

# Pozorujeme jednotlivé kmity infračerveného světla

**Petr Kužel**

Fyzikální ústav AVČR

## ■ Průvodce po elektromagnetickém záření

- svět optiky vs. svět elektroniky
- vymezení spektra pro dnešní setkání  
(mezi světy): THz (daleká IČ) spektrální oblast

## ■ THz pulsy

- Jak je dostaneme
- Jak to, že pozorujeme jejich jednotlivé kmity
- Můžeme takto pokračovat směrem k viditelné oblasti?

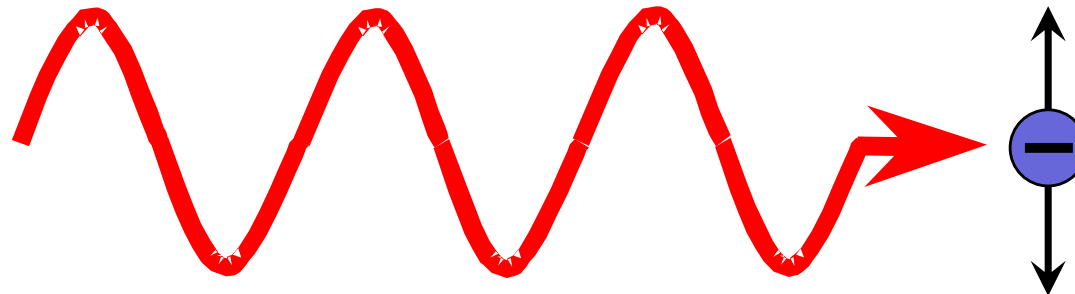
## ■ Co tedy vlastně můžeme vidět - příklady?

## ■ Co uvidíme na vlastní oči (ukázka v laboratoři)

# Světlo, elektromagnetické záření

**Světlo** = elektromagnetické vlnění (tj. střídavé elektrické a magnetické pole šířící se v prostoru rychlostí  $c$ )

Světlo tedy elektrickým polem působí na nabité částice (v plynech, kapalinách i pevných látkách); při průchodu světla se tyto částice rozkmitají.



**Foton** = elementární kvantum energie elektromagnetického pole  $h\nu$ ; šíří se rychlostí  $c$

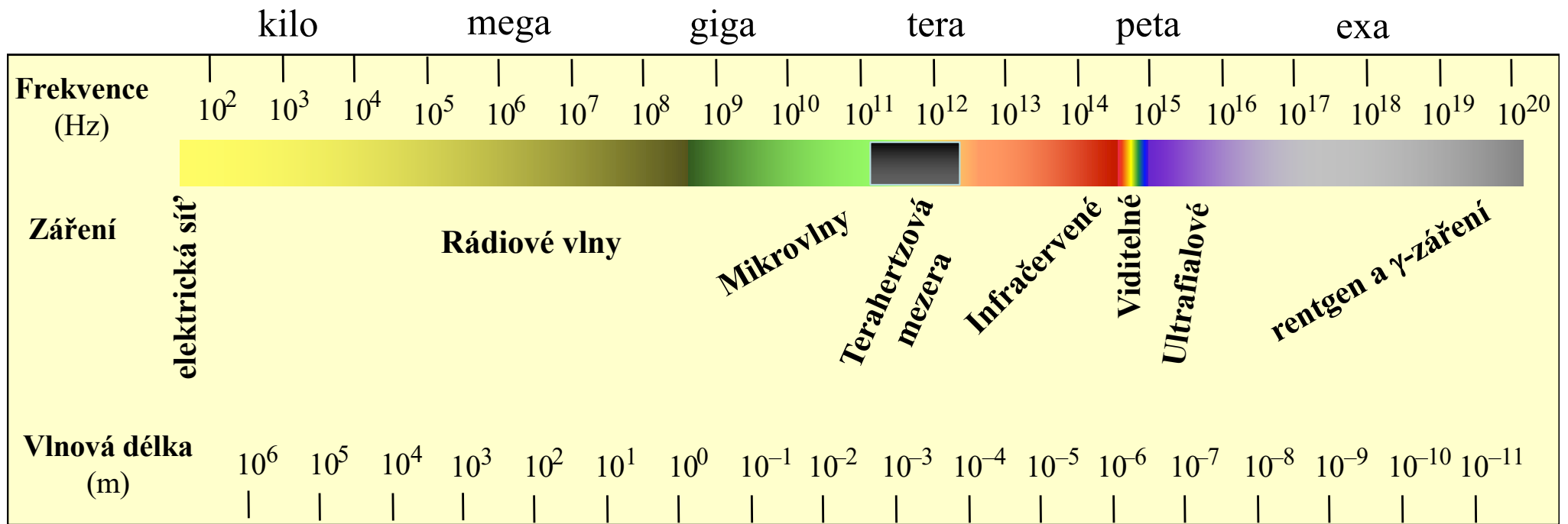
Světlo interaguje s látkami tak, že iniciuje přechody mezi energetickými hladinami částic (atomů, elektronů atd.)

# Předpony fyzikálních jednotek

Předpony fyzikálních jednotek					
peta-	$10^{15}$	1 000 000 000 000 000		<b>0.000 000 000 000 001</b>	<b><math>10^{-15}</math></b> femto-
tera-	$10^{12}$	1 000 000 000 000		<b>0.000 000 000 001</b>	<b><math>10^{-12}</math></b> piko-
giga-	$10^9$	1 000 000 000		0.000 000 001	$10^{-9}$ nano-
mega-	$10^6$	1 000 000		0.000 001	$10^{-6}$ mikro-
kilo-	$10^3$	1 000		0.001	$10^{-3}$ mili-
1					

$$1 \text{ terahertz} = 1 \text{ THz} = 10^{12} \text{ Hz}$$

# Spektrum elektromagnetického záření



kilo

1 m

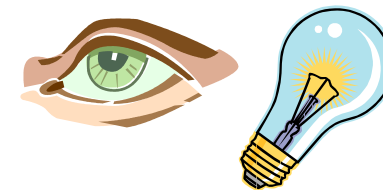
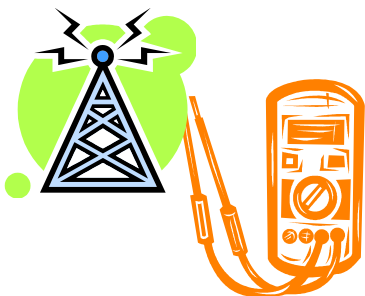
mili

mikro

nano

Svět elektroniky

Svět optiky



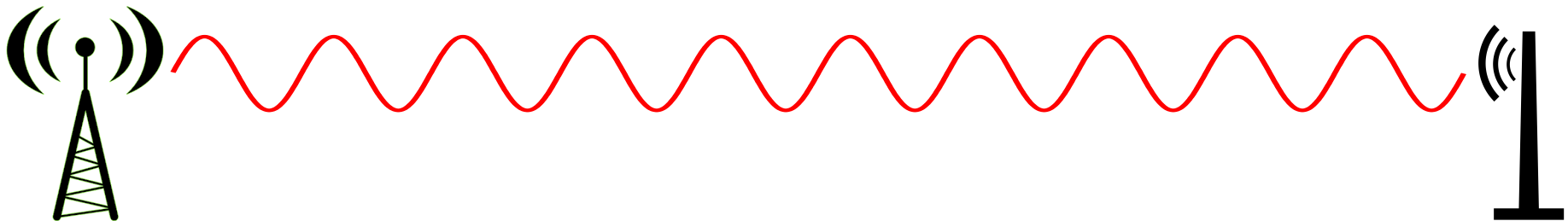
$$h\nu \text{ vs. } \Delta E$$

$$\lambda \text{ vs. } d$$

$$h\nu \text{ vs. } k_B T$$

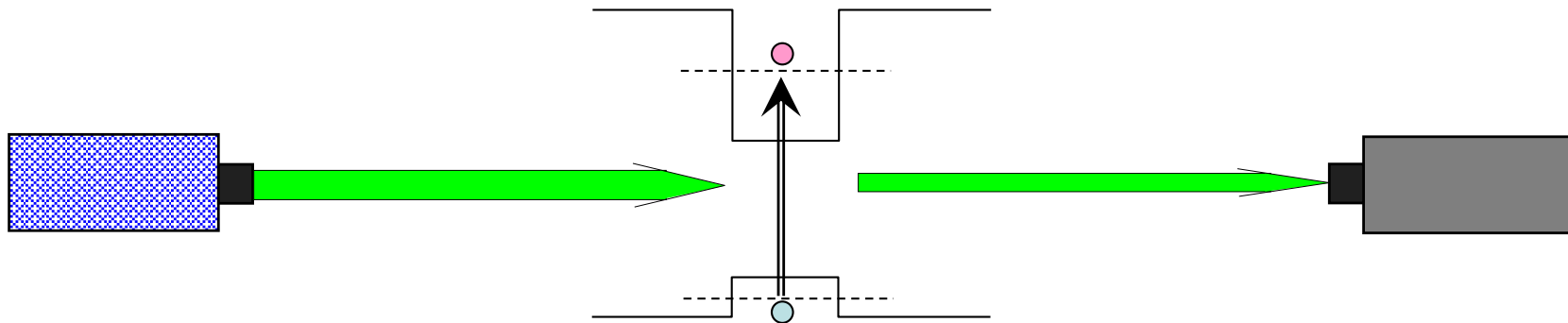
# Svět elektroniky

- Magnetická složka záření většinou není podstatná
- Zdroje a detektory: antény
- Měří se elektrické pole záření a jeho kmity
- vlnová délka je velmi dlouhá, kmity jsou pomalé
- impulsy jsou velmi dlouhé
- vzájemné působení s hmotou: ohyb, odraz, absorpce
- šíření v koaxiálních kabelech



