

ESF II projekt Západočeské univerzity v Plzni

reg. č. CZ.02.2.69/0.0/0.0/18_056/0013239




EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

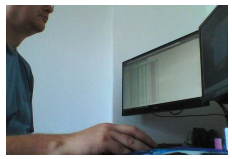


UNIVERZITA ZÁPADOČESKÉ
V PLZNI

1

Průběžné testy na cvičeních z předmětu ELTM

- termíny v týdnu 6. - 9. dubna a pondělí 12. dubna
- test v LMS Moodle (10 otázek, 1 správná varianta) + video přes Google Meet (obraz i zvuk)
- video možné vysílat pomocí:
 - externí webové kamery
 - pomocí kamery v mobilním telefonu
- přístup do testu omezen heslem, které studenti získají od vyučujícího
- případné tech. problémy řešit ihned s cvičícím (Meet, email, telefon)




EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání



UNIVERZITA ZÁPADOČESKÉ
V PLZNI

2



Západočeská univerzita v Plzni
Katedra materiálů a technologií

6.

Elektrotechnické materiály
KET/ELTM

Ing. Robert Vík, Ph.D.



FAKULTA
ELEKTROTECHNICKÁ
ZÁPADOČESKÉ
UNIVERZITY
V PLZNI

EK 410, rvik@fel.zcu.cz



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání



UNIVERZITA ZÁPADOČESKÉ
V PLZNI

3

Fyzikální podstata magnetismu

- orbitální magnetický moment** - elektron obíhající po orbitalu vytváří magnetické pole
- spinový magnetický moment** - elektron rotuje kolem osy
- magnetický moment** = moment orbitální + moment spinový
- magnetizace látky**

$$\vec{M} = \frac{\sum \vec{m}_i}{V}$$

EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Vzdělávání a zaměstnanost

MT
MAGNETICKÝ TRŽNÝ

4

Fyzikální podstata magnetismu

- výsledné chování látky dáno její celkovou elektronovou konfigurací

Element	Total Electrons	Orbital Diagram	Electron Configuration
Li	3	1s ² 2s ¹	1s ² 2s ¹
Be	4	1s ² 2s ²	1s ² 2s ²
B	5	1s ² 2s ² 2p ¹	1s ² 2s ² 2p ¹
C	6	1s ² 2s ² 2p ²	1s ² 2s ² 2p ²
N	7	1s ² 2s ² 2p ³	1s ² 2s ² 2p ³
Ne	10	1s ² 2s ² 2p ⁶	1s ² 2s ² 2p ⁶
Na	11	1s ² 2s ² 2p ⁶ 3s ¹	1s ² 2s ² 2p ⁶ 3s ¹

EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Vzdělávání a zaměstnanost

MT
MAGNETICKÝ TRŽNÝ

5

Fyzikální podstata magnetismu

- výsledné chování látky dáno její celkovou elektronovou konfigurací

Manganese (Mn) → [Ar] 4s ² 3d ⁵	magnetický
Iron (Fe) → [Ar] 4s ² 3d ⁶	magnetický
Cobalt (Co) → [Ar] 4s ² 3d ⁷	magnetický
Nickel (Ni) → [Ar] 4s ² 3d ⁸	magnetický
Copper (Cu) → [Ar] 4s ¹ 3d ¹⁰	nemagnetický
Zinc (Zn) → [Ar] 4s ² 3d ¹⁰	nemagnetický

EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Vzdělávání a zaměstnanost

MT
MAGNETICKÝ TRŽNÝ

6

Makroskopický popis magnetik

- intenzita magnetického pole $\vec{H}$** ($A \cdot m^{-1}$)
 - popisuje míru silových účinků magnetického pole, nezávisí na parametrech prostředí
- magnetická indukce $\vec{B}$** (T)
 - indukce v materiálu

μ – permeabilita
materiálová veličina, ochota materiálu soustředit magnetické pole

μ_0 – permeabilita vakua
($4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Hm}^{-1} = 1,256 \cdot 10^{-6} \text{ Hm}^{-1}$)

