

# Úvod do laserové techniky

## Světlo jako elektromagnetické záření

### I. část

Michal Němec

Katedra fyzikální elektroniky  
České vysoké učení technické v Praze  
michal.nemec@fjfi.cvut.cz

Ing. Michal Němec, Ph.D.

[michal.nemec@fjfi.cvut.cz](mailto:michal.nemec@fjfi.cvut.cz)

Trojanova, místnost 237

Tel.: 224 358 672

Prof. Ing. Helena Jelínková, DrSc.

[helena.jelinkova@fjfi.cvut.cz](mailto:helena.jelinkova@fjfi.cvut.cz)

Trojanova, místnost 236

Tel.: 224 358 538

Ing. Jan Šulc, Ph.D.

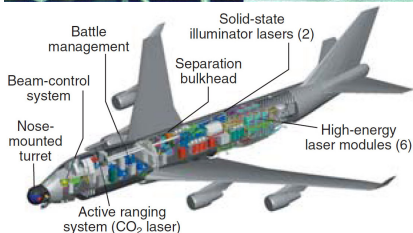
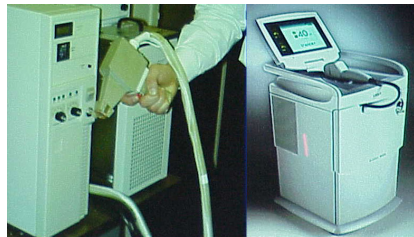
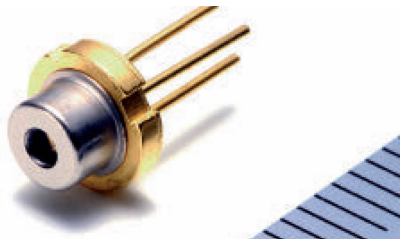
[jan.sulc@fjfi.cvut.cz](mailto:jan.sulc@fjfi.cvut.cz)

Trojanova, místnost 237

Tel.: 224 358 672

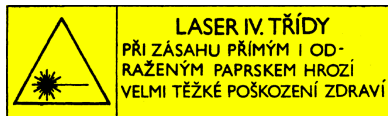
## Laser a laserové záření

- ▶ Generátor světla využívající *stimulované emise* fotonů
- ▶ Koherence, koncentrace energie (směr a čas), monochromaticnost



## Laserová technika

- ▶ Principy a konstrukce laserů
- ▶ Diagnostika laserového záření
- ▶ Aplikace a bezpečnost







## Program první půlky semestru

1. Světlo jako elektromagnetické záření I.
2. Světlo jako elektromagnetické záření II.
3. Látka jako soubor kvantových soustav
4. Interakce záření s látkou
5. Detekce optického záření
6. Princip činnosti laseru

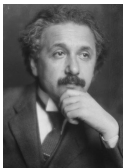
## Komu je přednáška určena?

- ▶ 1. ročník Bc. Laserová a přístrojová technika, 2. ročník Bc. Fyzikální elektronika
- ▶ Volitelné

-  VRBOVÁ M., JELÍNKOVÁ H., GAVRILOV P.: *Úvod do laserové techniky*, Skriptum FJFI ČVUT, Praha, 1994 (<http://people.fjfi.cvut.cz/sulcjan1/ult/>)
-  VRBOVÁ M. a kol.: *Lasery a moderní optika - Oborová encyklopedie*, Prometheus, Praha, 1994
-  Sochor V.: *Lasery a koherentní svazky*, Academia, Praha, 1990 (<http://people.fjfi.cvut.cz/sulcjan1/ult/>)
-  Engst P., Horák M.: *Aplikace laserů*, SNTL, Praha, 1989 (<http://people.fjfi.cvut.cz/sulcjan1/ult/>)

## Názory na podstatu světla

- ▶ Částice (1672 Isaac Newton)
- ▶ Vlna (1801 Thomas Young)
- ▶ Elektromagnetická vlna (1873 James Clerk Maxwell, 1886 Heinrich Hertz)
- ▶ Částice (1900 Max Planck – kvantování energie, 1905 Albert Einstein – foton)
- ▶ Částice-vlna (20. léta 20. století Schrödinger, Broiglie)
- ▶ Částice (1948 Feynman, Dyson, Schwinger, Tomonaga)