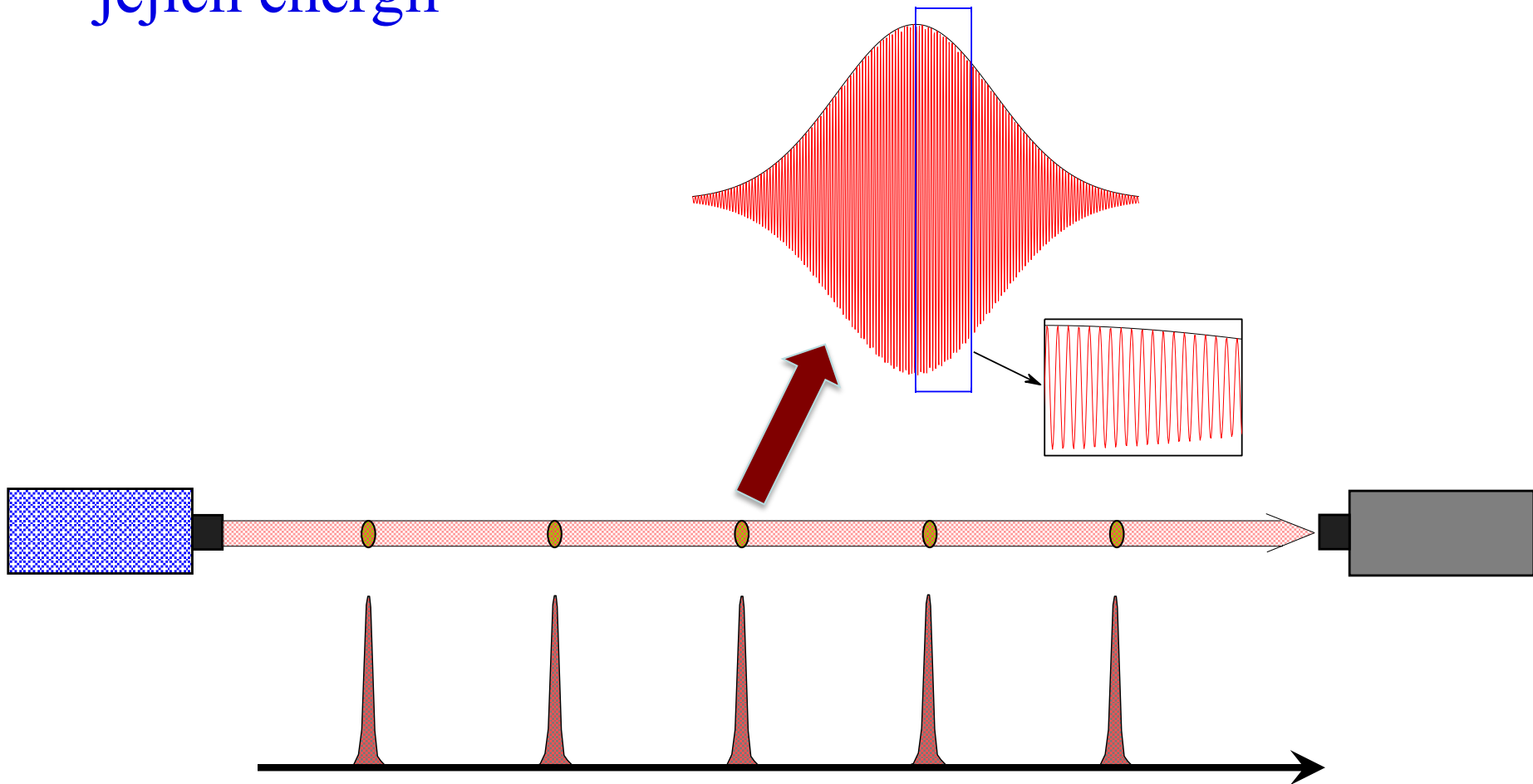
# Svět optiky

- Zdroje: horká tělesa, diody, lasery
- Měří se výkon záření  
(k jednotlivým kmitům není přístup)
- vzájemné působení s hmotou: ohyb, odraz, lom,  
interference,  
přechody mezi energetickými hladinami (rezonance)!
- šíření v dielektrických vlnovodech



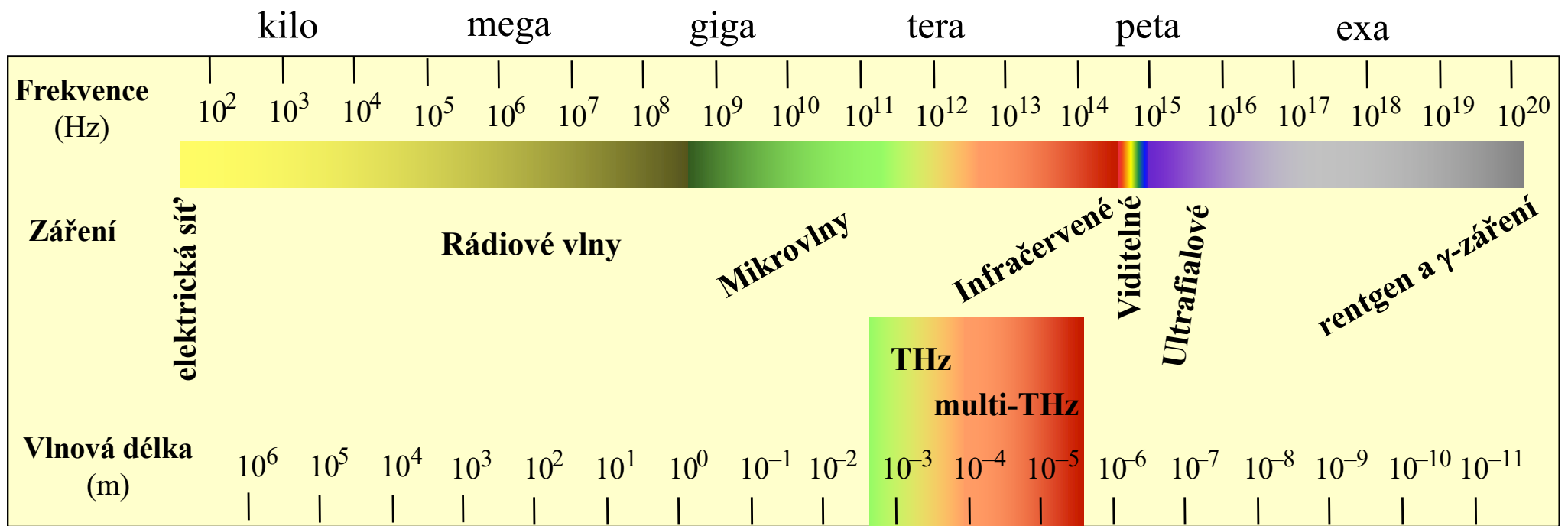
# Svět optiky

- Měří se výkon záření  
(k jednotlivým kmitům není přístup)
- velmi krátké impulsy jsou možné, ale měříme pouze jejich energii