μ_r – relativní permeabilita
kolikrát silnější je magnetické pole v porovnání s polem stejné intenzity ve vakuu

χ_m – magnetická susceptibilita
vyjadřuje chování látky v magnetickém poli (zesiluje/zeslabuje vnější pole)

$\vec{B} = \mu \cdot \vec{H}$

$\vec{B} = B_{\text{vnější}} + B_{\text{vnitřní}}$

$\vec{M} = \chi_m \cdot \vec{H}$

$\vec{B} = \mu_0 H + \mu_0 M$

$\vec{B} = \mu_0 \cdot (\vec{H} + \vec{M})$

$\vec{B} = \mu_0 H + \mu_0 \chi_m H$

$\vec{B} = \mu_0 (1 + \chi_m) H$

$\mu = \mu_0 \cdot \mu_r$

$\mu_r = 1 + \chi_m$

EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Vzdělávání a zaměstnanost

7

Diamagnetika

- skládají se z částic (atomů), které mají úplně vykompenzované magnetické momenty
- bez vnějšího magnetického pole nemají magnetický moment
- po vložení do mag. pole vytváří pole opačné orientace → diamagnetika **zeslabují magnetické pole**

H=0 H>0

$\chi_m < 0, \mu_r < 1$

$B_{\text{in}} < B_{\text{out}}$

- vzácné plyny, organické látky, voda, sklo, grafit, některé kovy (Cu, Au, Ag, Zn, Hg), supravodiče

EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Vzdělávání a zaměstnanost

8

Paramagnetika

- částice mají nevykompenzované momenty, tedy nenulový výsledný magnetický moment
- bez magnetického pole vlivem tepelného pohybu náhodná orientace momentů
- po vložení do mag. pole se částice orientují ve shodě s vnějším polem → paramagnetika **zesilují magnetické pole**

H=0 H>0

$\chi_m > 0, \mu_r > 1$

$B_{\text{in}} > B_{\text{out}}$

- Ti, V, Mn, Pt, Al, Mg, kyslík (O_2)
- alkalické kovy (Li, Na, K)

EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Vzdělávání a zaměstnanost

9

Porovnání diamagnetika vs. paramagnetika

	Diamagnetic	Paramagnetic
Electron pairing	$\uparrow\downarrow \uparrow\downarrow \uparrow\downarrow$ No unpaired electrons	$\uparrow\downarrow \uparrow\downarrow \uparrow$ At least one unpaired electron
Spin alignment with magnetic field B	 Anti-parallel	 Parallel
Reaction to magnets	 Very weakly repelled	 Attracted
Effect on magnetic field lines	 Field bends slightly away from the material	 Field bends toward the material

EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Vzdělávání a zaměstnanost
MŠMT
Ministerstvo školství, mládeže a tělovýchovy

10

Klasifikace magnetik

Materiál	Vlastnosti / chování v magnetickém poli
Dia-magnetikum	No field: Field: Diamagnetic V magnetickém poli jsou momenty atomů orientovány proti směru pole $\chi_m < 0, \mu_r < 1$
Para-magnetikum	No field: Field: Paramagnetic Atomy mají náhodně orientovány nenulové magnetické momenty $\chi_m > 0, \mu_r > 1$
Fero-magnetikum	No field: Field: Ferromagnetic Atomy mají magnetický moment i bez přítomnosti vnějšího magnetického pole $\chi_m \gg 0, \mu_r \gg 1$
Antifero-magnetikum	No field: Field: Antiferromagnetic V materiálu dva antiparalelně orientované systémy momentů se stejnou velikostí $\chi_m > 0, \mu_r > 1$
Feri-magnetikum	No field: Field: Ferrimagnetic V materiálu dva antiparalelně orientované systémy momentů s různou velikostí $\chi_m \gg 0, \mu_r \gg 1$

EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Vzdělávání a zaměstnanost
MŠMT
Ministerstvo školství, mládeže a tělovýchovy

