# Obsah

0205_Elektricke_pole 0220_Magneticke_pole 0215_Optika

# 1 Elektrické pole

- Elektrické pole je prostor obklopující elektricky nabité těleso
- V tomto prostoru se projevuje působení elektrické síly
- Elektrické pole definuje Elektrická intenzita, v něm se nachází elektrický náboj mezi kterými působí Elektrická síla
- V případě, že se jednotlivé náboje uspořádaně pohybují, vzniká Elektrický proud
- Následně platí, že pokud definujeme referenční bod, lze do elektrického pole vynést Elektrický potenciál, který přímo definuje elektrické napětí
- Jakmile výše uvedené pojmy známe, lze definovat kapacitu, která vyjadřuje míru schopnosti materiálu pojmout elektrický náboj

## 1.1 Elektrické pole v látkách

### 1.1.1 Permitivita – $\varepsilon$

- Permitivita je fyzikální veličina popisující schopnost prostředí reagovat na elektrické pole
- Vyjadřuje míru polarizace prostředí vlivem elektrického pole
- Určuje vztah mezi elektrickou intenzitou a elektrickou indukcí v daném prostředí

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E}$$

- V obecném případě platí

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$$

| Symbol | Význam |
|---|---|
| $\varepsilon$ | permitivita prostředí |
| $\varepsilon_0$ | permitivita vakua |
| $\varepsilon_r$ | relativní permitivita prostředí |

- Permitivita vakua je konstantní

$$\varepsilon_0 = 8{,}85 \cdot 10^{-12}\,\mathrm{F} \cdot \mathrm{m}^{-1}$$

- Relativní permitivita charakterizuje elektrické vlastnosti látky
- Pro vakuum platí $\varepsilon_r = 1$
- V lineárním izotropním prostředí je permitivita skalární konstanta

- V nehomogenním prostředí může permitivita záviset na poloze

$$\varepsilon = \varepsilon(\vec{r})$$

- Permitivita ovlivňuje:
  - velikost elektrické intenzity v prostředí
  - kapacitu kondenzátorů
  - šíření elektromagnetických vln v látkách

### 1.1.2 Dielektrická prostředí

**a) Lineární prostředí** - Vztah mezi vektorem elektrické polarizace a intenzitou elektrického pole je lineární

$$\vec{P} = k \cdot \vec{E} = \varepsilon_0 \chi \vec{E}$$

| Symbol | Význam |
|---|---|
| $\vec{P}$ | vektor elektrické polarizace |
| $\vec{E}$ | intenzita elektrického pole |
| $k$ | konstanta úměrnosti |
| $\chi$ | elektrická susceptibilita |
| $\varepsilon_0$ | permitivita vakua |

---

**b) Nedisperzní prostředí** - Permitivit  prostředí nezávisí na frekvenci $\nu$ - Polarizace v čase $t$ závisí pouze na intenzitě elektrického pole ve stejném čase $t$

---

**c) Izotropní prostředí** - Vektor elektrické polarizace je rovnoběžný s vektorem intenzity elektrického pole

$$\vec{P} \parallel \vec{E}$$

- Prostředí má ve všech směrech stejné vlastnosti

---

**d) Homogenní prostředí** - Permitivit  je konstantní v celém objemu

$$\varepsilon = \text{konst.}$$

e) **Nehomogenní prostředí** - Permitivit  závisí na poloze v prostoru

$$\varepsilon = \varepsilon(\vec{r})$$

- Prostředí lze považovat za lokálně homogenní, pokud je permitivit konstantní na oblasti o rozměru srovnatelném s vlnovou délkou $\lambda$

---

- Nejjednodušším příkladem dielektrického prostředí je vakuum
- Vakuum je lineární, nedisperzní, izotropní a homogenní

## 1.2 Elektrická intenzita – $\vec{E}(\vec{r})$ $[V \cdot m^{-1}]$

- Elektrické pole je prostředníkem interakce mezi nabitými tělesy
- Je definováno pomocí síly působící na kladný testovací náboj

$$\vec{E}(\vec{r}) = \frac{\vec{F}(\vec{r})}{Q}$$

| Symbol | Význam |
|---|---|
| $\vec{E}$ | intenzita elektrického pole |
| $\vec{F}$ | elektrická síla |
| $Q$ | testovací náboj |

- Elektrická intenzita je jednoznačná funkce popisující elektrické pole

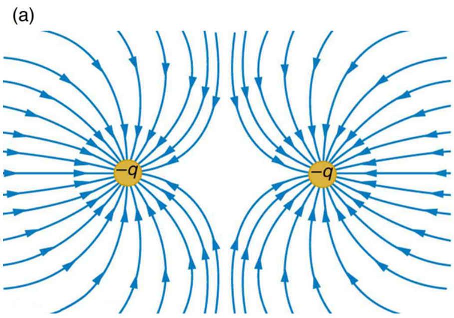
- Je-li pole vybuzeno více náboji, platí princip superpozice

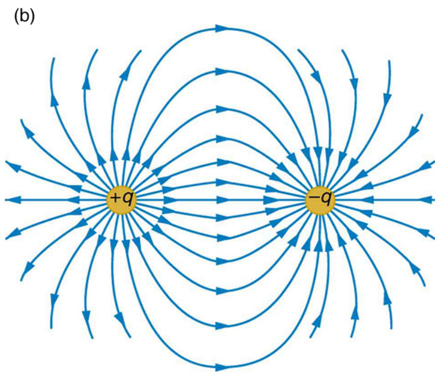
$$\vec{E}_c = \sum_{i=1}^{n} \vec{E}_i$$

| Symbol | Význam |
|---|---|
| $\vec{E}_c$ | výsledná intenzita pole |
| $\vec{E}_i$ | dílčí intenzity |

### 1.2.1 Elektrické siločáry

- Elektrické pole lze graficky znázornit pomocí elektrických siločar
- Jedná se o myšlené orientované křivky s následujícími vlastnostmi:
  - každým bodem prostoru prochází právě jedna siločára
  - siločáry se neprotínají
  - orientovaná tečna siločáry v daném bodě má směr vektoru intenzity elektrického pole $\vec{E}$
  - siločáry vycházejí z kladných nábojů a vstupují do záporných nábojů
  - siločáry mohou začínat nebo končit v nekonečnu
  - hustota siločar je úměrná velikosti elektrické intenzity




## 1.3 Tok elektrické intenzity – $\Phi_E$

- Tok elektrické intenzity popisuje množství elektrické intenzity, které prochází kolmo danou plochou
- Uvažuje se ploška tak malá, aby bylo možné intenzitu na ní považovat za konstantní
- Ploška je popsána vnějším normálovým vektorem $d\vec{S}$

### 1.3.1 Elementární tok

$$d\Phi_E = \vec{E} \cdot d\vec{S}$$

| Symbol | Význam |
|---|---|
| $d\Phi_E$ | elementární tok elektrické intenzity |
| $\vec{E}$ | intenzita elektrického pole |
| $d\vec{S}$ | orientovaný plošný element |

- Celkový tok elektrické intenzity plochou je dán plošným integrálem přes danou plochu

### 1.3.2 Gaussův zákon

- Tok elektrické intenzity uzavřenou plochou je úměrný celkovému náboji uvnitř této plochy

$$\oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{Q_{\text{uvnitr}}}{\varepsilon_0}$$

| Symbol | Význam |
|---|---|
| $\vec{E}$ | intenzita elektrického pole |
| $d\vec{S}$ | orientovaný plošný element |
| $Q_{\text{uvnitr}}$ | náboj uvnitř plochy |
| $\varepsilon_0$ | permitivita vakua |

### 1.3.3 Elektrická indukce – $\vec{D}$ $[C \cdot m^{-2}]$

- Elektrická indukce je vektorová fyzikální veličina
- Umožňuje popis elektrického pole v látkovém prostředí
- Charakterizuje elektrické pole se započtením vlivu polarizace dielektrika
- Nejedná se o děj elektromagnetické indukce, ale o fyzikální veličinu

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E} + \vec{P}$$

- Vektor elektrické polarizace $\vec{P}$ vyjadřuje vliv vázaných nábojů v dielektriku