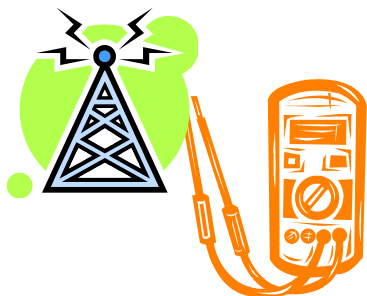




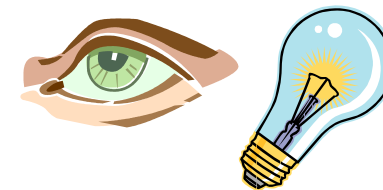
# Spektrum elektromagnetického záření



Svět elektroniky

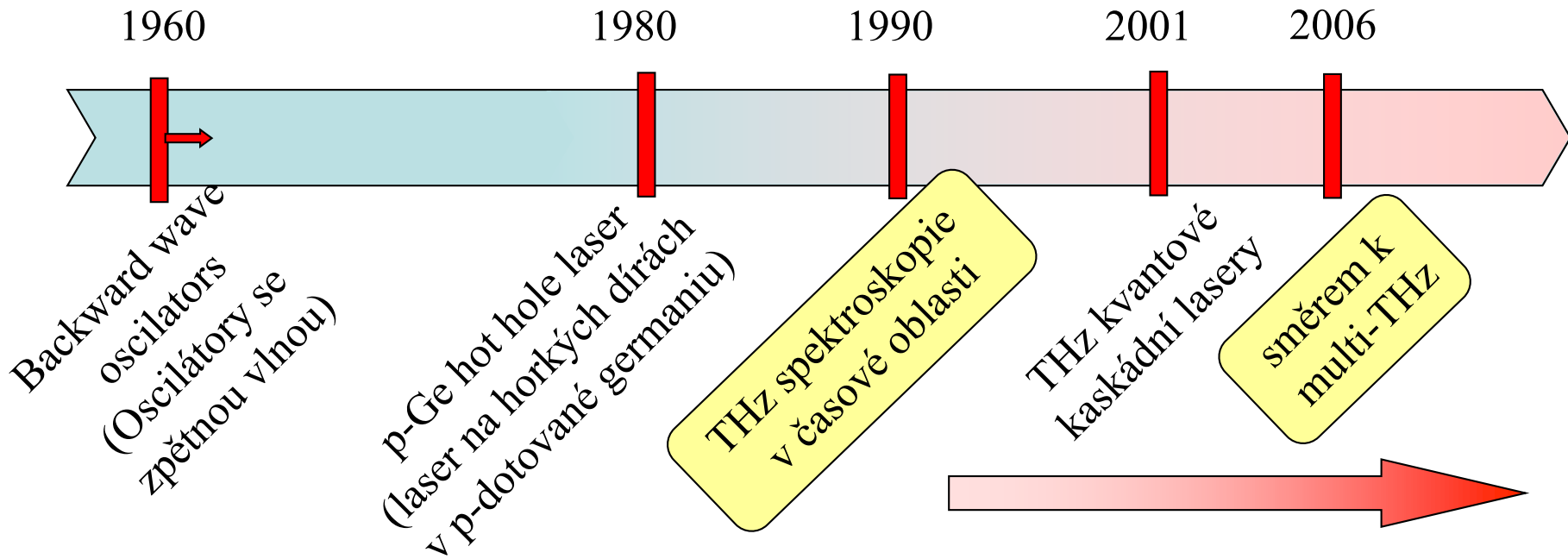


Svět optiky

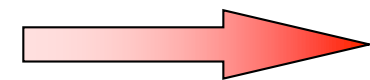


# Krátce z historie

vývoj ultrarychlých laserů



rozvoj v THz spektrální oblasti,  
aplikace

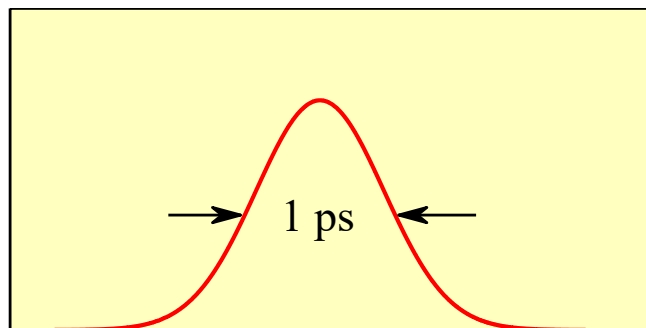
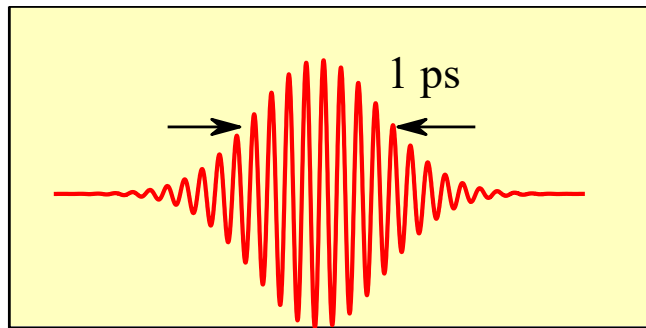
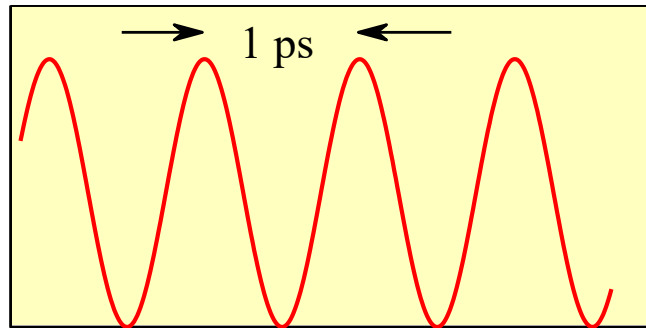


velká zařízení pro THz

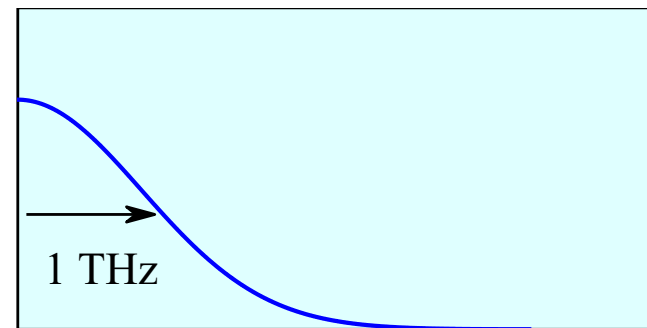
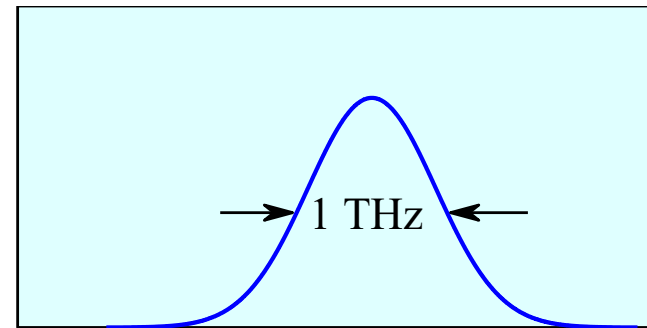
# Jak se dostat k terahertzové frekvenci?

tera-	$10^{12}$	1 000 000 000 000	0.000 000 000 001	$10^{-12}$	piko-
-------	-----------	-------------------	-------------------	------------	-------

Elektrické pole v čase



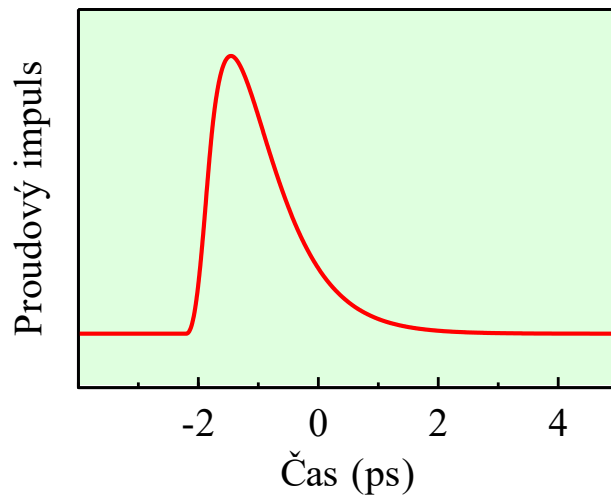
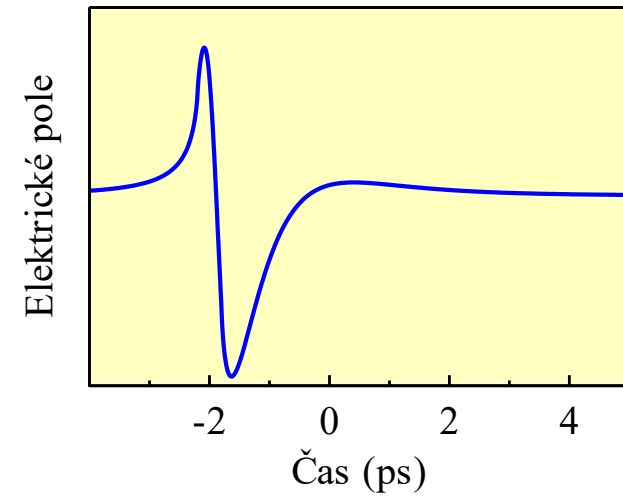
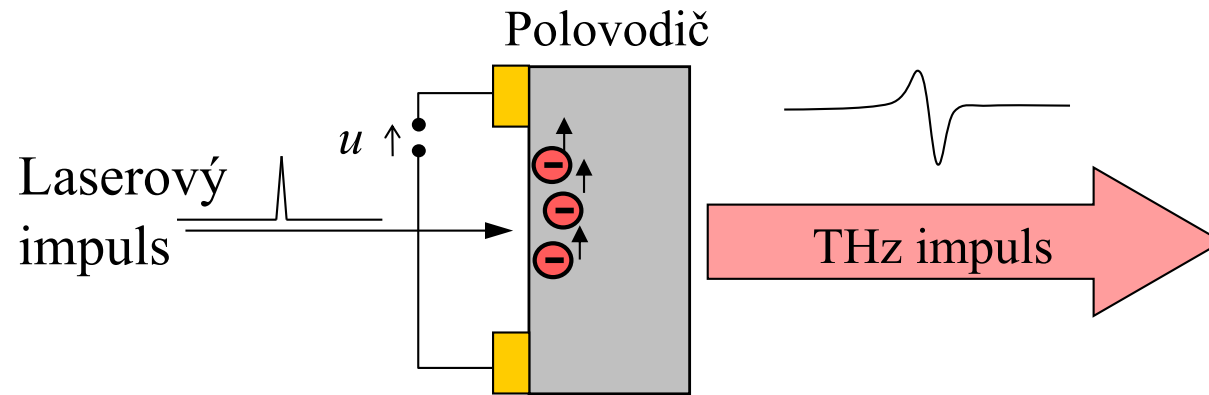
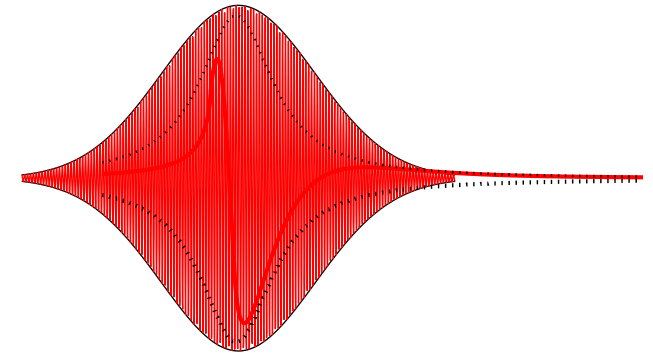
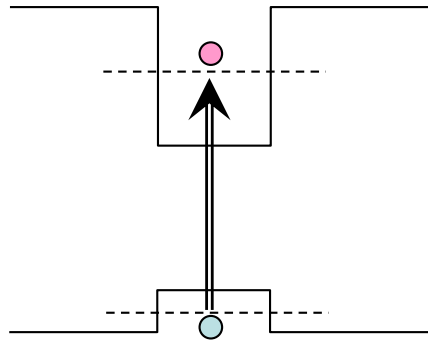
Čas