11

Feromagnetika

- nenulový magnetický moment i bez přítomnosti vnějšího magnetického pole
- skupiny atomů vytvářejí v těchto látkách malé oblasti, které nazýváme **domény**
- doménová struktura se spontánní polarizací jednotlivých oblastí

Domains randomly aligned

Domains aligned with external field B_0

NdFe

$\chi_m \gg 0, \mu_r \gg 1$

$B_m \gg B_{out}$

- Fe, Ni, Co, Heuslerovy slitiny (např. Cu_2MnAl , Cu_2MnSn , Au_2MnAl , $MnBi$), gadolinium

EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Vzdělávání a zaměstnanost
MŠMT
Ministerstvo školství, mládeže a tělovýchovy

12

Doménová struktura feromagnetika

- oblasti v materiálu nichž následkem vzájemného působení atomů jsou jejich magnetické momenty uspořádány paralelně
- tyto oblasti odděleny tzv. **Blochovými stěnami**, kde dochází ke změně směru magnetického momentu

domény
Blochovy stěny
(oddělují jednotlivé domény)

demonstrace doménového uspořádání

EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program VÝZKUM, vývoj a inovace

13

Teplotní závislost magnetizace

Látka	Curieova teplota (°C)
Železo (Fe)	768
Kobalt (Co)	1 130
Nikl (Ni)	358
Oxid železitý (Fe ₂ O ₃)	622
SmCo magnety	700 – 800
NdFe magnety	310 – 400
AlNiCo magnety	700 – 850

Curieovo kyvadlo

T_c – Curieova teplota

nad T_c dochází k rozpadu domén – přeměna na paramagnetikum

EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program VÝZKUM, vývoj a inovace

14

Magnetizační křivka feromagnetika

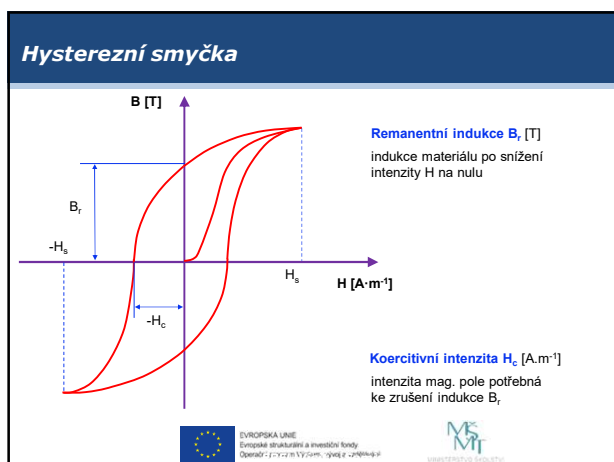
- vztah mezi vnějším magnetickým polem a magnetizací látky

křivka prvotní magnetizace

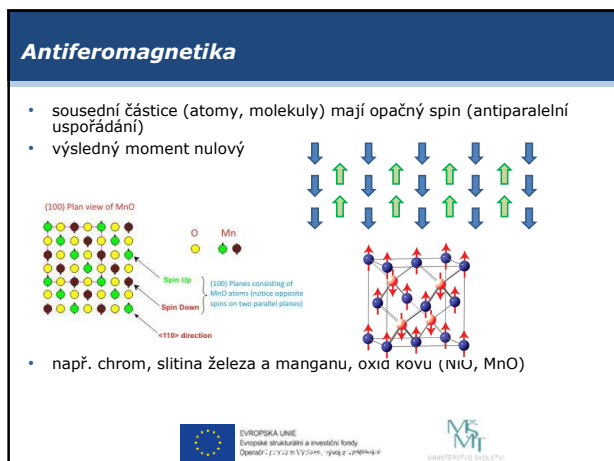
Barhausenův efekt

EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program VÝZKUM, vývoj a inovace