- V lineárním izotropním prostředí platí

$$\vec{P} = \varepsilon_0 \chi \vec{E}$$

- Potom lze elektrickou indukci vyjádřit ve tvaru

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \vec{E}$$

| Symbol | Význam |
|---|---|
| $\vec{D}$ | elektrická indukce |
| $\varepsilon_0$ | permitivita vakua |
| $\varepsilon_r$ | relativní permitivita prostředí |
| $\vec{E}$ | intenzita elektrického pole |

| Symbol | Význam |
|---|---|
| $\vec{P}$ | vektor elektrické polarizace |

## 1.4 Elektrický náboj – $Q$ $[C]$

- Elektrický náboj je fyzikální vlastnost hmoty
- Projevuje se působením síly v elektromagnetickém poli
- Přítomnost elektrického náboje je nutná pro vznik elektromagnetického pole
- Analogicky je přítomnost hmoty nutná pro existenci gravitačního pole
- Podle náboje je dělíme na kladné a záporné
- Souhlasné náboje se odpuzují a naopak

---

- Nachází-li se na tělese více nábojů, je celkový náboj roven jejich algebraickému součtu

$$Q_c = \sum_{i=1}^{n} Q_i$$

| Symbol | Význam |
|---|---|
| $Q_c$ | celkový elektrický náboj tělesa |
| $Q_i$ | dílčí elektrické náboje |
| $n$ | počet nábojů |

### 1.4.1 Zákon zachování elektrického náboje

- Celkové množství elektrického náboje v elektricky izolované soustavě je konstantní
- Elektrický náboj nelze vytvořit ani zničit, pouze přemístit

### 1.4.2 Kvantování elektrického náboje

- Celkový náboj je celočíselným násobkem elementárního náboje

$$Q_e = 1{,}602 \cdot 10^{-19}\ C$$

### 1.4.3 Invariance elektrického náboje

- Velikost elektrického náboje je invariantní při transformacích vztažné soustavy
- Při pohybu se velikost náboje nemění (narozdíl od hmotnosti)

## 1.5 Elektrická síla – $\vec{F}$ $[N]$

- Elektrická síla působí na elektrický náboj vložený do elektrického pole
- Velikost síly je úměrná velikosti náboje a intenzitě elektrického pole

$$\vec{F} = Q \cdot \vec{E}$$

| Symbol | Význam |
|---|---|
| $\vec{F}$ | elektrická síla působící na náboj |
| $Q$ | elektrický náboj |
| $\vec{E}$ | intenzita elektrického pole |

- Pro kladný náboj má síla stejný směr jako $\vec{E}$, pro záporný opačný
- Pohyb bodového náboje v elektrickém poli je popsán rovnicí

$$m \cdot \vec{a} = Q \cdot \vec{E}$$

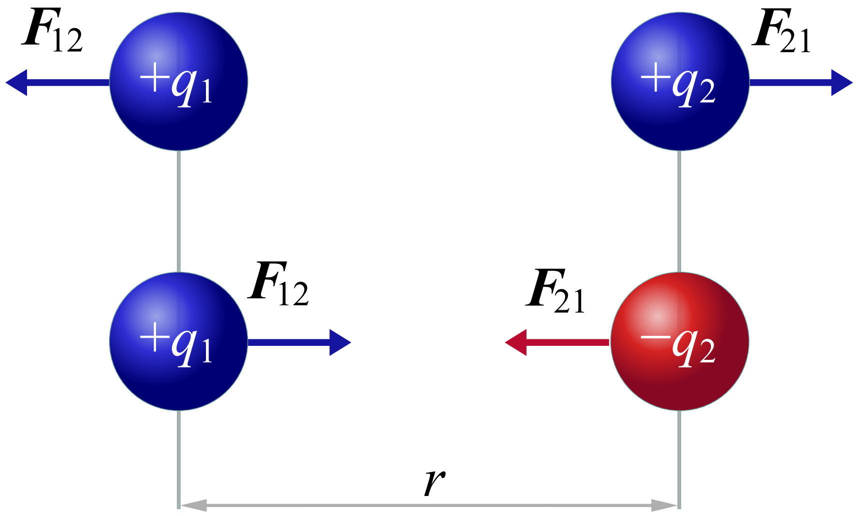
### 1.5.1 Coulombův zákon

- Mezi bodovými a stacionárními náboji působí elektrická síla

$$\vec{F}_1 = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon_r} \cdot \frac{Q_1 Q_2}{|\vec{r}_{21}|^2} \cdot \frac{\vec{r}_{21}}{|\vec{r}_{21}|}$$

| Symbol | Význam |
|---|---|
| $\vec{F}_1$ | síla působící na náboj $Q_1$ |
| $Q_1, Q_2$ | elektrické náboje |
| $\varepsilon_0$ | permitivita vakua |
| $\varepsilon_r$ | relativní permitivita prostředí |
| $\vec{r}_{21}$ | orientovaný vektor vzdálenosti mezi náboji |

- Síly působící na oba náboje jsou stejně velké a opačně orientované
- Směr síly leží na přímce spojující oba náboje




$$\left|\boldsymbol{F}_{12}\right| = \left|\boldsymbol{F}_{21}\right| = k_{\mathrm{e}} \frac{|q_1 \times q_2|}{r^2}$$

### 1.5.2 Princip superpozice sil

- Působí-li na náboj více jiných nábojů, výsledná síla je jejich vektorový součet

$$\vec{F}_c = \sum_{i=1}^{n} \vec{F}_i$$

| Symbol | Význam |
|---|---|
| $\vec{F}_c$ | výsledná elektrická síla |
| $\vec{F}_i$ | dílčí Coulombovy síly |
| $n$ | počet nábojů |

## 1.6 Elektrický potenciál – $\varphi$ $[V]$

- Skalární fyzikální veličina charakterizující elektrické pole
- Vyjadřuje potenciální energii jednotkového elektrického náboje
- Udává práci potřebnou k přenesení jednotkového náboje z referenčního bodu
- Za nulový potenciál se obvykle volí nekonečno nebo povrch Země

$$\varphi(\vec{r}_2) = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon_r} \int_V \frac{\rho(\vec{r}_1)}{|\vec{r}_2 - \vec{r}_1|}\, dV$$

| Symbol | Význam |
|---|---|
| $\varphi(\vec{r}_2)$ | elektrický potenciál v bodě $\vec{r}_2$ |
| $\rho(\vec{r}_1)$ | objemová hustota náboje |
| $\varepsilon_0$ | permitivita vakua |
| $\varepsilon_r$ | relativní permitivita prostředí |
| $\vec{r}_1, \vec{r}_2$ | polohové vektory |
| $V$ | integrační objem |

### 1.6.1 Coulombův potenciál bodového náboje

$$\varphi = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon_r} \cdot \frac{Q}{r}$$

| Symbol | Význam |
|---|---|
| $Q$ | bodový elektrický náboj |
| $r$ | vzdálenost od náboje |
| $\varepsilon_0$ | permitivita vakua |
| $\varepsilon_r$ | relativní permitivita prostředí |

### 1.6.2 Vztah intenzity pole a potenciálu

- Elektrická intenzita je dána záporným gradientem elektrického potenciálu
$$\vec{E} = -\nabla\varphi$$

| Symbol | Význam |
|---|---|
| $\vec{E}$ | intenzita elektrického pole |
| $\nabla\varphi$ | gradient elektrického potenciálu |

### 1.6.3 Poissonova a Laplaceova rovnice

- Dosazením vztahu mezi intenzitou pole a potenciálem do Gaussova zákona vzniká Poissonova rovnice
$$\nabla^2\varphi = -\frac{\rho}{\varepsilon_0}$$

| Symbol | Význam |
|---|---|
| $\nabla^2\varphi$ | Laplaceův operátor |
| $\rho$ | hustota elektrického náboje |
| $\varepsilon_0$ | permitivita vakua |

- V případě, kdy v prostoru není přítomen elektrický náboj ($\rho = 0$), přechází Poissonova rovnice v Laplaceovu rovnici

$$\nabla^2\varphi = 0$$

### 1.6.4 Potenciální energie elektrického pole

- Potenciální energie elektrického náboje v elektrickém poli je dána elektrickým potenciálem

$$E_p = Q \cdot \varphi$$

| Symbol | Význam |
|---|---|
| $E_p$ | potenciální energie |
| $Q$ | elektrický náboj |
| $\varphi$ | elektrický potenciál |