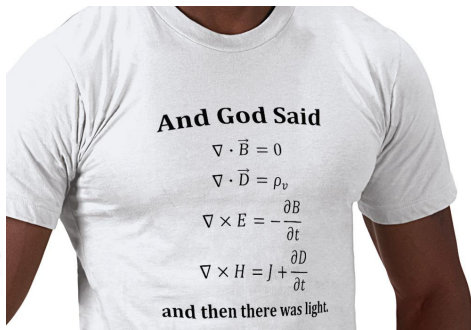
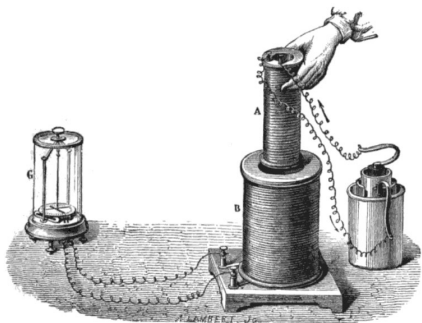
# Světlo jako elektromagnetické záření

Fyzikální model světla – elektromagnetické záření (vlnění, pole)

Ampérův (1820) a Faradayův (1831) zákon, Maxwellovy rovnice Nestacionární elektrické a magnetické pole  $\vec{E}(x, y, z, t)$  a  $\vec{B}(x, y, z, t)$  jsou vzájemně neoddělitelná a vytvářejí jediné pole *elektromagnetické*.

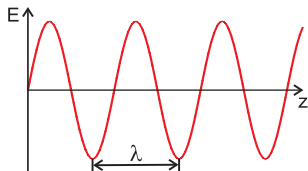
Hertzovy vlny jsou vlny v elektromagnetickém poli Rychlost šíření elemag. vlny (přenosu energie) ve vakuu  $c_0 = 299\,792\,458\text{ m/s} \doteq 3 \times 10^8\text{ m/s}$

**Světlo** elektromagnetická vlna s frekvencí  $\sim 10^{15}\text{ Hz}$  – periodické harmonické kmity *elektrického a magnetického pole*



# Světlo jako elektromagnetická vlna

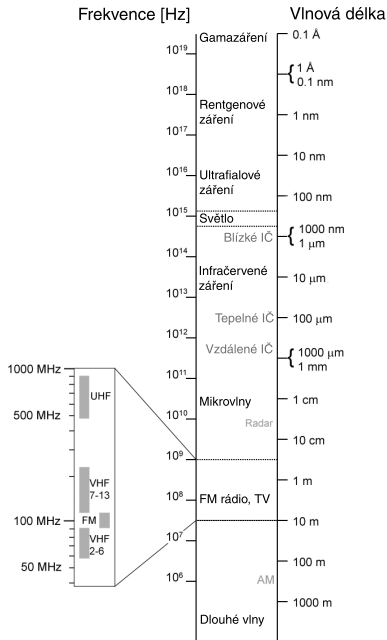
- ▶ Elektromagnetická vlna je charakterizována **frekvencí**  $f$  (počet kmitů za sekundu)
- ▶ **Vlnová délka**  $\lambda$  vlny závisí na **rychlosti šíření** vlny prostředím  $c$  (na indexu lomu  $n$ )



$$\lambda = \frac{c}{f}, \quad c = \frac{c_0}{n}, \quad \lambda_0 = \frac{c_0}{f}$$

- ▶ Světlo je část spektra elmag. vlnění

$$f \sim 10^{15} \text{ Hz (PHz)}$$





# Rovinná elektromagnetická lineárně polarizovaná vlna

- ▶ Základní model elektromagnetického vlnění:

## rovinná lineárně polarizovaná vlna

- ▶ Matematicky popisují kmity elektromagnetického pole harmonické funkce:

$$\vec{E}(\vec{r}, t) = \vec{t}_e E_0 \cos(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r} + \Phi) \quad (\text{intenzita ele. pole [V/m]})$$

$$\vec{B}(\vec{r}, t) = \vec{t}_b B_0 \cos(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r} + \Phi) \quad (\text{magnetická indukce [T]})$$