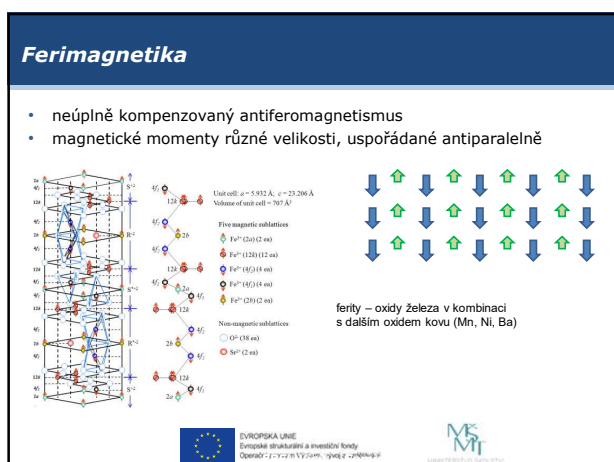
15



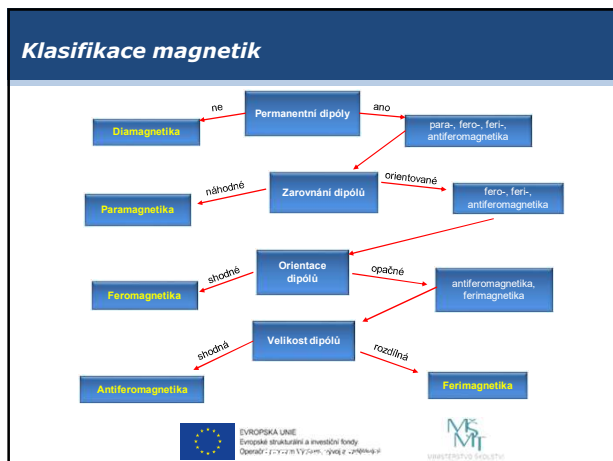
16



17



18



19

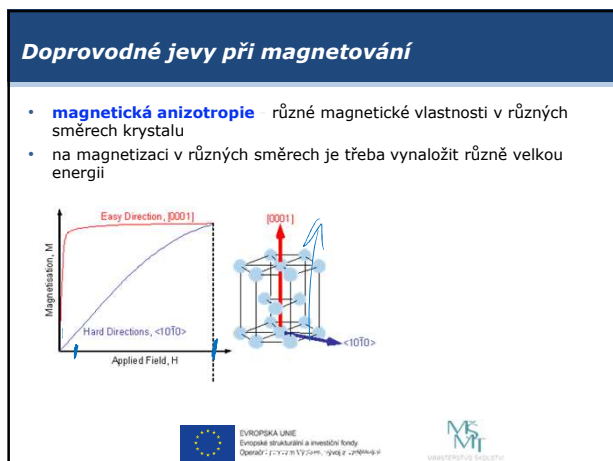
Doprovodné jevy při magnetování

- magnetostrikce** - změna rozměrů a tvaru feromagnetika při změně jeho magnetizace
- důsledek interakce elektronových spinů s vnějším mag. polem
- při pružné deformaci dochází ke změně magnetizace
- magnetostrikce
 - tvarová** (dochází k deformaci domén a prodloužení nebo zkrácení krystalu, přičemž jeho objem zůstává konstantní)
 - objemová** (změna objemu)

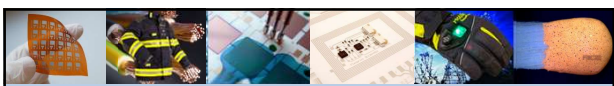
EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Vzdělávání a zaměstnanost

MT
MAGNETICKÝ TECHNOLOGICKÝ ÚSTAV

20



21



Západočeská univerzita v Plzni
Katedra materiálů a technologií

Děkuji za pozornost

 **FAKULTA
ELEKTROTECHNICKÁ
ZÁPADOČESKÉ
UNIVERZITY
V PLZNI**

 **EVROPSKÁ UNIE**
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

 **FAKULTA
ELEKTROTECHNICKÁ
ZÁPADOČESKÉ
UNIVERZITY
V PLZNI**

22