Frekvence

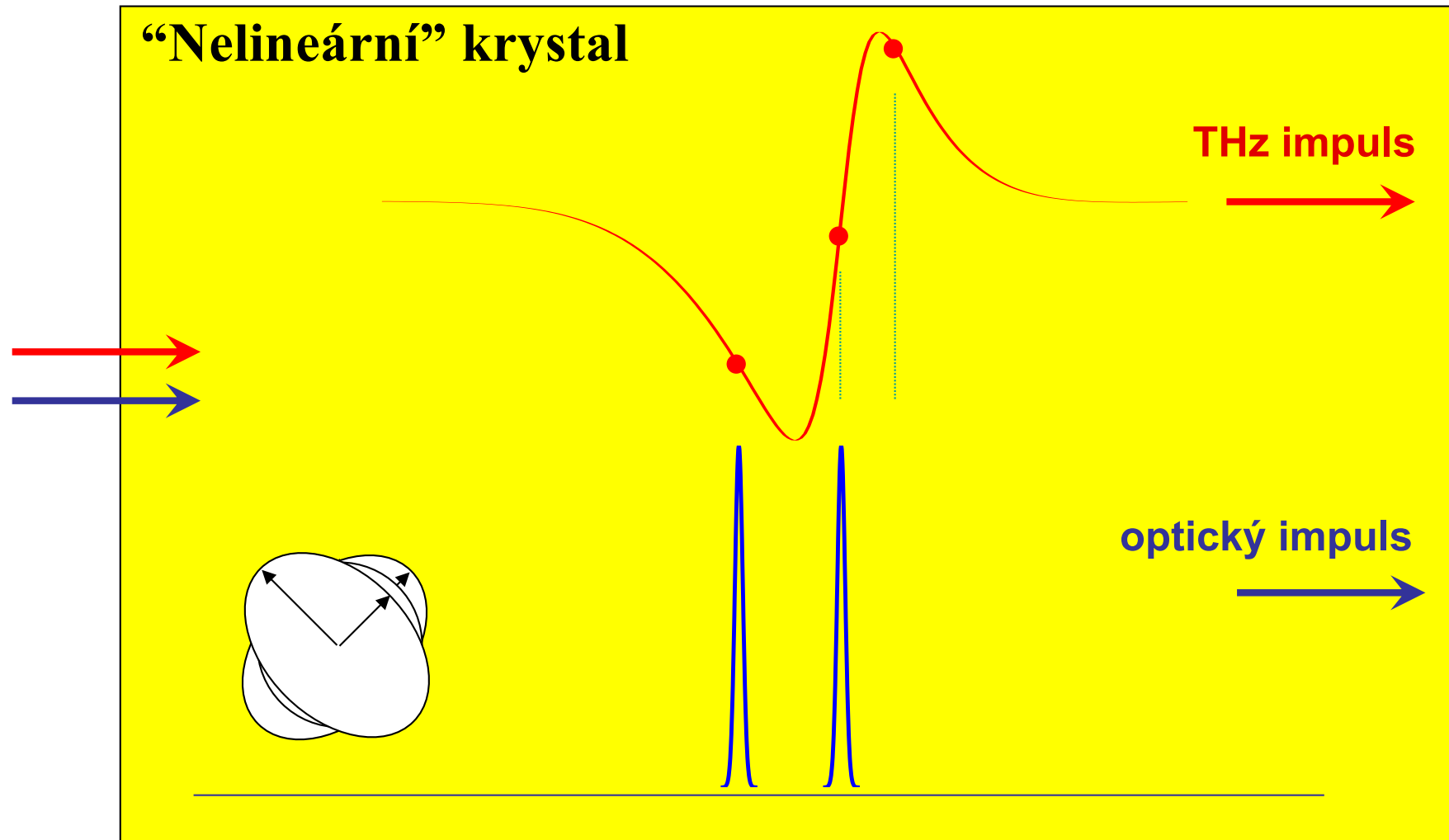
Frekvenční signál

# Jak se dostat k THz frekvenci?



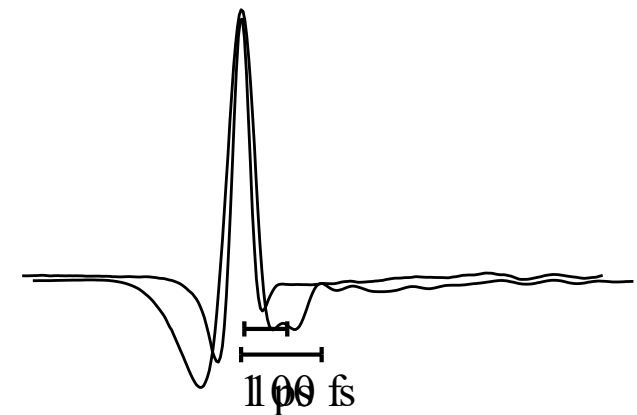
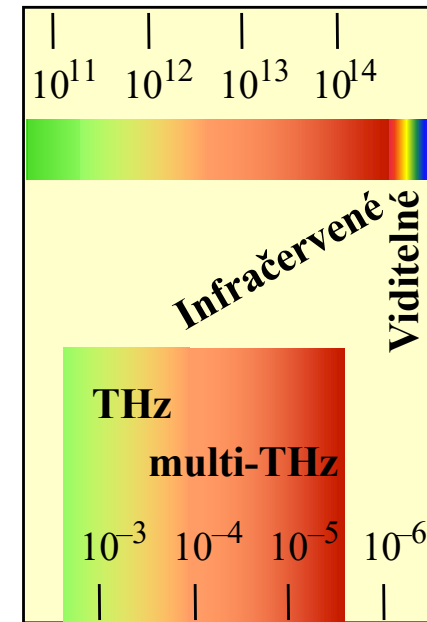
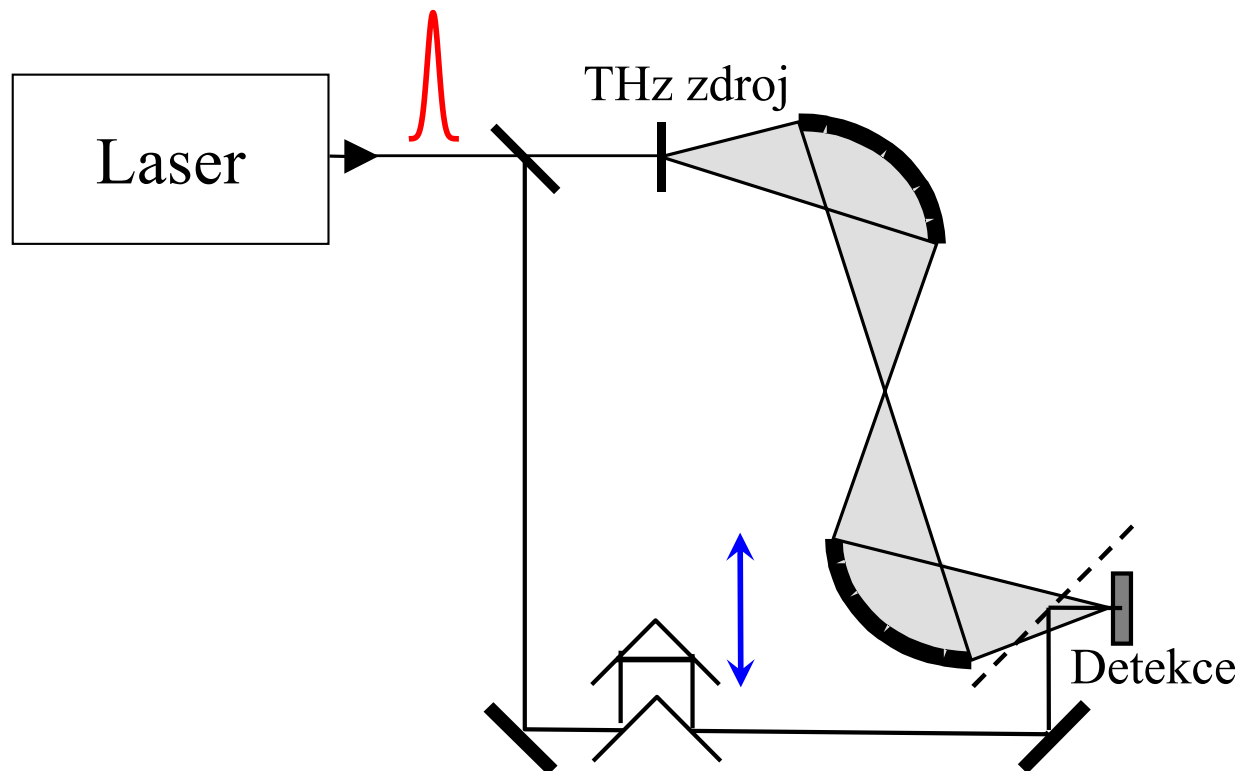
# Jak změřit THz puls?