- ▶ Polohový vektor  $\vec{r} = (x, y, z)$  a čas  $t$

- ▶ Polarizační vektory  $\vec{t}_e \perp \vec{t}_b$  ( $\vec{E} \perp \vec{B}$ )

- ▶ Amplituda ( $B_0 = E_0/c$ )

- ▶ Frekvence  $f$ , kruhová frekvence  $\omega$

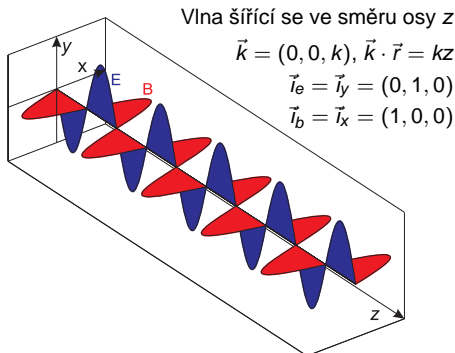
$$\omega = 2\pi f$$

- ▶ Fáze  $\Phi$ , fázový člen ( $\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r} + \Phi$ )

- ▶ Směr šíření udává vlnový vektor  $\vec{k} = (k_x, k_y, k_z)$ , ( $\vec{k} \perp \vec{t}_e$ ,  $\vec{k} \perp \vec{t}_b$ )

- ▶ Vlnové číslo  $k = |\vec{k}|$

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



## Rovinná elektromagnetická lineárně polarizovaná vlna

- ▶ Protože známe vztah mezi vektory  $\vec{E}$  a  $\vec{B}$  ( $B_0 = E_0/c$ ), stačí se obvykle omezit jen na vektor elektrické indukce  $\vec{E}$
- ▶ Rovinná elektromagnetická lineárně polarizovaná vlna ve směru osy  $z$

$$\vec{E}(z, t) = \vec{i}_y E_0 \cos(\omega t - kz + \Phi)$$

- ▶ Uvažujeme **pevný bod**  $z = z_0$  ( $\Phi_0 = \Phi - kz_0$ )

$$\vec{E}(z_0, t) = \vec{i}_y E_0 \cos(\omega t + \Phi_0) \Rightarrow \omega T = 2\pi \Rightarrow \text{perioda, frekvence}$$

- ▶ Uvažujeme **pevný čas**  $t = t_0$  ( $\Phi_0 = -\Phi - \omega t_0$ )

$$\vec{E}(z, t_0) = \vec{i}_y E_0 \cos(kz + \Phi_0) \Rightarrow k\lambda = 2\pi \Rightarrow \text{vlnová délka, vlnočet}$$

- ▶ Fázová rychlost vlny  $c = \omega/k$  – rychlost světla

# Vlnoplocha elektromagnetické vlny

**Vlnoplocha:** geometrické místo (plocha v prostoru), na které má vlna konstantní fázový člen. Směr šíření (paprsek) je kolmý na vlnoplochu.

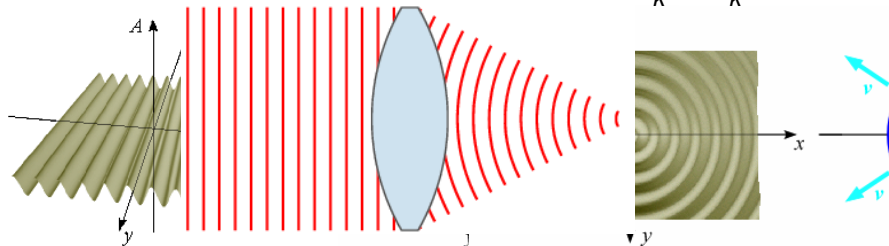
## Rovinná vlna ve směru z

- ▶ Popis v kartézských souřadnicích

$$\vec{E}(z, t) = \vec{t}_y E_0 \cos(\omega t - kz + \Phi)$$

- ▶ Plocha konstantní fáze  
 $\omega t - kz = \text{konst.}$  je **rovina** kolmá na osu z v místě

$$z = \frac{\text{konst.}}{k} + \frac{\omega}{k}t$$



## Kulová vlna

- ▶ Popis ve sférických souřadnicích  
( $r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$ )

$$\vec{E}(r, t) = \vec{t}_e \frac{E_0}{r} \cos(\omega t - kr + \Phi)$$

- ▶ Plocha konstantní fáze  
 $\omega t - kr = \text{konst.}$  je **koule** o poloměru

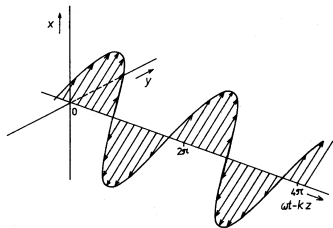
$$r = \frac{\text{konst.}}{k} + \frac{\omega}{k}t$$

# Polarizace elektromagnetické vlny

- ▶ Vlna příčná (zachovává se struktura vlny podél směru šíření)  $\times$  vlna podélná
- ▶ Vždy platí  $\vec{E} \perp \vec{k}$  ( $\vec{E}$  se nachází v rovině kolmé na směr šíření)
- ▶ Chování  $\vec{E}$  určuje polarizaci

## Polarizace lineární

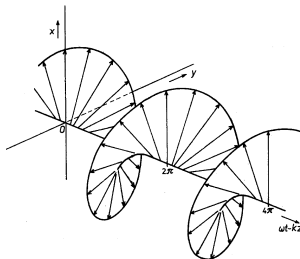
- ▶ Koncový bod  $\vec{E}$  leží na přímce (pro  $z = \text{konst.}$ ), kmitá v jedné rovině



$$\vec{E}(z, t) = \vec{i}_y E_0 \cos(\omega t - kz + \Phi)$$

## Polarizace kruhová

- ▶ Koncový bod  $\vec{E}$  leží na kružnici (pro  $z = \text{konst.}$ ), opisuje šroubovici



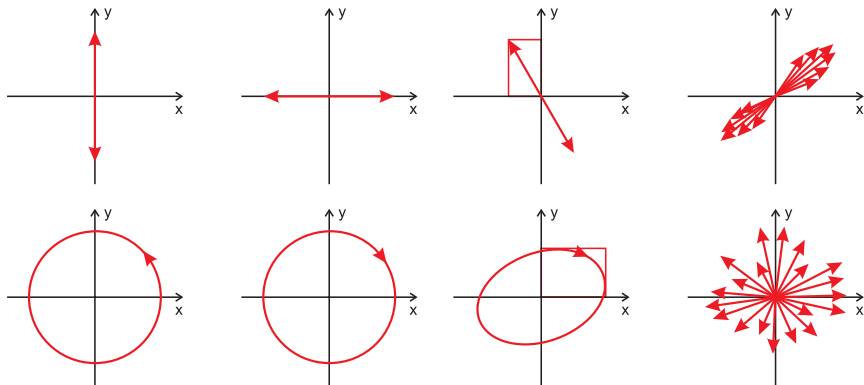
$$\begin{aligned} \vec{E}(z, t) = & \vec{i}_x E_0 \cos(\omega t - kz + \Phi) \\ & + \vec{i}_y E_0 \sin(\omega t - kz + \Phi) \end{aligned}$$

# Polarizace elektromagnetické vlny

- ▶ Polarizace eliptická – koncový bod  $\vec{E}$  leží na elipse (pro  $z = \text{konst.}$ )

$$\vec{E}(z, t) = \vec{i}_x E_{0x} \cos(\omega t - kz + \Phi) + \vec{i}_y E_{0y} \sin(\omega t - kz + \Phi)$$

- ▶ Horizontální  $\times$  vertikální, levotočivá  $\times$  pravotočivá, konvence
- ▶ Částečně polarizované, nepolarizované (náhodně polarizované) světlo



## Objemová hustota energie

- ▶ Elektromagnetické pole je forma energie
- ▶ Hustota energie elmag. pole je dána vztahem:

$$u = \frac{\vec{E} \cdot \vec{D} + \vec{B} \cdot \vec{H}}{2}$$

- ▶ Intenzity  $\vec{E}$ ,  $\vec{H}$ , indukce  $\vec{D}$ ,  $\vec{B}$
- ▶ V izotropním homogenním prostředí platí:

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E}, \quad \vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu}, \quad B_0 = \frac{\vec{E}_0}{c}$$

- ▶  $\epsilon$  – permitivita,  $\mu$  – permeabilita,  $1/(\epsilon\mu) = c^2$ ,  $n = \sqrt{\epsilon_r \mu_r}$

$$u = \epsilon E_0^2 \cos^2(\omega t - kz + \Phi) = \frac{1}{2} \epsilon E_0^2 [1 + \cos\{2(\omega t - kz + \Phi)\}]$$

$$\cos^2 \alpha = \frac{1}{2}(1 + \cos 2\alpha)$$

- ▶ Střední hodnota objemové hustoty energie ( $\langle \cos \alpha \rangle = 0$ )

$$\bar{u} = \frac{1}{2} \epsilon E_0^2 \quad [\text{J/m}^3]$$

## Plošná hustota výkonu elektromagnetické vlny

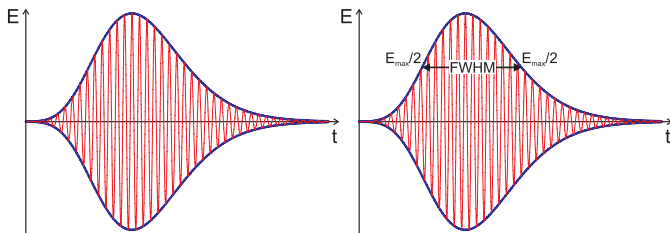
- ▶ Elektromagnetická postupná vlna přenáší energii rychlostí  $c$  (ve vakuu  $c = c_0 \approx 300\,000 \text{ km/s}^{-1}$ , jinak  $c = c_0/n$ )
- ▶ Plošná hustota výkonu elektromagnetické vlny, respektive intenzita elektromagnetické vlny, resp. intenzita optického záření, resp. plošná hustota výkonu, resp. energie, která projde jednotkovou plochou za jednotku času:

$$I = c\bar{u} = \frac{1}{2} c\epsilon E_0^2 \quad \text{Intenzita záření } I \text{ [W/m}^2\text{]}$$

**Intenzita elektrického pole  $\vec{E}$**  – základní veličina elektrického pole, vyjadřující jeho vlastnosti pomocí silových účinků na elektrická náboj ( $\vec{E} = \vec{F}/q$ ).  
Jednotkou **i.e.p.** je  $\text{V}\cdot\text{m}^{-1}$ .

**Intenzita optického záření  $I$**  – energie optického záření postupující za jednotku času kolmo k jisté ploše dělená obsahem této plochy (plošná hustota zářivého toku). Jednotka **i.o.z.** je  $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ .

# Impulz optického záření



- ▶ Časový průběh impulsu = pomalu proměnná amplituda (obálka) + nosná vlna

$$\vec{E} = \vec{i}_y \mathcal{E}_0(t) \cos(\omega t + \Phi(t))$$

- ▶ Doba trvání impulsu, „Délka impulsu“, FWHM (*full width half maximum*)
- ▶ Izolovaný impuls, . . .
- ▶ Časově proměnná intenzita

$$I(t) = \frac{1}{2} c \varepsilon \mathcal{E}_0^2(t)$$

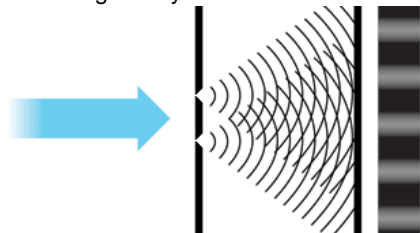
- ▶ Spektrum, kvazimonochromatický impuls