### 1.6.5 Elektrické napětí – $U$ $[V]$

- Elektrické napětí je rozdíl elektrických potenciálů mezi dvěma body

$$U = \varphi_1 - \varphi_2$$

| Symbol | Význam |
|---|---|
| $U$ | elektrické napětí |
| $\varphi_i$ | elektrický potenciál v bodě i |

## 1.7 Elektrická kapacita – $C$ $[F]$

- Elektrická kapacita vyjadřuje schopnost vodivého tělesa shromažďovat elektrický náboj
- Jedná se o vlastnost každého vodiče

$$C = \frac{Q}{\varphi}$$

| Symbol | Význam |
|---|---|
| $C$ | elektrická kapacita |
| $Q$ | elektrický náboj |
| $\varphi$ | elektrický potenciál vodiče |

### 1.7.1 Kondenzátor

- Kondenzátor je soustava vzájemně izolovaných vodivých těles
- V elektrotechnické praxi se jedná o dvojpólovou součástku s definovanou kapacitou
- U kondenzátoru se uvažuje rozdíl potenciálů mezi elektrodami

$$C = \frac{Q}{\varphi_1 - \varphi_2} = \frac{Q}{U}$$

| Symbol | Význam |
|---|---|
| $C$ | kapacita kondenzátoru |
| $Q$ | náboj na elektrodách |
| $U$ | napětí mezi elektrodami |

#### Deskový kondenzátor

- Nejčastější technická realizace kondenzátoru
- Kapacita závisí na geometrii a vlastnostech dielektrika

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{S}{d}$$

| Symbol | Význam |
|---|---|
| $\varepsilon_0$ | permitivita vakua |
| $\varepsilon_r$ | relativní permitivita dielektrika |
| $S$ | plocha překryvu desek |
| $d$ | vzdálenost desek |

### 1.7.2 Energie elektrického pole kondenzátoru – $W_E$ $[J]$

- Energie uložená v nabitém kondenzátoru

$$W_E = \frac{1}{2}CU^2$$

| Symbol | Význam |
|---|---|
| $W_E$ | energie elektrického pole |
| $C$ | kapacita kondenzátoru |
| $U$ | napětí mezi elektrodami |

---

### 1.7.3 Síla mezi deskami kondenzátoru – $\vec{F}_K$ $[N]$

- Desky kondenzátoru jsou nabity opačnými náboji
- Mezi deskami proto působí přitažlivá elektrická síla

$$|\vec{F}_K| = \frac{1}{2}\varepsilon_0\varepsilon_r\frac{S \cdot U^2}{d^2} = \frac{W_E}{d}$$

| Symbol | Význam |
|---|---|
| $\vec{F}_K$ | síla mezi deskami kondenzátoru |
| $\varepsilon_0$ | permitivita vakua |
| $\varepsilon_r$ | relativní permitivita dielektrika |
| $S$ | plocha desek |
| $U$ | napětí |
| $d$ | vzdálenost desek |
| $W_E$ | energie elektrického pole |

## 1.8 Elektrický proud – $I$ $[A]$

- Elektrický proud je uspořádaný pohyb elektrických nábojů
- Je definován jako časová změna elektrického náboje

$$I = \frac{dQ}{dt}$$

| Symbol | Význam |
|---|---|
| $I$ | elektrický proud |
| $Q$ | elektrický náboj |
| $t$ | čas |

### 1.8.1 Proudová hustota – $\vec{J}$ $[A \cdot m^{-2}]$

- Proudová hustota popisuje lokální rozložení elektrického proudu v prostoru

$$\vec{J} = \rho \cdot \vec{v}$$

| Symbol | Význam |
|---|---|
| $\vec{J}$ | proudová hustota |
| $\rho$ | hustota elektrického náboje |
| $\vec{v}$ | driftová rychlost nábojů |

# 2 Magnetické pole

- Magnetické pole je fyzikální pole, jehož zdrojem je pohybující se elektrický náboj
- V technické praxi je zdrojem magnetického pole elektrický proud
- Magnetické pole se vyskytuje:
- v okolí vodičů s elektrickým proudem (volné elektrické proudy)
- v okolí permanentních magnetů (vázané elektrické proudy)
- Magnetické pole je vektorové pole charakterizované magnetickou indukcí

---

### 2.0.1 Intenzita magnetického pole – $\vec{H}$

- Intenzita magnetického pole popisuje magnetické pole z hlediska vnějších proudů

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

### Intenzita magnetického pole – $\vec{H}$ $[A \cdot m^{-1}]$ - Intenzita magnetického pole je vektorová fyzikální veličina - Popisuje silové účinky magnetického pole pouze z hlediska vnějších zdrojů - Vnějšími zdroji jsou volné elektrické proudy

$$\vec{B} = \mu_0 \mu_r \vec{H} + \vec{J}$$

| Symbol | Význam |
|---|---|
| $\vec{B}$ | magnetická indukce |
| $\mu_0$ | permeabilita vakua |
| $\mu_r$ | relativní permeabilita prostředí |
| $\vec{H}$ | intenzita magnetického pole |
| $\vec{J}$ | vektor magnetické polarizace |

- Ve většině případů se uvažuje $\vec{J} = 0$

---

### 2.0.2 Permitivita - $\mu$

- doplnit
-

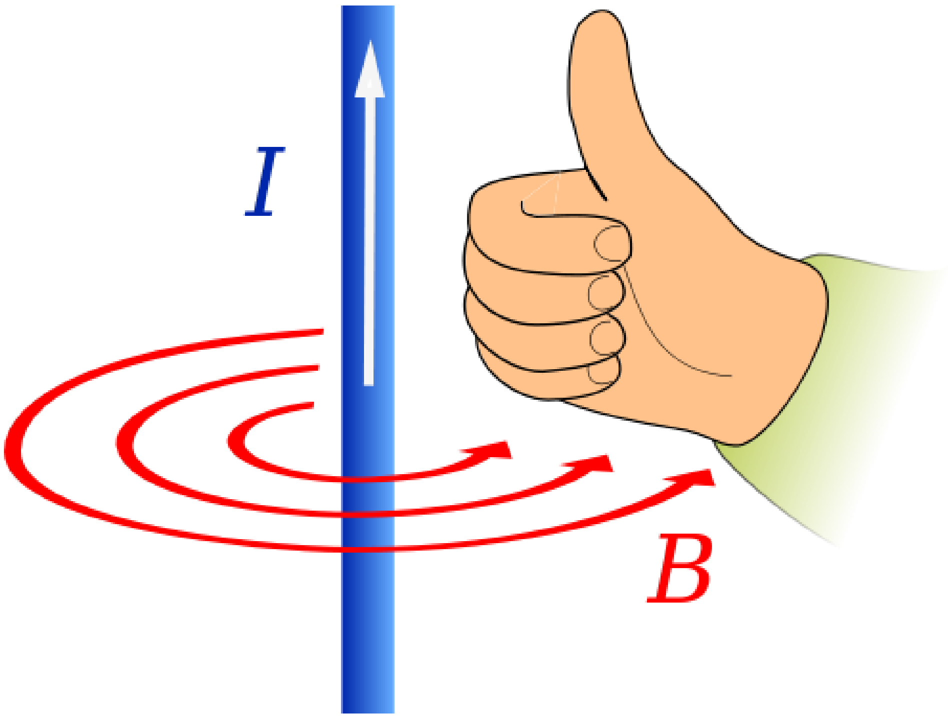
**a) Diamagnetika** - Látky, jejichž částice mají nulový magnetický moment - V magnetickém poli jsou slabě vytlačovány ven - Relativní permeabilita splňuje $\mu_r < 1$

**b) Paramagnetika** - Látky s nenulovým magnetickým momentem částic - Magnetické momenty jsou bez vnějšího pole orientovány náhodně - Výsledný magnetický moment je nulový - V magnetickém poli jsou slabě vtahovány dovnitř - Relativní permeabilita splňuje $\mu_r > 1$