Vlastnosti nelineárního prostředí se mění při současné přítomnosti dvou impulsů



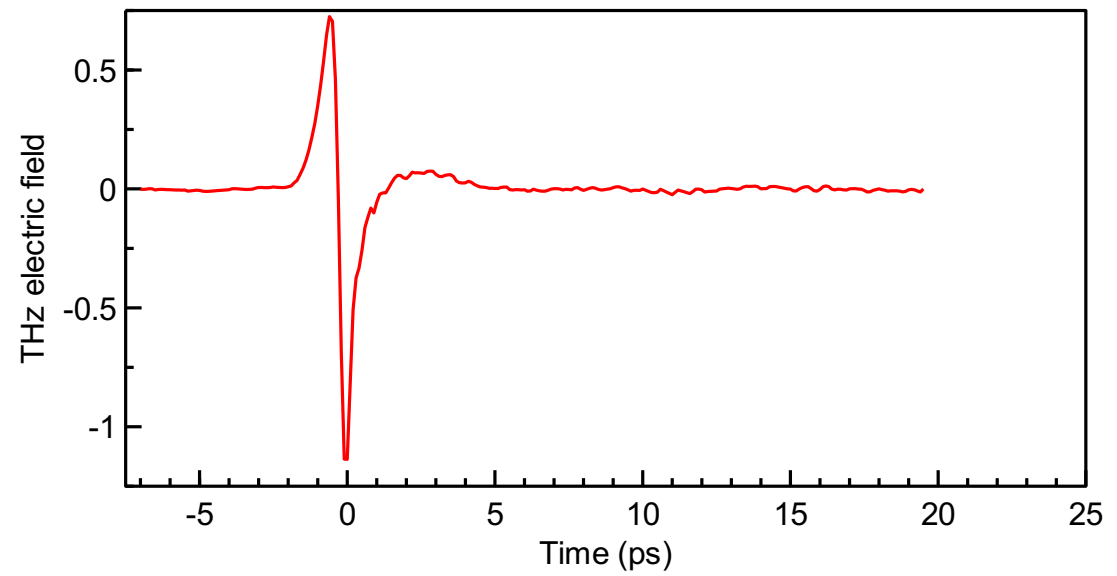
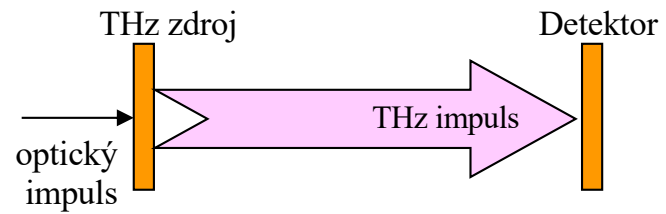
# Terahertzová věda a technologie

- Nový spektrální obor
- Nový nástroj k přímému pozorování kmitů záření
- Zkracování pulsů (multi-THz)
  - posuv směrem k viditelné oblasti



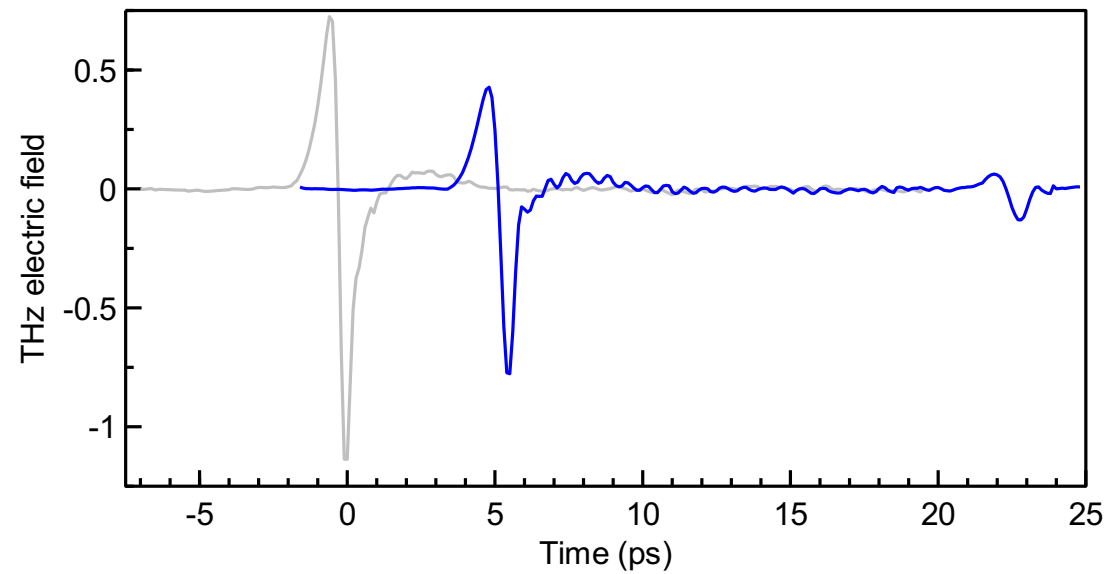
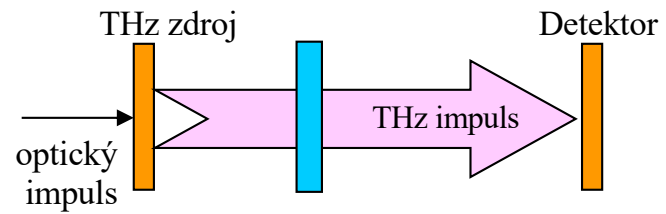
Přímé pozorování kmitů světla

