na hraně pásů, příklady pásových struktur pro křemík, germanium a GaAs. Koncentrace vlastních nositelů proudu, popis příměsí, donory a akceptory, příměsová vodivost. Termoelektrické jevy.
8. Fermiho plochy v kovech  
Pásová schéma: rozšířené, redukované, periodické, index pásu. Sestrojení Fermiho plochy v přiblížení téměř volných elektronů. Elektronové, děrové a otevřené orbitály. Výpočet pásových struktur metodou těsné vazby (lineární kombinace atomárních orbitalů LCAO), energetické závislosti  $E(\vec{k})$  pro SC, BCC, FCC. Wignerova-Seitzova metoda. Zkoumání Fermiho ploch s pomocí magnetického pole.

9. Plazmony  
Kolektivní excitace Fermiho moře elektronů. Dielektrická funkce, relativní permitivita  $\varepsilon(\omega, \vec{k})$ . Odezva plazmatu v limitě dlouhých vln, definice plazmatu, plazmové frekvence  $\omega_p$ . Disperzní zákon pro elektromagnetické vlny. Plazmon - kvantum oscilací plazmatu. Elektrostatické stínění, polariton.
10. Optické procesy  
Ramanův rozptyl. Mezipásové elektronové přechody, sdružená hustota stavů. Exciton jako kvazičástice složená z elektronu a díry. Frenkelovy excitony s malým poloměrem (silně vázané), Mottovy-Wannierovy excitony jako obdoba atomu vodíku (slabě vázané).
11. Pokročilé kapitoly  
Supravodivost. Dielektrika, ferroelektrika a piezoelektrický jev. Magnetická susceptibilita, paramagnetismus, diamagnetismus, feromagnetismus. Curieova teplota.

## Literatura

### Literatura základní:

1. C. Kittel, *Úvod do fyziky pevných látek* - český překlad, ACADEMIA Praha, 1985.
2. C. Kittel, *Introduction to Solid State Physics*, Wiley, 2004.
3. R.F. Pierret, *Advanced Semiconductor Fundamentals*, Prentice Hall, 2002.
4. M. Razeghi, *Fundamentals of Solid State Engineering*, Springer, 2009.
5. M. De Graef, M.E. McHenry, *Structure of Materials: An Introduction to Crystallography, Diffraction and Symmetry*, Cambridge University Press, 2007.
6. N.W. Ashcroft, N.D. Mermin, *Solid State Physics*, Brooks Cole, 1976.

### Literatura rozšiřující:

1. L. Mihaly, M.C. Martin, *Solid State Physics: Problems and Solutions*, Wiley-Interscience, 1996.
2. J. Kvasnica: *Matematický aparát fyziky*, ACADEMIA Praha, 2004.
3. E. Majerníková, *Fyzika pevných látek*, skripta UP Olomouc, 1999.
4. C. Kittel, *Quantum Theory of Solids*, Wiley, 1987.

### Literatura doporučená:

1. P.Y. Yu, M. Cordona, *Fundamentals of Semiconductors, Physics and Material Properties*, Springer, 2001.
2. C. Klingshirn, *Semiconductor Optics*, Springer, 2005.
3. J. Celý, *Kvazičástice v pevných látkách*, VUTIUM, Brno 2004.