**c) Feromagnetika** - Látky obsahující magnetické domény - V doménách jsou magnetické dipóly orientovány shodně - Bez vnějšího pole jsou domény orientovány náhodně - Ve vnějším magnetickém poli dochází k jejich orientaci - Po odeznění pole: - magneticky měkká feromagnetika ztrácí magnetizaci - magneticky tvrdá feromagnetika zůstávají trvale zmagnetována - Relativní permeabilita splňuje $\mu_r \gg 1$ - Feromagnetika jsou intenzivně vtahována do magnetického pole

## 2.1 Magnetická indukce – $\vec{B}$ $[T]$

- Magnetická indukce popisuje silové účinky magnetického pole
- Udává působení magnetického pole na pohybující se nabitou částici



### 2.1.1 Biot–Savartův zákon

- Magnetickou indukci vyvolanou pohybujícím se nábojem nebo proudem protékajícím vodičem charakterizuje Biot–Savartův zákon

$$\vec{B}(\vec{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_k \frac{I \cdot d\vec{l} \times \vec{r}\,'}{|\vec{r}\,'|^3}$$

| Symbol | Význam |
|---|---|
| $\vec{B}(\vec{r})$ | magnetická indukce v bodě $\vec{r}$ |
| $\mu_0$ | permeabilita vakua |
| $I$ | elektrický proud tekoucí vodičem |
| $d\vec{l}$ | element délky vodiče |
| $\vec{r}\,'$ | vektor od elementu vodiče do bodu pozorování |
| $k$ | parametrická křivka odpovídající tvaru vodiče |

- Vektor $\vec{r}\,'$ je definován vztahem $\vec{r}\,' = \vec{r} - \vec{l}$ (Vektor $\vec{r}\,'$ směřuje od elementu vodiče do bodu pozorování)

### 2.1.2 Magnetické pole přímého vodiče

- Ve zjednodušeném případě velmi dlouhého přímého vodiče s proudem lze magnetickou indukci vyjádřit vztahem

$$|\vec{B}| = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{I}{d}$$

| Symbol | Význam |
|---|---|
| $\vec{B}$ | velikost magnetické indukce |
| $\mu_0$ | permeabilita vakua |
| $I$ | elektrický proud |
| $d$ | vzdálenost od vodiče |

- Směr magnetické indukce závisí na orientaci proudu
- Směr lze určit pomocí Ampérova pravidla pravé ruky

### 2.1.3 Magnetické indukční čáry

- K popisu magnetického pole v technické praxi používáme magnetické indukční čáry

- Jedná se o uzavřené, neprotínající se orientované křivky

- Tečna indukční čáry v daném bodě má směr vektoru magnetické indukce $\vec{B}$
- Hustota indukčních čar je úměrná velikosti magnetické indukce
- Existuje přímá analogie s elektrickými siločarami

## 2.2 Magnetický indukční tok – $\Phi$ $[Wb]$

- Magnetický indukční tok vyjadřuje celkový tok magnetické indukce skrz plochu
- Je mírou celkového počtu magnetických indukčních čar procházejících plochou

$$\Phi = \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S}$$

| Symbol | Význam |
|---|---|
| $\Phi$ | magnetický indukční tok |
| $\vec{B}$ | magnetická indukce |
| $d\vec{S}$ | element orientované plochy |
| $S$ | plocha, kterou tok prochází |

- Je-li magnetická indukce homogenní a plocha rovinná, platí zjednodušený vztah
$$\Phi = B \cdot S \cdot \cos\alpha$$

| Symbol | Význam |
|---|---|
| $B$ | velikost magnetické indukce |
| $S$ | obsah plochy |
| $\alpha$ | úhel mezi normálou plochy a vektorem $\vec{B}$ |

## 2.3 Lorentzova síla – $\vec{F}_L$ $[N]$

- Síla působící na elektrický náboj pohybující se v elektrickém a magnetickém poli
$$\vec{F}_L = Q \cdot (\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$$

| Symbol | Význam |
|---|---|
| $\vec{F}_L$ | Lorentzova síla |
| $Q$ | elektrický náboj |
| $\vec{E}$ | intenzita elektrického pole |
| $\vec{v}$ | rychlost pohybu náboje |
| $\vec{B}$ | magnetická indukce |

- Magnetická složka Lorentzovy síly působí pouze na pohybující se náboj
- Směr magnetické síly je kolmý na směr $\vec{v}$ i $\vec{B}$

### 2.3.1 Ampérův zákon síly

- Za předpokladu nulového elektrického pole ($\vec{E} = 0$) působí na vodič s proudem v magnetickém poli síla

$$\vec{F}_A = I \cdot \int_k d\vec{l} \times \vec{B}$$

| Symbol | Význam |
|---|---|
| $\vec{F}_A$ | magnetická síla působící na vodič |
| $I$ | elektrický proud |
| $d\vec{l}$ | orientovaný element vodiče |
| $\vec{B}$ | magnetická indukce |
| $k$ | tvar vodiče |

- Integrace probíhá po celé délce vodiče

#### Síla působící na vodič s proudem

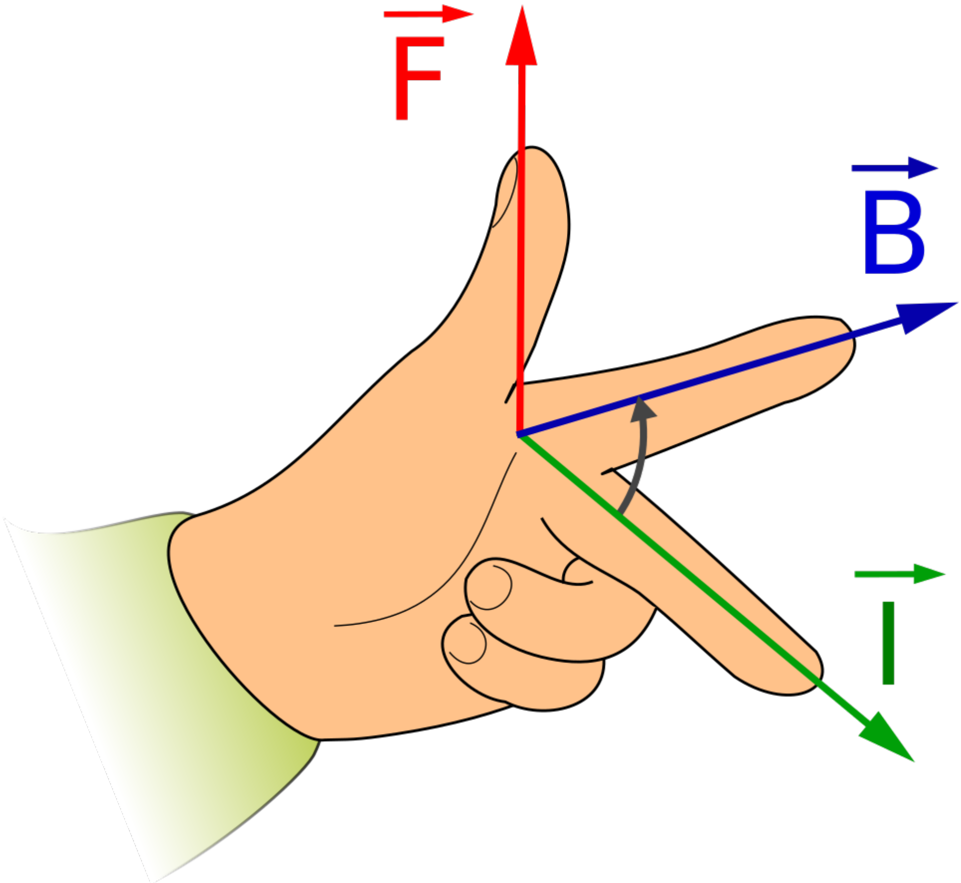
- Pro přímý úsek vodiče v homogenním magnetickém poli lze vztah zjednodušit

$$\vec{F}_A = I \cdot \vec{l} \times \vec{B}$$

| Symbol | Význam |
|---|---|
| $\vec{l}$ | orientovaný vektor délky vodiče |

#### Flemingovo pravidlo levé ruky

- Slouží k určení směru magnetické síly působící na vodič s proudem




## 2.4 Indukčnost – $L$ $[H]$

- Indukčnost vyjadřuje schopnost elektricky vodivých těles protékaných proudem vytvářet magnetické pole
- Závisí na geometrickém uspořádání vodičů a vlastnostech prostředí
- Indukčnost tenké vodivé smyčky je definována jako podíl magnetického indukčního toku a proudu, který jej vyvolal

$$L = \frac{\Phi}{I}$$

| Symbol | Význam |
|---|---|
| $L$ | indukčnost |
| $\Phi$ | magnetický indukční tok |

| Symbol | Význam |
|---|---|
| $I$ | elektrický proud |

- Cívka tvořená $N$ závity má indukčnost $N$-násobnou

### 2.4.1 Energie magnetického pole – $W_M$ $[J]$

- Energie uložená v magnetickém poli cívky v magneticky lineárním prostředí

$$W_M = \frac{1}{2}LI^2$$

| Symbol | Význam |
|---|---|
| $W_M$ | energie magnetického pole |
| $L$ | indukčnost |
| $I$ | elektrický proud |