# Přímé pozorování kmitů světla





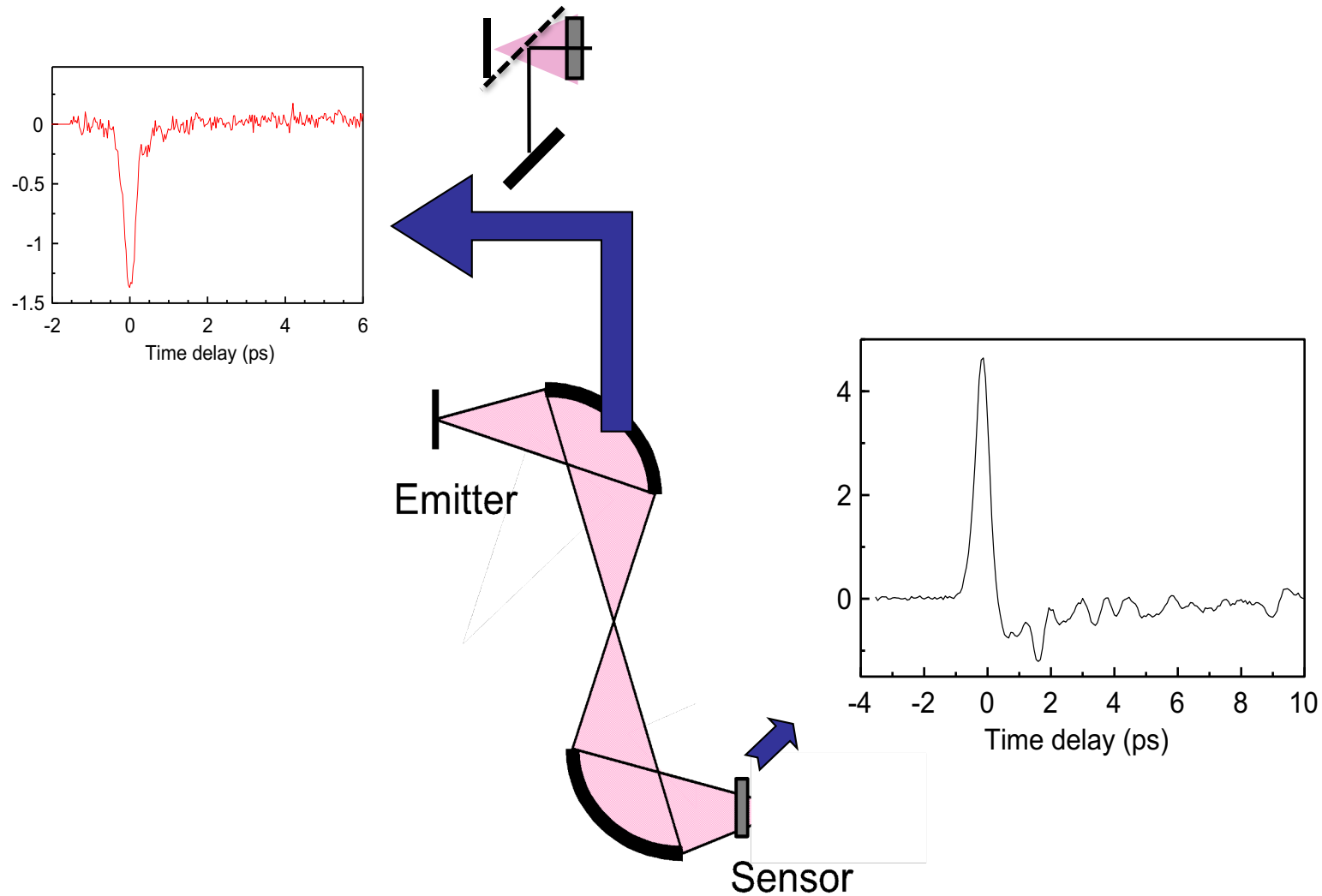
# Přímé pozorování kmitů světla



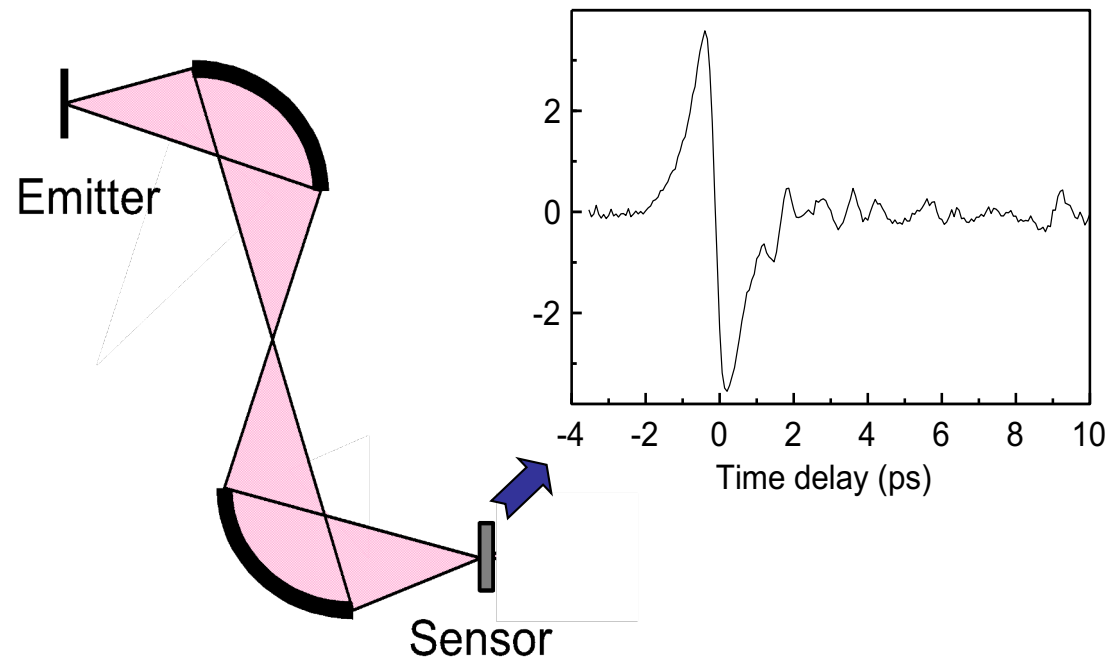




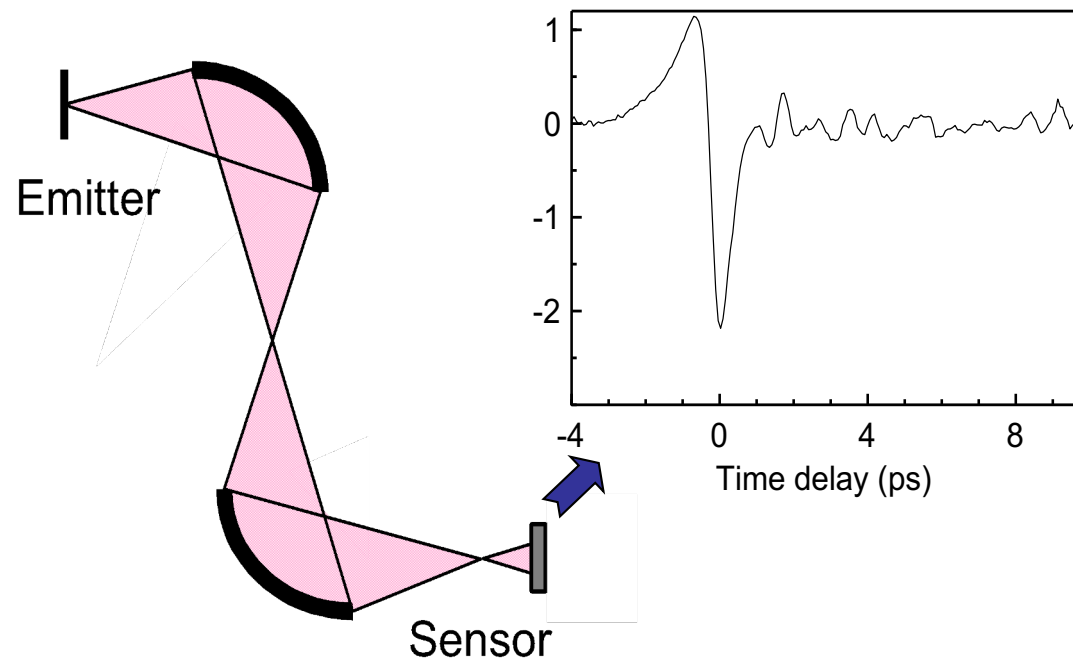
# Při fokusování světla dochází ke změně fáze vlny