# Princip superpozice elektromagnetických vln

- ▶ Maxwellovy rovnice (MR) jsou lineární (za určitých předpokladů a to především ve vakuu, obecněji: pokud vlastnosti prostředí nezávisí na  $\vec{E}$  či  $\vec{B}$ , jsou MR lineární)
- ▶ To, že jsou MR lineární znamená, že pokud je jejich řešením pole  $\vec{E}_1(x, y, z, t)$  a pole  $\vec{E}_2(x, y, z, t)$ , tak je jejich řešením i pole  $\vec{E}(x, y, z, t) = \vec{E}_1(x, y, z, t) + \vec{E}_2(x, y, z, t)$
- ▶  $\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$ ,  
 $\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2$  – superpozice elektromagnetického pole
- ▶  $I \sim E^2$ ,  $I \neq I_1 + I_2$  – interference

**Interference** – překrytí dvou nebo více optických svazků dávající osvětlení, které není prostým součtem osvětlení jednotlivými svazky. Je to důsledek superpozice elektromagnetických vln.



- ▶ **Je velmi důležité si uvědomit, že princip superpozice (skládání, sčítání) neplatí pro intenzity záření (pro plošné hustoty zářivého toku).**

*Máme-li např. dvě elektromagnetické vlny stejné frekvence šířící se ve stejném směru, každou o intenzitě  $I$ , neplatí obecně, že by výsledné pole mělo intenzitu  $2I$*

- ▶ Výsledná intenzita záření musí být odvozena na základě zjištění výsledné intenzity elektrického a magnetického pole, pro které zákon superpozice platí.

Intenzita elektrického pole  $\vec{E}$  – základní veličina elektrického pole, vyjadřující jeho vlastnosti pomocí silových účinků na elektrická náboj ( $\vec{E} = \vec{F}/q$ ).  
Jednotkou **i.e.p.** je  $V.m^{-1}$ .

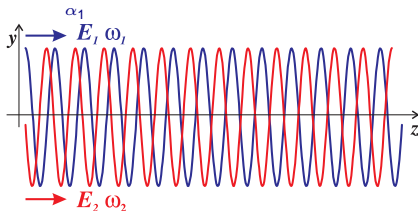
Intenzita optického záření  $I$  – energie optického záření postupující za jednotku času kolmo k jisté ploše dělená obsahem této plochy (plošná hustota zářivého toku). Jednotka **i.o.z.** je  $W.m^{-2}$ .

## Příklad superpozice dvou vlnění

Dvě elemag. vlny **různých** frekvencí, ale **stejně** polarizace a směru šíření

- ▶ Pracujeme s elektrickou složkou pole (magnetické umíme dopočítat)

$$\vec{E}_1(x, y, z, t) = \vec{t}_y E_0 \cos(\underbrace{\omega_1 t - k_1 z + \Phi_1}_{\alpha_1}), \quad \vec{E}_2(x, y, z, t) = \vec{t}_y E_0 \cos(\underbrace{\omega_2 t - k_2 z + \Phi_2}_{\alpha_2})$$



- ▶ Provedeme superpozici v každém čase a bodě

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 = 2\vec{t}_y E_0 \cos \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2} \cos \frac{\alpha_1 - \alpha_2}{2}$$

- ▶ Využili jsme součtový vzorec pro cos

$$\cos \alpha_1 + \cos \alpha_2 = 2 \cos \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2} \cos \frac{\alpha_1 - \alpha_2}{2}$$

## Příklad superpozice dvou vlnění (stejný směr, různé frekvence)

- ▶ Matematický popis pole vzniklého superpozicí

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 = 2\vec{i}_y E_0 \cos \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2} \cos \frac{\alpha_1 - \alpha_2}{2}$$

- ▶ Upravíme nové fázové členy (původní  $\alpha_{1,2} = \omega_{1,2}t - k_{1,2}z + \Phi_{1,2}$ )

$$\frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2} = \underbrace{\frac{\omega_1 + \omega_2}{2}}_{\bar{\omega}} t - \underbrace{\frac{k_1 + k_2}{2}}_{\bar{k}} z + \underbrace{\frac{\Phi_1 + \Phi_2}{2}}_{\bar{\Phi}} \quad (\text{průměr})$$

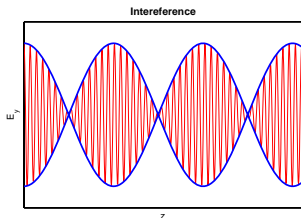
$$\frac{\alpha_1 - \alpha_2}{2} = \underbrace{\frac{\omega_1 - \omega_2}{2}}_{\Delta\omega/2} t - \underbrace{\frac{k_1 - k_2}{2}}_{\Delta k/2} z + \underbrace{\frac{\Phi_1 - \Phi_2}{2}}_{\Delta\Phi/2} \quad (\text{rozdíl})$$

- ▶ Výsledné pole

$$\vec{E} = \vec{i}_y 2E_0 \cos \left( \frac{\Delta\omega}{2} t - \frac{\Delta k}{2} z + \frac{\Delta\Phi}{2} \right) \cos (\bar{\omega}t - \bar{k}z + \bar{\Phi})$$

## Příklad superpozice dvou vlnění (stejný směr, různé frekvence)

$$\vec{E} = \vec{i}_y 2E_0 \cos\left(\frac{\Delta\omega}{2}t - \frac{\Delta k}{2}z + \frac{\Delta\Phi}{2}\right) \cos(\bar{\omega}t - \bar{k}z + \bar{\Phi})$$



**Zázněje** pro  $\omega_1 \doteq \omega_2$  je  $\Delta\omega \ll \omega_1, \omega_2$ , resp.  $\Delta k \ll k_1, k_2$  – amplitudová periodická modulace pole vznikající v důsledku **superpozice**

$$\vec{E} = \vec{i}_y A(z, t) \cos(\bar{\omega}t - \bar{k}z + \bar{\Phi})$$

**Rychlost fázová** rychlost **šíření nosné vlny** (vlnoplochy) prostředím

$$\bar{\omega}t - \bar{k}z = 0 \Rightarrow v_f \equiv \frac{z}{t} = \frac{\bar{\omega}}{\bar{k}} = \bar{v}\bar{\lambda}$$

**Rychlost grupová** rychlost šíření maxima obálky (impulsu) – energie

$$\frac{\Delta\omega}{2}t - \frac{\Delta k}{2}z = 0 \Rightarrow v_g \equiv \frac{z}{t} = \frac{\Delta\omega}{\Delta k} \approx \frac{d\omega}{dk}$$

- ▶ Fyzikálním model světla – Elektromagnetické vlnění × Foton
- ▶ Lineárně polarizovaná rovinná elektromagnetická vlna

$$\vec{E}(x, y, z, t) = \vec{i}_y E_0 \cos(\omega t - kz + \Phi)$$





- ▶ Vlnová délka  $\lambda$ , frekvence  $f$ , kruhová frekvence  $\omega = 2\pi f$ , rychlost šíření  $c$
- ▶ Směr šíření, vlnový vektor  $\vec{k}$ , vlnové číslo  $k$ , fáze  $\Phi$ , polarizace  $\vec{i}_y$

$$f = \frac{c}{\lambda}, \quad k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

- ▶ Intenzita elektrického pole  $E$  [V/m] × intenzita optického záření  $I$  [W/m<sup>2</sup>]

$$I = \frac{1}{2} c \varepsilon E_0^2$$

- ▶ Zákon superpozice elektromagnetických polí – skládají se intenzity polí

-  VRBOVÁ M., JELÍNKOVÁ H., GAVRILOV P.: *Úvod do laserové techniky*, Skriptum FJFI ČVUT, Praha, 1994 (<http://people.fjfi.cvut.cz/sulcjan1/ult/>)
-  VRBOVÁ M. a kol.: *Lasery a moderní optika - Oborová encyklopedie*, Prometheus, Praha, 1994
-  Sochor V.: *Lasery a koherentní svazky*, Academia, Praha, 1990
-  Engst P., Horák M.: *Aplikace laserů*, SNTL, Praha, 1989