### 2.4.2 Solenoid

- Speciální typ cívky s velkým počtem závitů
- Délka solenoidu je výrazně větší než jeho průměr
- Okrajové jevy lze zanedbat
- Indukčnost solenoidu je dána vztahem

$$L = \mu_0\mu_r\frac{N^2S}{l}$$

| Symbol | Význam |
|---|---|
| $\mu_0$ | permeabilita vakua |
| $\mu_r$ | relativní permeabilita prostředí |
| $N$ | počet závitů |
| $S$ | plocha průřezu solenoidu |
| $l$ | délka solenoidu |

### 2.4.3 LC obvod

- Spojením cívky s indukčností $L$ a kondenzátoru s kapacitou $C$ vzniká rezonanční obvod

- Rezonanční frekvence LC obvodu je dána Thomsonovým vztahem

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

| Symbol | Význam |
|---|---|
| $f_r$ | rezonanční frekvence |
| $L$ | indukčnost |
| $C$ | kapacita |

# 3 Optika

- optika se dělí na paprskovou, vlnovou a elektromagnetickou, která první dvě spojuje

## 3.1 Paprsková optika

### 3.1.1 Postuláty paprskové optiky

1) Světlo se skrz optické prostředí šíří ve formě paprsků

- Paprsky jsou emitovány světelnými zdroji

- Paprsky lze pozorovat po dopadu na optický detektor (oko, CCD čip)

---

1) Optické prostředí je charakterizováno indexem lomu

$$n = \frac{c_0}{c}$$

| Symbol | Význam |
|---|---|
| $n$ | index lomu prostředí |
| $c_0$ | rychlost světla ve vakuu |
| $c$ | rychlost světla v prostředí |

- Index lomu splňuje $n \geq 1$
- V obecném nehomogenním prostředí platí $n = n(\vec{r})$

---

3) Délka optické dráhy – $l$

- Optická dráha vyjadřuje **čas šíření světla**, nikoli skutečnou geometrickou délku trajektorie
- Je definována jako vzdálenost, kterou by světlo **urazilo ve vakuu za stejný čas**, jaký potřebuje k průchodu daným prostředím
- Slouží k porovnání šíření světla v různých prostředích z hlediska doby šíření

$$l = \int_A^B n(\vec{r}) \cdot ds$$

| Symbol | Význam |
|---|---|
| $l$ | délka optické dráhy |
| $n(\vec{r})$ | prostorově závislý index lomu |
| $ds$ | element trajektorie |
| $A, B$ | krajní body dráhy |

- Index lomu $n$ vyjadřuje, **kolikrát je světlo v prostředí pomalejší než ve vakuu**
- V prostředí s větším indexem lomu se světlo šíří pomaleji, a proto má **větší optickou dráhu**
- Ve vakuu ($n = 1$) je optická dráha **nejkratší**, protože světlo se šíří nejrychleji
- V homogenním prostředí s konstantním indexem lomu platí

$$l = n \cdot s$$

| Symbol | Význam |
|---|---|
| $s$ | geometrická délka dráhy |
| $n$ | index lomu prostředí |

- Pro stejnou geometrickou dráhu $s$ platí:
  - větší $n$ $\rightarrow$ větší $l$ $\rightarrow$ delší doba šíření
  - menší $n$ $\rightarrow$ menší $l$ $\rightarrow$ kratší doba šíření
- Optická dráha je klíčová veličina ve Fermatově principu, kde světlo volí trajektorii s **extrémní (nejčastěji minimální) optickou dráhou** ***

4) **Fermatův princip**

- Paprsek se šíří mezi dvěma body po takové dráze, aby **optická dráha** měla extrémní hodnotu
- Ve většině fyzikálních situací se jedná o **minimum optické dráhy**
- Princip je ekvivalentní tvrzení, že **světlo se šíří po dráze s extrémní (nejčastěji minimální) dobou šíření**

$$\delta \int_A^B n(\vec{r}) \cdot ds = 0$$

| Symbol | Význam |
|---|---|
| $\delta$ | variace dráhy |
| $n(\vec{r})$ | prostorově závislý index lomu |
| $ds$ | element trajektorie |
| $A, B$ | krajní body dráhy |

- Index lomu určuje rychlost šíření světla v prostředí

$$n = \frac{c_0}{c}$$

- V prostředí s větším indexem lomu se světlo šíří pomaleji
- Pokud světlo vstoupí do prostředí s vyšším indexem lomu, **nemůže si dovolit „zdržovat se" dlouhou geometrickou dráhou**
- Proto volí takovou trajektorii, aby byla **optická dráha minimální**, i za cenu změny směru šíření
- Lom světla je přímým důsledkem Fermatova principu:
  - změna indexu lomu vede ke změně rychlosti šíření
  - světlo mění směr tak, aby minimalizovalo optickou dráhu (resp. dobu šíření)
- V homogenním prostředí s konstantním indexem lomu platí

$$n = \text{konst.}$$

- Potom Fermatův princip přechází v přímočaré šíření světla, protože nejkratší optická dráha odpovídá nejkratší geometrické dráze ### Odraz světla
- Úhel dopadu je roven úhlu odrazu

$$\alpha = \alpha'$$

- Dopadající paprsek, odražený paprsek a kolmice k rozhraní leží v jedné rovině

### 3.1.2 Lom světla

- Lom světla nastává na rozhraní dvou optických prostředí s indexy lomu $n_1$ a $n_2$
- Lom je popsán Snellovým zákonem

**Snellův zákon**

$$\frac{\sin\alpha_1}{\sin\alpha_2} = \frac{n_2}{n_1} = n_{21}$$

| Symbol | Význam |
|---|---|
| $\alpha_1$ | úhel dopadu |
| $\alpha_2$ | úhel lomu |
| $n_1$ | index lomu prvního prostředí |
| $n_2$ | index lomu druhého prostředí |
| $n_{21}$ | relativní index lomu |

**Komplexní index lomu**

- Používá se pro popis ztrátového optického prostředí
- Umožňuje současně popsat:
  - rychlost šíření světla v prostředí
  - zeslabení amplitudy vlivem absorpce

$$\hat{n} = n + i \cdot \beta$$

| Symbol | Význam |
|---|---|
| $\hat{n}$ | komplexní index lomu |
| $n$ | reálná část indexu lomu |
| $\beta$ | koeficient absorpce (extinkční koeficient) |

- Reálná část $n$ určuje rychlost šíření světla v prostředí

$$c = \frac{c_0}{n}$$

- Imaginární část $\beta$ popisuje absorpci záření v prostředí

- Přítomnost $\beta \neq 0$ vede k exponenciálnímu poklesu amplitudy elektromagnetické vlny

- Pro neztrátové prostředí platí

$$\beta = 0$$

### 3.1.3 Totální reflexe

- Nastává při přechodu světla z opticky hustšího prostředí do opticky řidšího
- Mezní úhel nastává v případě, kdy

$$\alpha_2 = \frac{\pi}{2}$$

- Platí vztah pro mezní úhel

$$\sin \alpha_m = \frac{n_2}{n_1}$$

| Symbol | Význam |
|---|---|
| $\alpha_m$ | mezní úhel |
| $n_1$ | index lomu hustšího prostředí |
| $n_2$ | index lomu řidšího prostředí |