# Při fokusování světla dochází ke změně fáze vlny

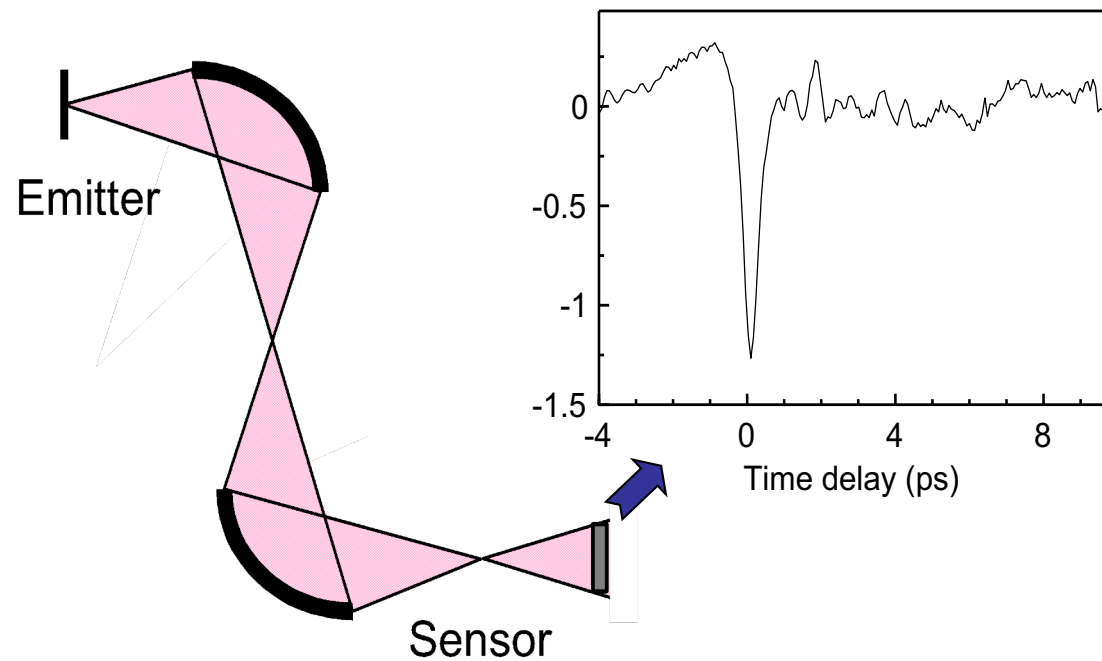


# Při fokusování světla dochází ke změně fáze vlny



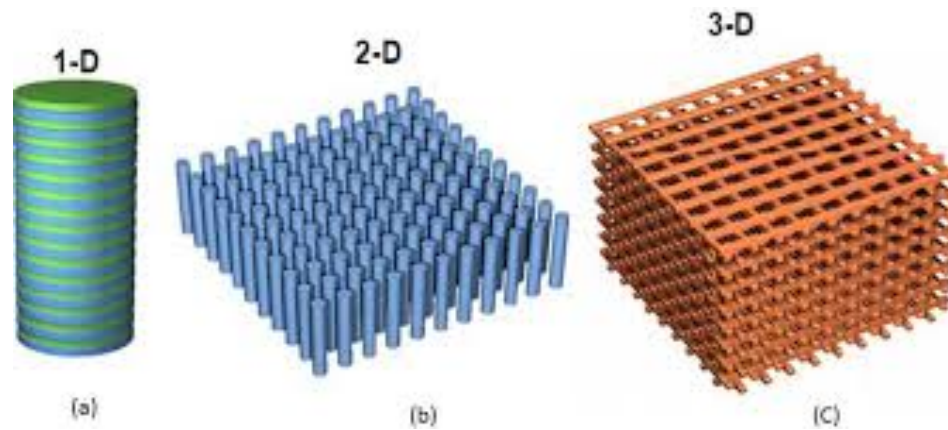
# Při fokusování světla dochází ke změně fáze vlny

**Tímto způsobem jsme tento jev poprvé pozorovali přímo v čase**



# Fotonické krystaly

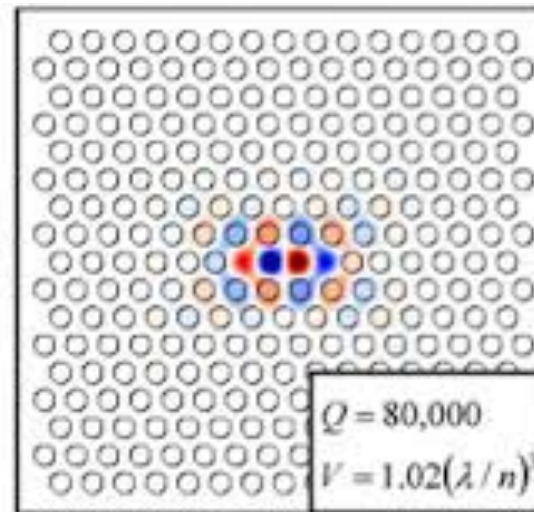
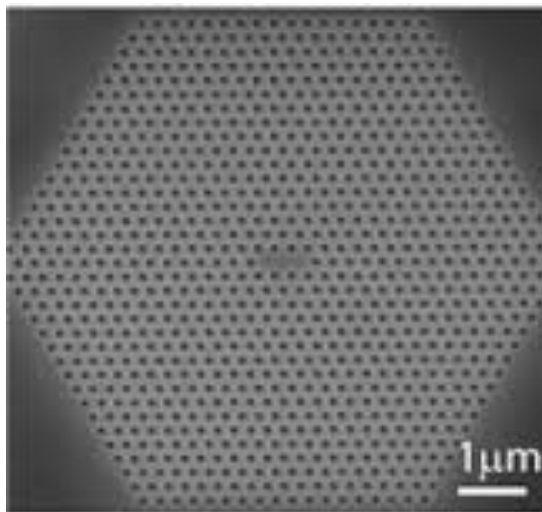
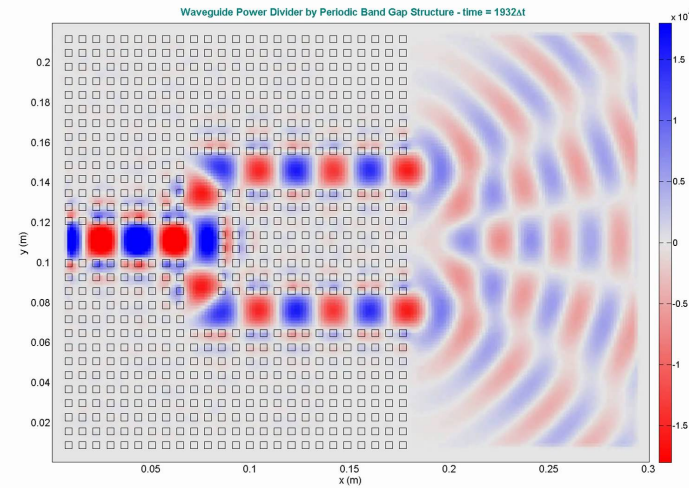
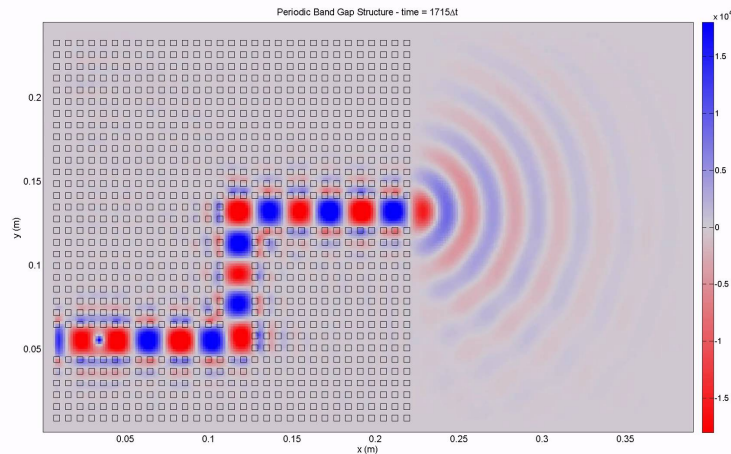
- Periodické struktury, které umožňují manipulaci se světlem vlivem interferenčních jevů





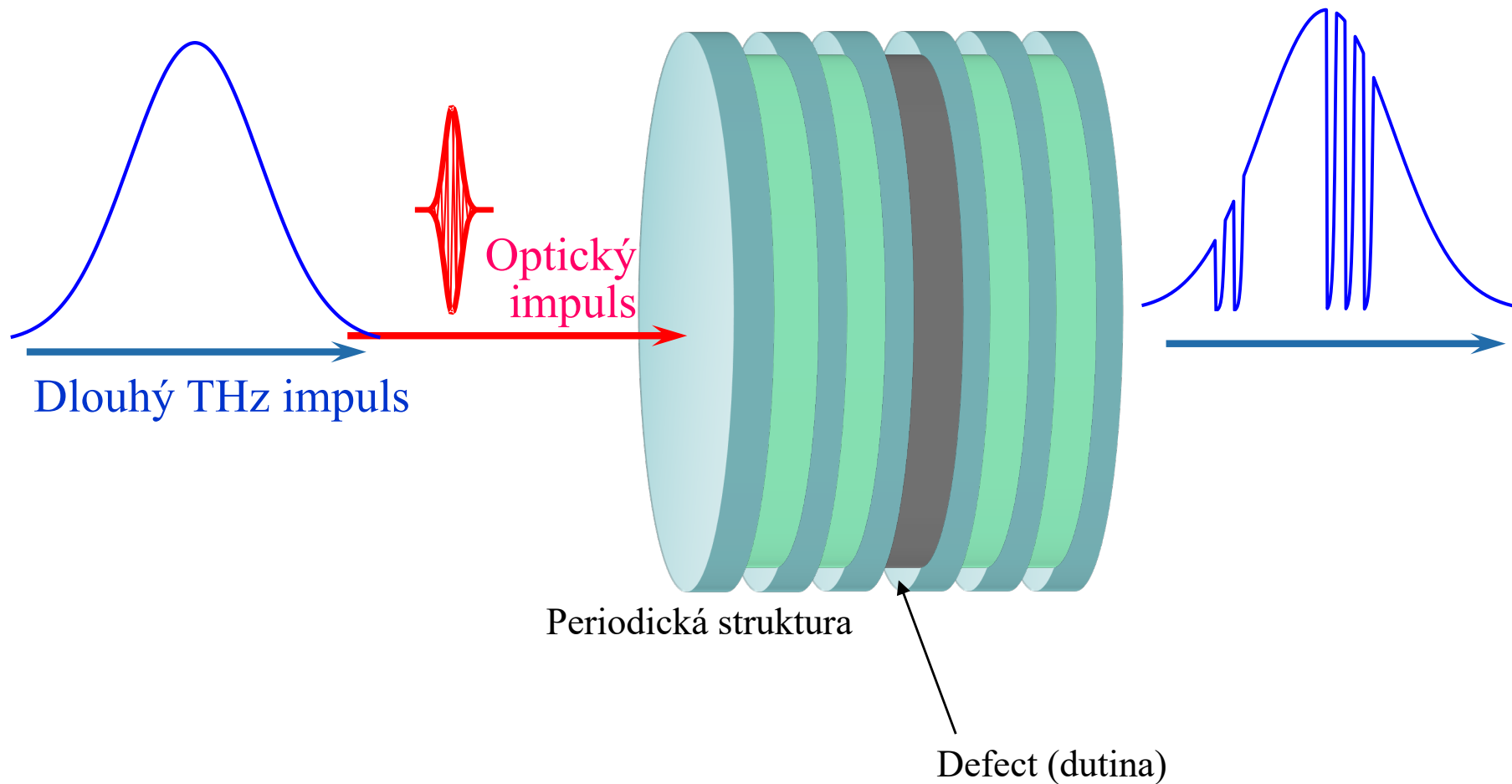
# Fotonické krystaly

- můžeme ovlivnit: směr šíření, rychlost šíření, odraz
- můžeme “uvěznit” světlo v dutině