- Při překročení mezního úhlu dochází k totální reflexi
- Paprsek se zcela odrazí zpět do prvního prostředí

## 3.2 Vlnová optika

- Paprsková optika je mezním případem vlnové optiky pro vlnovou délku $\lambda \to 0$
- Toto přiblížení je vhodné, pokud jsou rozměry objektů mnohem větší než vlnová délka světla
- Ve vlnové optice je světlo popsáno skalární vlnovou funkcí

### 3.2.1 Postuláty vlnové optiky

1) Světlo se šíří ve formě vln
    - Ve vakuu se šíří rychlostí $c_0$
2) Homogenní prostředí je charakterizováno indexem lomu $n$
3) Optická vlna je popsána vlnovou funkcí $u(\vec{r}, t)$
    - Funkce vyhovuje vlnové rovnici
    - Platí princip superpozice

### 3.2.2 Vlnová funkce – $u(\vec{r}, t)$

- Světlo je popsáno reálnou funkcí polohy a času
- Polohový vektor je definován jako $\vec{r} = (x, y, z)$
- Vlnová funkce splňuje vlnovou rovnici

$$\nabla^2 u - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = 0$$

| Symbol | Význam |
|---|---|
| $u(\vec{r}, t)$ | vlnová funkce |
| $\nabla^2$ | Laplaceův operátor |
| $c$ | rychlost šíření světla |
| $t$ | čas |

- Každá funkce splňující tuto rovnici popisuje možnou optickou vlnu
- Vlnová rovnice je lineární, platí princip superpozice

### 3.2.3 Komplexní vlnová funkce – $\hat{U}(\vec{r}, t)$

- Pro zjednodušení výpočtů se zavádí komplexní formalismus
- Reálná vlnová funkce je vyjádřena pomocí komplexní funkce

$$\hat{U}(\vec{r}, t) = a(\vec{r}) \cdot e^{i\varphi(\vec{r})} \cdot e^{i2\pi\nu t}$$

- Reálná vlnová funkce je dána reálnou částí komplexní funkce

$$u(\vec{r}, t) = \frac{1}{2} \left[ \hat{U}(\vec{r}, t) + \hat{U}^*(\vec{r}, t) \right]$$

| Symbol | Význam |
|---|---|
| $\hat{U}$ | komplexní vlnová funkce |
| $\hat{U}^*$ | komplexně sdružená funkce |
| $a(\vec{r})$ | amplituda |
| $\varphi(\vec{r})$ | fáze |
| $\nu$ | frekvence |

### 3.2.4 Optická intenzita – $I$ $[W \cdot m^{-2}]$

- Fyzikální smysl vlnové funkce není přímo definován
- Měřitelnou veličinou je optická intenzita
- Vyjádřená jako časové středování vlnové funkce

$$I(\vec{r}, t) = 2 \cdot \langle u^2(\vec{r}, t) \rangle$$

| Symbol | Význam |
|---|---|
| $I$ | optická intenzita |
| $u(\vec{r}, t)$ | vlnová funkce |
| $\langle \cdot \rangle$ | časové středování |

- Optická intenzita je optický výkon na jednotku plochy

### 3.2.5 Helmholtzova rovnice

- Komplexní vlnová funkce splňuje vlnovou rovnici
- Předpokládáme **časově harmonické (stacionární) řešení**, kdy časová závislost má harmonický tvar
- Oddělením časové a prostorové závislosti dostáváme Helmholtzovu rovnici

$$\hat{U}(\vec{r}, t) = \hat{U}(\vec{r}) \cdot e^{i2\pi\nu t}$$

- Funkce $\hat{U}(\vec{r})$ je komplexní amplituda, která **nezávisí na čase**
- Časová závislost je plně obsažena v exponenciálním členu

Dosazením do vlnové rovnice získáme prostorovou rovnici

$$(\nabla^2 + k^2) \cdot \hat{U}(\vec{r}) = 0$$

| Symbol | Význam |
|---|---|
| $\hat{U}(\vec{r})$ | komplexní amplituda |
| $k$ | vlnové číslo |
| $\nabla^2$ | Laplaceův operátor |

- Vlnové číslo je definováno vztahem

$$k = \frac{2\pi\nu}{c} = \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi}{\lambda}$$

| Symbol | Význam |
|---|---|
| $k$ | vlnové číslo |
| $\nu$ | frekvence |
| $\omega$ | kruhová frekvence |
| $c$ | rychlost šíření vlny |
| $\lambda$ | vlnová délka |

### 3.2.6 Monochromatická vlna

- Monochromatická vlna má jedinou frekvenci
- Vlnová funkce má harmonickou časovou závislost

$$u(\vec{r}, t) = a(\vec{r}) \cdot \cos\left[2\pi\nu t + \varphi(\vec{r})\right]$$

| Symbol | Význam |
|---|---|
| $u(\vec{r}, t)$ | reálná vlnová funkce |
| $a(\vec{r})$ | amplituda vlnění |
| $\nu$ | frekvence |
| $\varphi(\vec{r})$ | fáze vlny |

### 3.2.7 Rovinná vlna

- Nejjednodušší řešení Helmholtzovy rovnice v homogenním prostředí

$$\hat{U}(\vec{r}) = A_0 \cdot e^{-i\vec{k}\cdot\vec{r}}$$

| Symbol | Význam |
|---|---|
| $A_0$ | komplexní obálka |
| $\vec{k}$ | vlnový vektor |
| $\vec{r}$ | polohový vektor |

- Platí vztah $|\vec{k}| = k$
- Vlnoplochy jsou roviny kolmé na vlnový vektor
- Směr $\vec{k}$ určuje směr šíření vlny
- Vzdálenost vlnoploch odpovídá vlnové délce

### 3.2.8 Sférická vlna

- Další jednoduché řešení Helmholtzovy rovnice
- Vlna se šíří radiálně od bodového zdroje

$$\hat{U}(\vec{r}) = \frac{A_0}{r} \cdot e^{-ikr}$$

| Symbol | Význam |
|---|---|
| $\hat{U}(\vec{r})$ | komplexní amplituda vlny |
| $A_0$ | komplexní obálka |
| $r$ | vzdálenost od zdroje |
| $k$ | vlnové číslo |

- Vlnoplochy jsou kulové plochy
- Vlnoplochy jsou od sebe vzdáleny o vlnovou délku $\lambda$
- Vlna se šíří fázovou rychlostí $c$ ### Fresnelovo přiblížení
- Uvažujme sférickou vlnu vznikající v počátku souřadné soustavy
- Vlna je pozorována:
  - dostatečně daleko od zdroje
  - v bodech blízko osy $z$
- Platí aproximační podmínka

$$\sqrt{x^2 + y^2} \ll z$$

- Sférickou vlnu lze aproximovat parabolickou vlnou

$$\hat{U}(\vec{r}) \approx \frac{A_0}{z} \cdot e^{-ikz} \cdot e^{-ik\frac{x^2+y^2}{2z}}$$

| Symbol | Význam |
|---|---|
| $x, y, z$ | kartézské souřadnice |
| $A_0$ | komplexní obálka |
| $k$ | vlnové číslo |
| $z$ | vzdálenost ve směru šíření |

### 3.2.9 Interference

- Interference vzniká při skládání dvou nebo více vln
- Pro vznik interference musí být splněny následující podmínky:
  - zdroje vlnění jsou koherentní (stejná frekvence a fáze)
  - vlnění je monochromatické
  - platí princip superpozice
  - vlny mají stejnou polarizaci
- Za běžných podmínek (např. sluneční světlo) interference obvykle pozorovatelná není

### 3.2.10 Interferenční rovnice

- Výsledná intenzita interferujících vln není prostým součtem jejich intenzit
- Mějme dvě monochromatické vlny s komplexními amplitudami $\hat{U}_1(\vec{r})$ a $\hat{U}_2(\vec{r})$
- Výsledná komplexní amplituda je dána superpozicí

$$\hat{U}(\vec{r}) = \hat{U}_1(\vec{r}) + \hat{U}_2(\vec{r})$$

- Výsledná intenzita je dána vztahem

$$I = |\hat{U}(\vec{r})|^2$$

- Po dosazení dostáváme interferenční rovnici

$$I = I_1 + I_2 + 2 \cdot \sqrt{I_1 I_2} \cdot \cos\varphi$$

| Symbol | Význam |
|---|---|
| $I$ | výsledná intenzita |
| $I_1, I_2$ | intenzity jednotlivých vln |
| $\varphi$ | fázový rozdíl vln |

- Fázový rozdíl je definován vztahem $\varphi = \varphi_2 - \varphi_1$
- Pro $\varphi = 0$ nastává konstruktivní interference
- Pro $\varphi = \pi$ nastává destruktivní interference

### 3.2.11 Interference dvou rovninných vln

- Mějme dvě rovinné vlny, obě s intenzitou $I_0$
- Obě vlny se šíří ve směru osy $z$
- Jedna vlna je vůči druhé posunuta o vzdálenost $d$
- Komplexní amplitudy obou vln lze zapsat ve tvaru

$$\hat{U}_1 = \sqrt{I_0} \cdot e^{-ikz}$$
$$\hat{U}_2 = \sqrt{I_0} \cdot e^{-ik(z-d)}$$

- Dosazením do interferenční rovnice dostáváme výslednou intenzitu

$$I = 2I_0 \left[1 + \cos\left(\frac{2\pi d}{\lambda}\right)\right]$$

| Symbol | Význam |
|---|---|
| $I$ | výsledná intenzita |
| $I_0$ | intenzita jednotlivé vlny |
| $d$ | rozdíl optických drah |
| $\lambda$ | vlnová délka |

- Výsledná intenzita je velmi citlivá na změny $d$ v řádu vlnové délky
- Tento jev se využívá v interferometrech

## 3.3 Elektromagnetická optika

- Pomocí vlnové optiky nelze vysvětlit jevy jako polarizace nebo dvojlom v anizotropním prostředí
- Světlo proto musí být popsáno jako elektromagnetické vlnění
- Na rozdíl od vlnové optiky není světlo popsáno skalární funkcí, ale vektorovým polem

### 3.3.1 Postuláty elektromagnetické optiky

1) Světlo je elektromagnetické vlnění popsané Maxwellovými rovnicemi

- Pro látkové prostředí bez volných nábojů platí

$$\text{rot } \vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$$

$$\text{rot } \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

$$\text{div } \vec{D} = 0$$

$$\text{div } \vec{B} = 0$$

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \vec{E}$$

$$\vec{B} = \mu_0 \mu_r \vec{H}$$

- Pro vakuum lze vztahy zjednodušit

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E}$$

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

2) Elektrické a magnetické pole splňují vlnovou rovnici

- Každá složka vektorů $\vec{E}$ a $\vec{H}$ vyhovuje vlnové rovnici

$$\nabla^2 \vec{E} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0$$

$$\nabla^2 \vec{H} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2} = 0$$

- Rychlost šíření elektromagnetické vlny je dána vztahem

$$c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \varepsilon_r \mu_0 \mu_r}}$$

- Pro vakuum platí

$$c_0 = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}}$$

- Index lomu lze vyjádřit vztahem

$$n = \sqrt{\varepsilon_r}$$

3) Platí princip superpozice

### 3.3.2 Maxwellovy rovnice

- Maxwellovy rovnice představují kompletní klasický popis elektromagnetického pole
- Jsou zde uvedeny v nejjednodušším tvaru pro vakuum
- Platí podmínky $\varepsilon_r = 1$ a $\mu_r = 1$

1) Rotace magnetického pole je vyvolána elektrickým proudem a časovou změnou elektrického pole

$$rot\,\vec{B} = \mu_0 \left( \vec{j} + \varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right)$$

| Symbol | Význam |
|---|---|
| $\vec{B}$ | magnetická indukce |
| $\vec{j}$ | proudová hustota |
| $\vec{E}$ | intenzita elektrického pole |
| $\mu_0$ | permeabilita vakua |
| $\varepsilon_0$ | permitivita vakua |
| $t$ | čas |

---

2) Časová změna magnetické indukce vyvolává elektrické pole

$$rot\,\vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

| Symbol | Význam |
|---|---|
| $\vec{E}$ | intenzita elektrického pole |
| $\vec{B}$ | magnetická indukce |
| $t$ | čas |

---

3) Zdrojem elektrického pole jsou prostorově rozložené elektrické náboje

$$div\,\vec{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0}$$

| Symbol | Význam |
|---|---|
| $\vec{E}$ | intenzita elektrického pole |
| $\rho$ | hustota elektrického náboje |
| $\varepsilon_0$ | permitivita vakua |

4) Neexistují magnetické monopóly a magnetické pole nemá zdrojové částice

$$div\,\vec{B} = 0$$

### 3.3.3 Helmholtzova rovnice v elektromagnetické optice

- Protože jednotlivé složky vektorů elektrického a magnetického pole splňují vlnovou rovnici
- Každá z těchto složek musí vyhovovat také Helmholtzově rovnici

$$(\nabla^2 + k^2) \cdot U = 0$$

| Symbol | Význam |
|---|---|
| $U$ | skalární funkce reprezentující jednu složku pole |
| $\nabla^2$ | Laplaceův operátor |
| $k$ | vlnové číslo |

- Skalární funkce $U$ reprezentuje vždy jednu ze šesti složek vektorů $\vec{E}$ a $\vec{H}$
- Pro vakuum je vlnové číslo dáno vztahem

$$k = \omega\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}$$

| Symbol | Význam |
|---|---|
| $k$ | vlnové číslo |
| $\omega$ | kruhová frekvence |
| $\varepsilon_0$ | permitivita vakua |
| $\mu_0$ | permeabilita vakua |

### 3.3.4 Monochromatická elektromagnetická vlna

- Pro monochromatickou elektromagnetickou vlnu jsou všechny složky elektrického i magnetického pole harmonickými funkcemi času

$$\vec{E}(\vec{r},t) = \mathrm{Re}\left\{\hat{\vec{E}}(\vec{r}) \cdot e^{i\omega t}\right\}$$

$$\vec{H}(\vec{r},t) = \mathrm{Re}\left\{\hat{\vec{H}}(\vec{r}) \cdot e^{i\omega t}\right\}$$

| Symbol | Význam |
|---|---|
| $\vec{E}(\vec{r},t)$ | elektrické pole |
| $\vec{H}(\vec{r},t)$ | magnetické pole |
| $\hat{\vec{E}}(\vec{r})$ | komplexní amplituda elektrického pole |
| $\hat{\vec{H}}(\vec{r})$ | komplexní amplituda magnetického pole |
| $\omega$ | kruhová frekvence |

### 3.3.5 Poyntingův vektor – $\vec{S}$ $[W \cdot m^{-2}]$

- Poyntingův vektor udává plošnou hustotu toku výkonu
- Směr vektoru určuje směr šíření energie elektromagnetické vlny

$$\vec{S}(\vec{r},t) = \vec{E}(\vec{r},t) \times \vec{H}(\vec{r},t)$$

| Symbol | Význam |
|---|---|
| $\vec{S}$ | Poyntingův vektor |
| $\vec{E}$ | elektrické pole |
| $\vec{H}$ | magnetické pole |

### 3.3.6 Optická intenzita – $I$ $[W \cdot m^{-2}]$

- Optická intenzita je definována jako časová střední hodnota Poyntingova vektoru

$$I = \langle \vec{S}_0 \rangle$$

- Po vyjádření pomocí komplexních amplitud platí

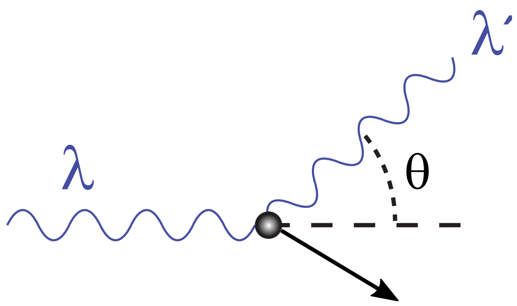
$$I = \frac{1}{4}\left(\hat{\vec{E}} \times \hat{\vec{H}}^* + \hat{\vec{E}}^* \times \hat{\vec{H}}\right) = \frac{1}{2}\left(\vec{S}_0 + \vec{S}_0^*\right) = \mathrm{Re}\left\{\vec{S}_0\right\}$$

| Symbol | Význam |
|---|---|
| $I$ | optická intenzita |
| $\vec{S}_0$ | komplexní Poyntingův vektor |
| $^*$ | komplexně sdružená hodnota |

### 3.3.7 Interakce záření s hmotou

1) **Comptonův jev**

- Interakce fotonu s volným nebo slabě vázaným elektronem
- Dochází k dokonale nepružné srážce
- Část energie fotonu se předá elektronu ve formě hybnosti
- Výsledkem je změna vlnové délky záření




---

2) **Fotoelektrický jev**

- Emise původně vázaného elektronu z hmoty vlivem absorpce záření
- Elektron získá dostatečnou energii k opuštění atomu

---

3) **Vznik párů**

- Při průletu fotonu s dostatečnou energií v dosahu Coulombovského pole jádra
- Energie fotonu se využije na vznik páru elektron–pozitron

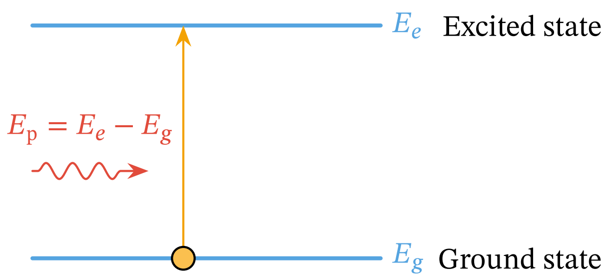
$$h\nu \rightarrow e^- + e^+$$

- Zbylá energie se změní na kinetickou energii jádra

---

4) **Excitace elektronu**

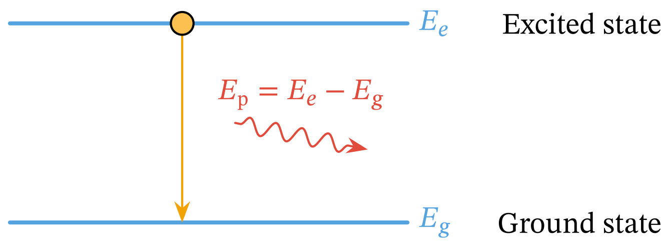
- Přechod vázaného elektronu na vyšší energetickou hladinu
- Elektron přechází ze základního stavu $E_1$ do excitovaného stavu $E_2$
- Změna je vyvolána absorpcí fotonu
- Energie fotonu se spotřebuje na přechod mezi energetickými hladinami




---

5) **Spontánní emise**

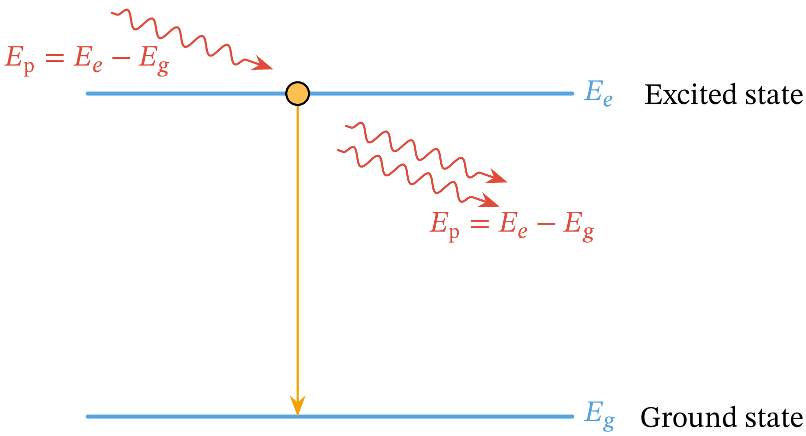
- Inverzní jev k excitaci
- Po určité době dochází k samovolnému návratu elektronu do základního stavu
- Energie je vyzářena ve formě fotonu
- Vlnová délka fotonu odpovídá energetickému rozdílu $\Delta E$




---

6) **Stimulovaná emise**

- Fyzikální proces, kdy foton vyvolá přechod elektronu z excitovaného stavu do základního
- Při přechodu dojde k emisi fotonu
- Energie emitovaného fotonu odpovídá rozdílu energií energetických hladin

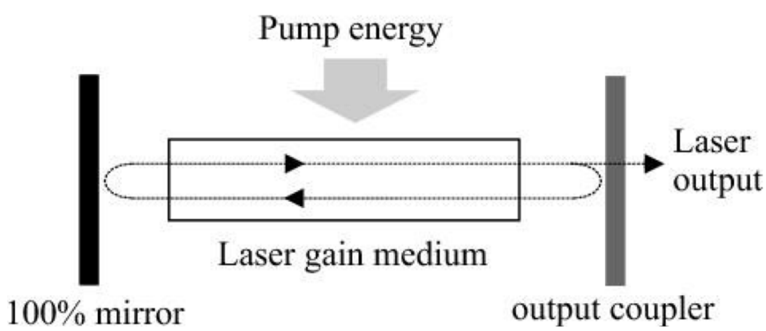



### 3.3.8 Laser

- Laser je optický oscilátor generující záření pomocí stimulované emise fotonů
- Za běžných podmínek se většina elektronů v atomech aktivního prostředí nachází v základním stavu
- Dodáním energie do aktivního prostředí (čerpáním, buzením) dochází k inverzi populace
- Inverze populace je stav, kdy je většina elektronů v excitovaném stavu
- V aktivním prostředí následně dochází ke stimulované emisi fotonů
- Emise může být vyvolána externím fotonem nebo fotonem vzniklým spontánní emisí

#### Princip činnosti laseru

- Zrcadla tvoří optický rezonátor
- Energie akumulovaná v aktivním prostředí je vyzářena ve formě laserového paprsku



**Vlastnosti laserového paprsku**

1) Paprsek je kolimovaný

- Nerozbíhá se
- Energie je soustředěna na malou plochu

2) Paprsek je monochromatický

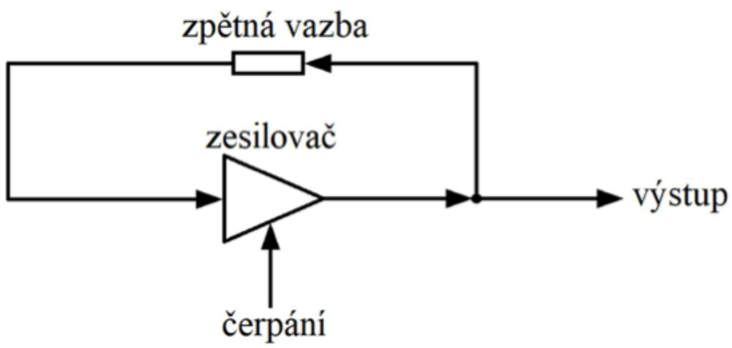
- Fotony mají stejnou frekvenci
- Odpovídá jediné vlnové délce

3) Paprsek je koherentní

- Všechny fotony jsou ve fázi

**Laser jako optický oscilátor**

- Laser lze popsat jako optický oscilátor se zpětnou vazbou
- Skládá se z:
  - rezonančního optického zesilovače
  - optického rezonátoru




- Výstupní signál zesilovače je zpětnou vazbou přiveden zpět na vstup
- Pokud na vstupu není žádný signál, není ani na výstupu
- Sebemenší šum iniciuje vznik oscilací
- Signál je opakovaně zesilován
- Růst amplitudy je omezen saturací zisku zesilovače
- Systém dosáhne ustáleného stavu

**Podmínky vzniku oscilací**

1) Zisk zesilovače musí být větší než ztráty zpětné vazby

- Při jednom oběhu rezonátorem musí být dosažen čistý zisk

2) Celková změna fáze při jednom oběhu musí být celočíselným násobkem $2\pi$

- Signál zpětné vazby je sfázovaný se vstupním signálem