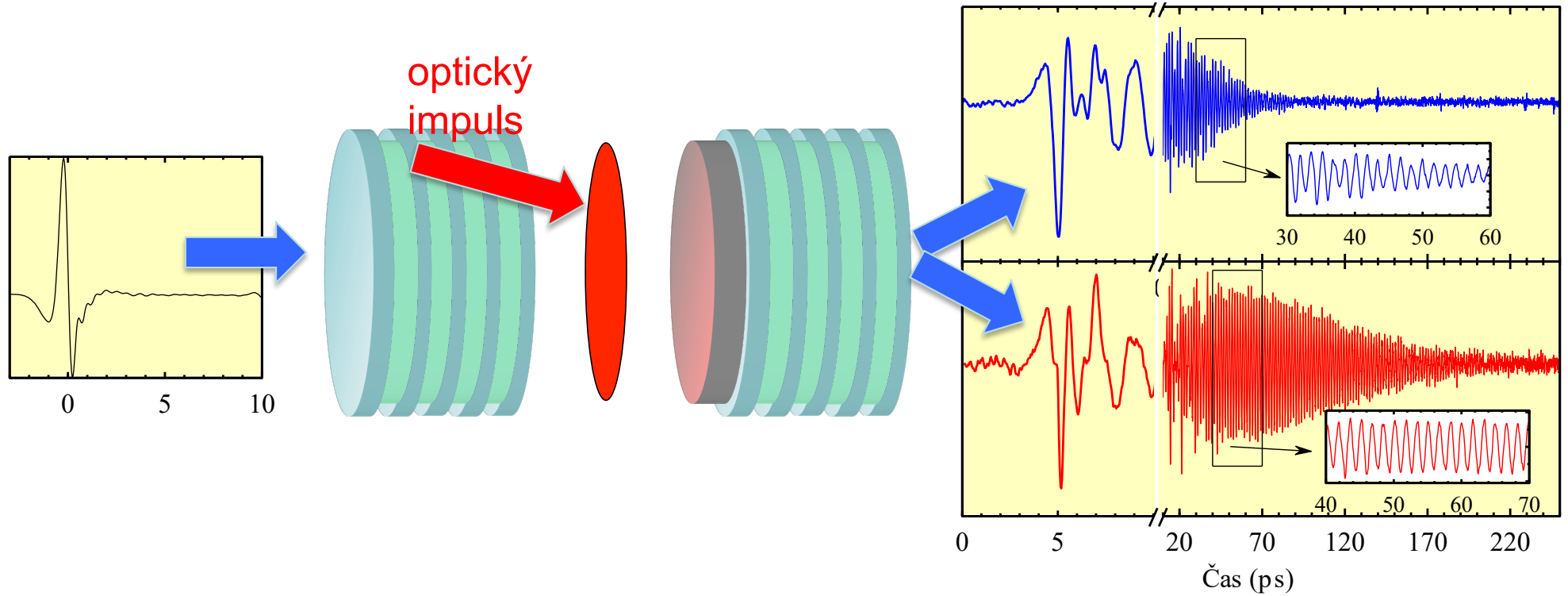


# Fotonické krystaly pro THz oblast

## Opticky řízený fotonický krystal: Opto-THz modulátor



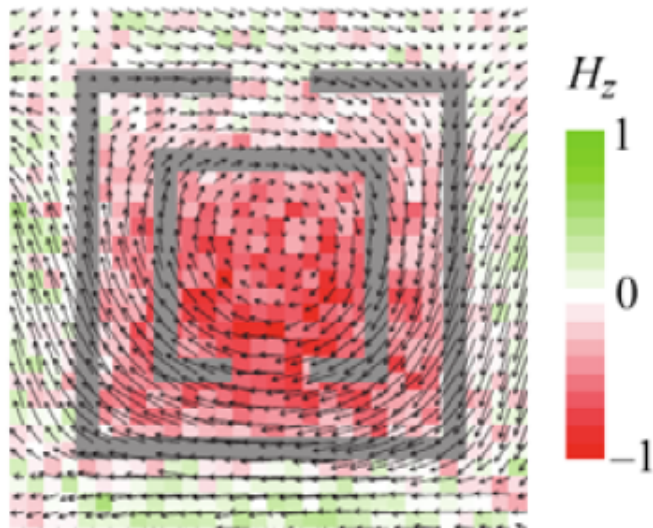
# Fotonické krystaly pro THz oblast



# Pozorování kmitů světla v rezonančních strukturách

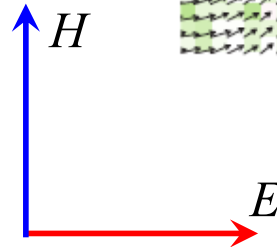
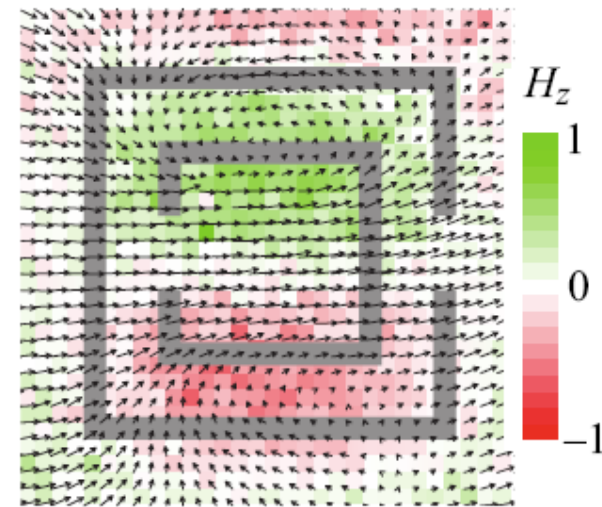
Elektrické a magnetické pole vlny v blízkosti rezonanční struktury

(a) A1 (75 GHz) Experiment



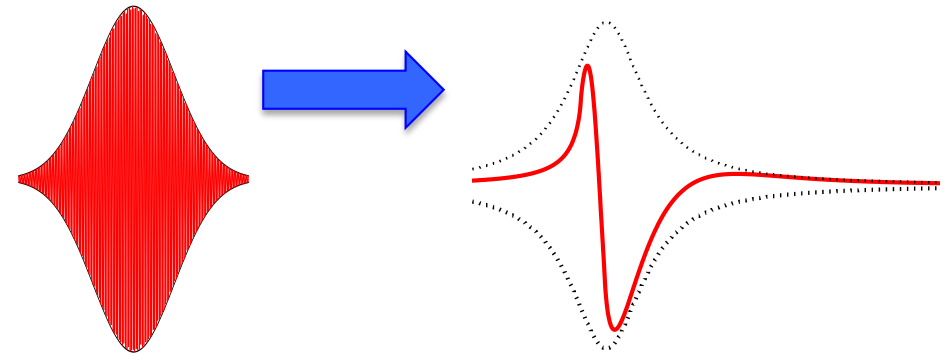
500  $\mu\text{m}$

(a) B1 (180 GHz) Experiment

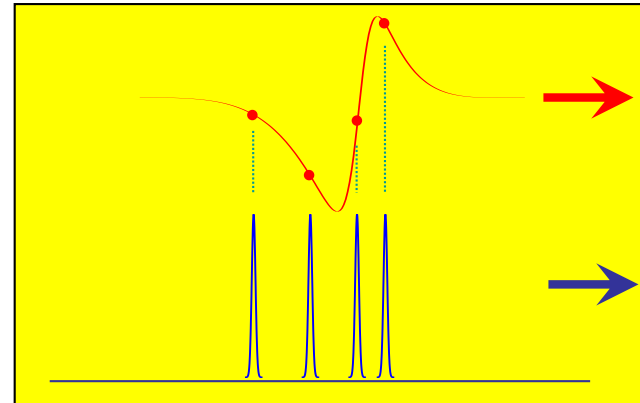


# Rekapitulace

■ Generování THz impulsů:



■ Detekce elektrického pole:



■ Pozorování kmitů světla:

