

Základní pojmy

Elektromagnetické spektrum

Princip fungování laserů

Ultrakrátké pulzy

ELI beamlines

Struktura budovy

Blokové schéma laseru

Základní technologie

Výzkumné programy

Experimentální místnosti

Cílové aplikace

Výkonné laserové systémy ve světě

ELI beamlines

Laserové a optické technologie

Martin Fibrich¹

¹Fyzikální ústav Akademie věd ČR, v.v.i

20.3.2012

Základní pojmy

Elektromagnetické spektrum

Princip fungování laserů

Ultrakrátké pulzy

ELI beamlines

Struktura budovy

Blokové schéma laseru

Základní technologie

Výzkumné programy

Experimentální místnosti

Cílové aplikace

Výkonné laserové systémy ve světě

1 Základní pojmy

Elektromagnetické spektrum
Princip fungování laserů
Ultrakrátké pulzy

2 ELI beamlines

Struktura budovy
Blokové schéma laseru
Základní technologie

3 Výzkumné programy

Experimentální místnosti
Cílové aplikace
Výkonné laserové systémy ve světě

Základní pojmy

Elektromagnetické spektrum

Princip fungování laserů

Ultrakrátké pulzy

ELI beamlines

Struktura budovy

Blokové schéma laseru

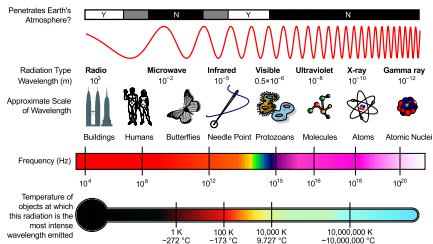
Základní technologie

Výzkumné programy

Experimentální místnosti

Cílové aplikace

Výkonné laserové systémy ve světě



- ▶ Elektromagnetické záření všech možných vlnových délek

Základní pojmy

Elektromagnetické spektrum

Princip fungování laserů

Ultrakrátké pulzy

ELI beamlines

Struktura budovy

Blokové schéma laseru

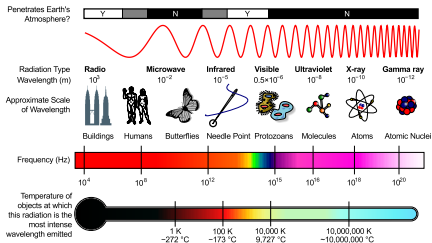
Základní technologie

Výzkumné programy

Experimentální místnosti

Cílové aplikace

Výkonné laserové systémy ve světě



- ▶ Elektromagnetické záření všech možných vlnových délek
- ▶ Částicový charakter EM záření ⇒ **fotony**

Základní pojmy

Elektromagnetické spektrum

Princip fungování laserů

Ultrakrátké pulzy

ELI beamlines

Struktura budovy

Blokové schéma laseru

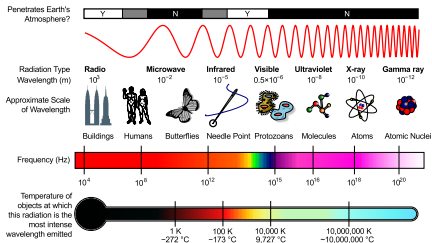
Základní technologie

Výzkumné programy

Experimentální místnosti

Cílové aplikace

Výkonné laserové systémy ve světě



- ▶ Elektromagnetické záření všech možných vlnových délek
- ▶ Částicový charakter EM záření ⇒ **fotony**
- ▶ Fotony – kvanta EM záření s charakteristickou energií

Energie fotonu

$$E = h\nu = h \frac{c}{\lambda} ;$$

h – Planckova konstanta, ν – frekvence, c – rychlost světla, λ – vlnová délka

Elektromagnetické spektrum

Časové měřítko

Základní pojmy

Elektromagnetické spektrum

Princip fungování laserů

Ultračtrátké pulzy

ELI beamlines

Struktura budovy

Blokové schéma laseru

Základní technologie

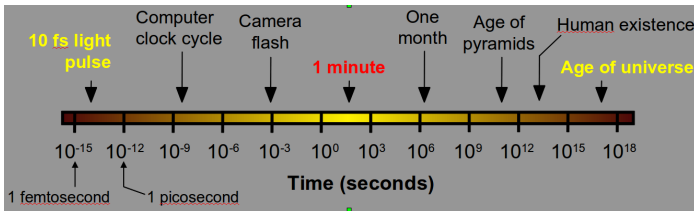
Výzkumné programy

Experimentální místnosti

Cílové aplikace

Výkonné laserové systémy ve světě

- ▶ Je rutina generovat pulzy $< 1 \text{ ps}$ (10^{-12} s)
- ▶ Vědci na světě generují pulzy v řádu femtosekund (10^{-15} s)
- ▶ Takový puls se má k jedné minutě jako se má minuta k době trvání vesmíru



<http://public.me.com/ricktrebino>

Elektromagnetické spektrum

Časové měřítko

Základní pojmy

Elektromagnetické spektrum

Princip fungování laserů
Ultrakrátké pulzy

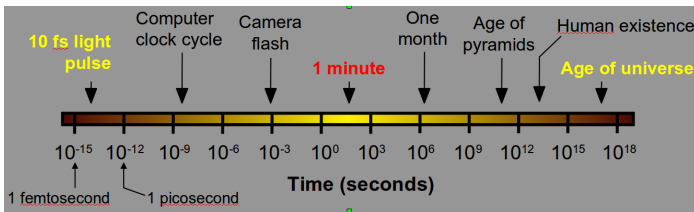
ELI beamlines

Struktura budovy
Blokové schéma laseru
Základní technologie

Výzkumné programy

Experimentální místnosti
Cílové aplikace
Výkonné laserové systémy ve světě

- ▶ Je rutina generovat pulzy $< 1 \text{ ps}$ (10^{-12} s)
- ▶ Vědci na světě generují pulzy v řádu femtosekund (10^{-15} s)
- ▶ Takový puls se má k jedné minutě jako se má minuta k době trvání vesmíru



<http://public.me.com/ricktrebino>

- ▶ 1 ns pulz → 30 cm balík fotonů, 1 fs pulz → 0.3 μm balík fotonů

Elektromagnetické spektrum

Časové měřítko

Základní pojmy

Elektromagnetické spektrum

Princip fungování laserů
Ultrakrátké pulzy

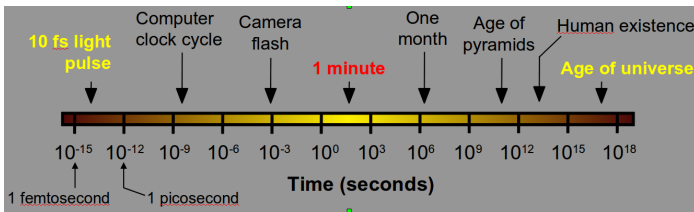
ELI beamlines

Struktura budovy
Blokové schéma laseru
Základní technologie

Výzkumné programy

Experimentální místnosti
Cílové aplikace
Výkonné laserové systémy ve světě

- ▶ Je rutina generovat pulzy $< 1 \text{ ps}$ (10^{-12} s)
- ▶ Vědci na světě generují pulzy v řádu femtosekund (10^{-15} s)
- ▶ Takový puls se má k jedné minutě jako se má minuta k době trvání vesmíru



<http://public.me.com/ricktrebino>

- ▶ 1 ns pulz \rightarrow 30 cm balík fotonů, 1 fs pulz \rightarrow 0.3 μm balík fotonů

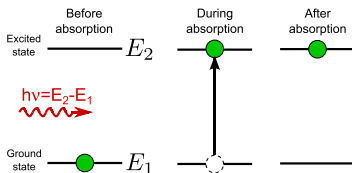
Využití

Měření rychlých procesů, snímání na dálku (remote sensing), mikroobrábění, . . .

Generace laserového záření

Absorpce, emise, stimulovaná emise

Absorpce



Základní pojmy

Elektromagnetické spektrum

Princip fungování laserů

Ultrakrátké pulzy

ELI beamlines

Struktura budovy

Blokové schéma laseru

Základní technologie

Výzkumné programy

Experimentální místnosti

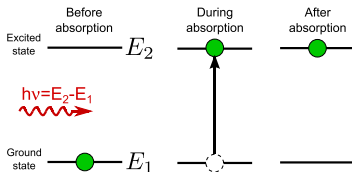
Cílové aplikace

Výkonné laserové systémy ve světě

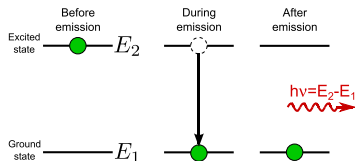
Generace laserového záření

Absorpce, emise, stimulovaná emise

Absorpce



Emise



Základní pojmy

Elektromagnetické spektrum

Princip fungování laserů

Ultrakrátké pulzy

ELI beamlines

Struktura budovy

Blokové schéma laseru

Základní technologie

Výzkumné programy

Experimentální místnosti

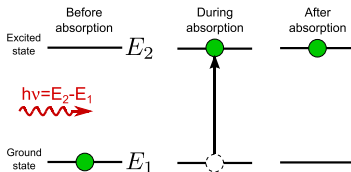
Cílové aplikace

Výkonné laserové systémy ve světě

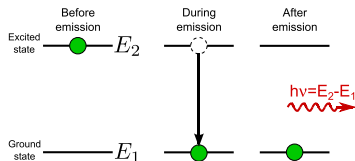
Generace laserového záření

Absorpce, emise, stimulovaná emise

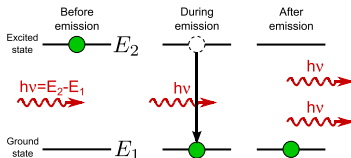
Absorpce



Emise



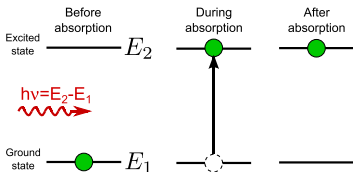
Stimulovaná emise



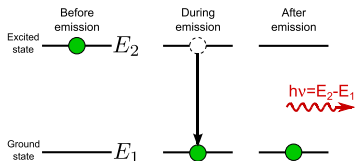
Generace laserového záření

Absorpce, emise, stimulovaná emise

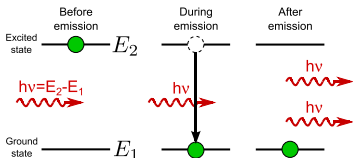
Absorpce



Emise

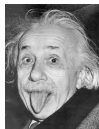


Stimulovaná emise



Einsteinovy koeficienty

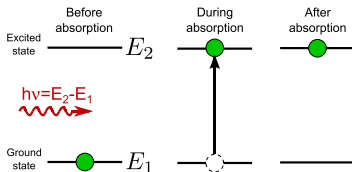
$$B_{12}, B_{21}, A_{21}$$



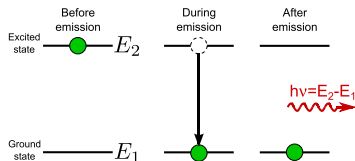
Generace laserového záření

Absorpce, emise, stimulovaná emise

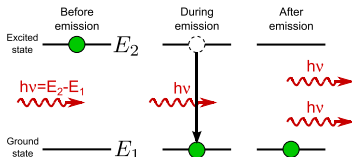
Absorpce



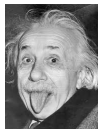
Emise



Stimulovaná emise



Einsteinovy koeficienty



$$B_{12}, B_{21}, A_{21}$$

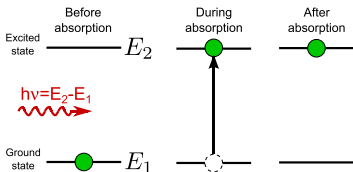
Platí

$$B_{12} = B_{21}; \frac{A_{21}}{B_{21}} \sim f^3$$

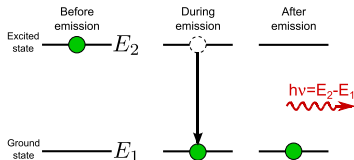
Generace laserového záření

Absorpce, emise, stimulovaná emise

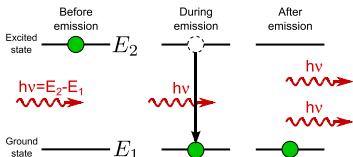
Absorpce



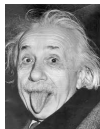
Emise



Stimulovaná emise



Einsteinovy koeficienty


 B_{12}, B_{21}, A_{21}

Platí

$$B_{12} = B_{21}; \quad \frac{A_{21}}{B_{21}} \sim f^3$$

- ▶ Pro zesilování nutné dosáhnout inverze populace hladin
- ▶ U 2-hladinového systému není možné, protože $B_{12} = B_{21}$; maximálně rovnost

Generace laserového záření

Aktivní prostředí dle laserových hladin

Základní pojmy

Elektromagnetické spektrum

Princip fungování laserů

Ultračtrátké pulzy

ELI beamlines

Struktura budovy

Blokové schéma laseru

Základní technologie

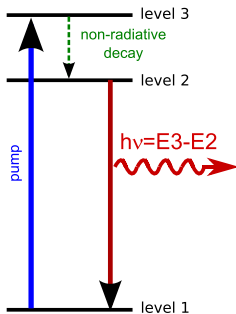
Výzkumné programy

Experimentální místnosti

Cílové aplikace

Výkonné laserové systémy ve světě

3-hladinové schéma



4-hladinové schéma

Kvazi-3-hladinové schéma

Generace laserového záření

Aktivní prostředí dle laserových hladin

Základní pojmy

Elektromagnetické spektrum

Princip fungování laserů

Ultračtrátké pulzy

ELI beamlines

Struktura budovy

Blokové schéma laseru

Základní technologie

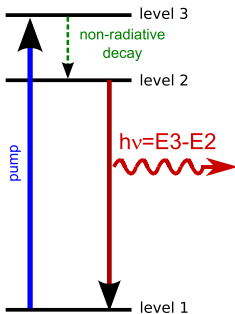
Výzkumné programy

Experimentální místnosti

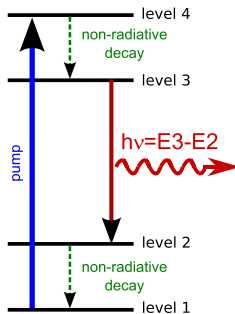
Cílové aplikace

Výkonné laserové systémy ve světě

3-hladinové schéma



4-hladinové schéma



Kvazi-3-hladinové schéma

Generace laserového záření

Aktivní prostředí dle laserových hladin

Základní pojmy

Elektromagnetické spektrum

Princip fungování laserů

Ultrařádké pulzy

ELI beamlines

Struktura budovy

Blokové schéma laseru

Základní technologie

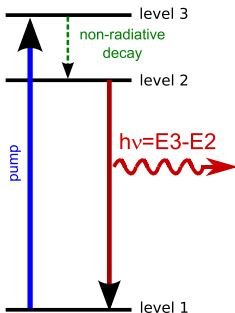
Výzkumné programy

Experimentální místnosti

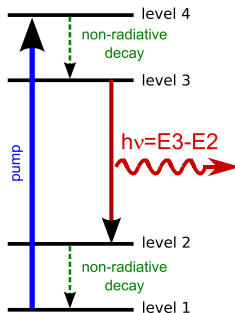
Cílové aplikace

Výkonné laserové systémy ve světě

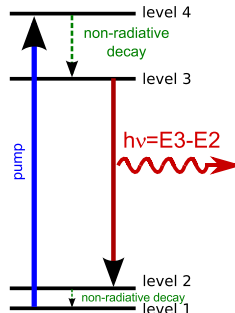
3-hladinové schéma



4-hladinové schéma



Kvazi-3-hladinové schéma



Generace laserového záření

Základní části laseru

Základní pojmy

Elektromagnetické spektrum

Princip fungování laserů

Ultračtrátké pulzy

ELI beamlines

Struktura budovy

Blokové schéma laseru

Základní technologie

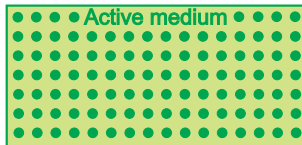
Výzkumné programy

Experimentální místnosti

Cílové aplikace

Výkonné laserové systémy ve světě

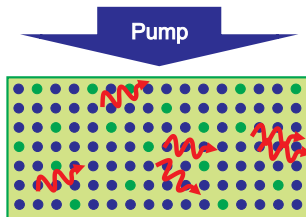
- ▶ Aktivní prostředí (pevná látka, kapalina, plyn, polovodič, plasma)



Generace laserového záření

Základní části laseru

- ▶ Aktivní prostředí (pevná látka, kapalina, plyn, polovodič, plasma)
- ▶ Čerpání (nekoherentní, koherentní)



Základní pojmy

Elektromagnetické spektrum

Princip fungování laserů

Ultra krátké pulzy

ELI beamlines

Struktura budovy

Blokové schéma laseru

Základní technologie

Výzkumné programy

Experimentální místnosti

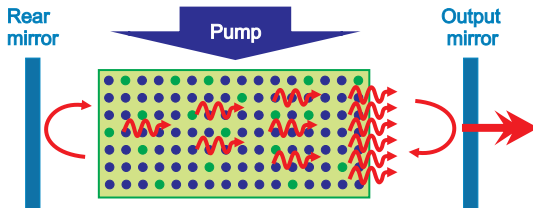
Cílové aplikace

Výkonné laserové systémy ve světě

Generace laserového záření

Základní části laseru

- ▶ Aktivní prostředí (pevná látka, kapalina, plyn, polovodič, plasma)
- ▶ Čerpání (nekoherentní, koherentní)
- ▶ Laserový rezonátor = kladná zpětná vazba



Základní pojmy

Elektromagnetické spektrum

Princip fungování laserů

Ultrakrátké pulzy

ELI beamlines

Struktura budovy

Blokové schéma laseru

Základní technologie

Výzkumné programy

Experimentální místnosti

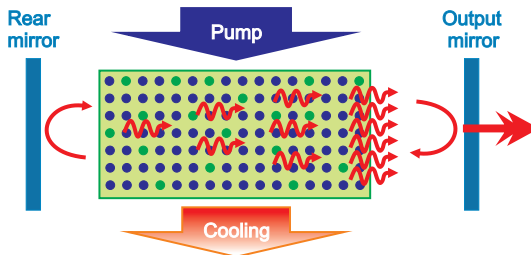
Cílové aplikace

Výkonné laserové systémy ve světě

Generace laserového záření

Základní části laseru

- ▶ Aktivní prostředí (pevná látka, kapalina, plyn, polovodič, plasma)
- ▶ Čerpání (nekoherentní, koherentní)
- ▶ Laserový rezonátor = kladná zpětná vazba
- ▶ Chlazení



Základní pojmy

Elektromagnetické spektrum

Princip fungování laserů

Ultrakrátké pulzy

ELI beamlines

Struktura budovy

Blokové schéma laseru

Základní technologie

Výzkumné programy

Experimentální místnosti

Cílové aplikace

Výkonné laserové systémy ve světě

Základní pojmy

Elektromagnetické spektrum

Princip fungování laserů

Ultrakrátké pulzy

ELI beamlines

Struktura budovy

Blokové schéma laseru

Základní technologie

Výzkumné programy

Experimentální místnosti

Cílové aplikace

Výkonné laserové systémy ve světě

- ▶ **Generace laserovými oscilátory v režimu synchronizace módů (mode-locking)**
- ▶ Kratším pulzům odpovídá nutně větší šířka generovaného spektra; svázáno Fourierovou transformací
- ▶ Nejkratší pulzy generované přímo z laseru jsou okolo 5 fs – Ti:safír 800 nm
- ▶ Kratších pulzů (v řádech attosekund) lze dosáhnout pomocí HHG v nelineárním prostředí
- ▶ Díky krátké době trvání lze dosáhnout po krátkou dobu neuvěřitelně vysokých výkonů i při nízké energii v pulzu
 - ▶ např. $10 \text{ mJ} / 10 \text{ fs} = 1 \text{ TW}$ (odpovídá asi 1000 bloků Temelína, a to z laseru, který se vejde na větší stůl!)
- ▶ **V ELI – Beamlines se počítá s lasery o špičkových výkonech až 10 PW!**

Základní pojmy

Elektromagnetické spektrum

Princip fungování laserů

Ultrakrátké pulzy

ELI beamlines

Struktura budovy

Blokové schéma laseru

Základní technologie

Výzkumné programy

Experimentální místnosti

Cílové aplikace

Výkonné laserové systémy ve světě

- ▶ Generace laserovými oscilátory v režimu synchronizace módů (mode-locking)
- ▶ **Kratším pulzům odpovídá nutně větší šířka generovaného spektra; svázáno Fourierovou transformací**
- ▶ Nejkratší pulzy generované přímo z laseru jsou okolo 5 fs – Ti:safír 800 nm
- ▶ Kratších pulzů (v řádech attosekund) lze dosáhnout pomocí HHG v nelineárním prostředí
- ▶ Díky krátké době trvání lze dosáhnout po krátkou dobu neuvěřitelně vysokých výkonů i při nízké energii v pulzu
 - ▶ např. $10 \text{ mJ} / 10 \text{ fs} = 1 \text{ TW}$ (odpovídá asi 1000 bloků Temelína, a to z laseru, který se vejde na větší stůl!)
- ▶ V ELI – Beamlines se počítá s lasery o špičkových výkonech až 10 PW!

Základní pojmy

Elektromagnetické spektrum

Princip fungování laserů

Ultrakrátké pulzy

ELI beamlines

Struktura budovy

Blokové schéma laseru

Základní technologie

Výzkumné programy

Experimentální místnosti

Cílové aplikace

Výkonné laserové systémy ve světě

- ▶ Generace laserovými oscilátory v režimu synchronizace módů (mode-locking)
- ▶ Kratším pulzům odpovídá nutně větší šířka generovaného spektra; svázáno Fourierovou transformací
- ▶ **Nejkratší pulzy generované přímo z laseru jsou okolo 5 fs – Ti:safír 800 nm**
- ▶ Kratších pulzů (v řádech attosekund) lze dosáhnout pomocí HHG v nelineárním prostředí
- ▶ Díky krátké době trvání lze dosáhnout po krátkou dobu neuvěřitelně vysokých výkonů i při nízké energii v pulzu
 - ▶ např. $10 \text{ mJ} / 10 \text{ fs} = 1 \text{ TW}$ (odpovídá asi 1000 bloků Temelína, a to z laseru, který se vejde na větší stůl!)
- ▶ **V ELI – Beamlines se počítá s lasery o špičkových výkonech až 10 PW!**

Ultrakrátké pulzy

Základní pojmy

Elektromagnetické spektrum

Princip fungování laserů

Ultrakrátké pulzy

ELI beamlines

Struktura budovy

Blokové schéma laseru

Základní technologie

Výzkumné programy

Experimentální místnosti

Cílové aplikace

Výkonné laserové systémy ve světě

- ▶ Generace laserovými oscilátory v režimu synchronizace módů (mode-locking)
- ▶ Kratším pulzům odpovídá nutně větší šířka generovaného spektra; svázáno Fourierovou transformací
- ▶ Nejkratší pulzy generované přímo z laseru jsou okolo 5 fs – Ti:safír 800 nm
- ▶ **Kratších pulzů (v řádech attosekund) lze dosáhnout pomocí HHG v nelineárním prostředí**
- ▶ Díky krátké době trvání lze dosáhnout po krátkou dobu neuvěřitelně vysokých výkonů i při nízké energii v pulzu
 - ▶ např. $10 \text{ mJ} / 10 \text{ fs} = 1 \text{ TW}$ (odpovídá asi 1000 bloků Temelína, a to z laseru, který se vejde na větší stůl!)
- ▶ V ELI – Beamlines se počítá s lasery o špičkových výkonech až 10 PW!

Základní pojmy

Elektromagnetické spektrum

Princip fungování laserů

Ultrakrátké pulzy

ELI beamlines

Struktura budovy

Blokové schéma laseru

Základní technologie

Výzkumné programy

Experimentální místnosti

Cílové aplikace

Výkonné laserové systémy ve světě

- ▶ Generace laserovými oscilátory v režimu synchronizace módů (mode-locking)
- ▶ Kratším pulzům odpovídá nutně větší šířka generovaného spektra; svázáno Fourierovou transformací
- ▶ Nejkratší pulzy generované přímo z laseru jsou okolo 5 fs – Ti:safír 800 nm
- ▶ Kratších pulzů (v řádech attosekund) lze dosáhnout pomocí HHG v nelineárním prostředí
- ▶ Díky krátké době trvání lze dosáhnout po krátkou dobu neuvěřitelně vysokých výkonů i při nízké energii v pulzu
 - ▶ např. $10 \text{ mJ} / 10 \text{ fs} = 1 \text{ TW}$ (odpovídá asi 1000 bloků Temelína, a to z laseru, který se vejde na větší stůl!)
- ▶ V ELI – Beamlines se počítá s lasery o špičkových výkonech až 10 PW!

Ultrakrátké pulzy

Základní pojmy

Elektromagnetické spektrum

Princip fungování laserů

Ultrakrátké pulzy

ELI beamlines

Struktura budovy

Blokové schéma laseru

Základní technologie

Výzkumné programy

Experimentální místnosti

Cílové aplikace

Výkonné laserové systémy ve světě

- ▶ Generace laserovými oscilátory v režimu synchronizace módů (mode-locking)
- ▶ Kratším pulzům odpovídá nutně větší šířka generovaného spektra; svázáno Fourierovou transformací
- ▶ Nejkratší pulzy generované přímo z laseru jsou okolo 5 fs – Ti:safír 800 nm
- ▶ Kratších pulzů (v řádech attosekund) lze dosáhnout pomocí HHG v nelineárním prostředí
- ▶ Díky krátké době trvání lze dosáhnout po krátkou dobu neuvěřitelně vysokých výkonů i při nízké energii v pulzu
 - ▶ např. $10 \text{ mJ} / 10 \text{ fs} = 1 \text{ TW}$ (odpovídá asi 1000 bloků Temelína, a to z laseru, který se vejde na větší stůl!)
- ▶ V ELI – Beamlines se počítá s lasery o špičkových výkonech až 10 PW!

Ultrakrátké pulzy

Základní pojmy

Elektromagnetické spektrum

Princip fungování laserů

Ultrakrátké pulzy

ELI beamlines

Struktura budovy

Blokové schéma laseru

Základní technologie

Výzkumné programy

Experimentální místnosti

Cílové aplikace

Výkonné laserové systémy ve světě

- ▶ Generace laserovými oscilátory v režimu synchronizace módů (mode-locking)
- ▶ Kratším pulzům odpovídá nutně větší šířka generovaného spektra; svázáno Fourierovou transformací
- ▶ Nejkratší pulzy generované přímo z laseru jsou okolo 5 fs – Ti:safír 800 nm
- ▶ Kratších pulzů (v řádech attosekund) lze dosáhnout pomocí HHG v nelineárním prostředí
- ▶ Díky krátké době trvání lze dosáhnout po krátkou dobu neuvěřitelně vysokých výkonů i při nízké energii v pulzu
 - ▶ např. $10 \text{ mJ} / 10 \text{ fs} = 1 \text{ TW}$ (odpovídá asi 1000 bloků Temelína, a to z laseru, který se vejde na větší stůl!)
- ▶ **V ELI – Beamlines se počítá s lasery o špičkových výkonech až 10 PW!**

Generace fs pulzů

Synchronizace módů (Mode-locking)

Základní pojmy

Elektromagnetické spektrum

Princip fungování laserů

Ultrakrátké pulzy

ELI beamlines

Struktura budovy

Blokové schéma laseru

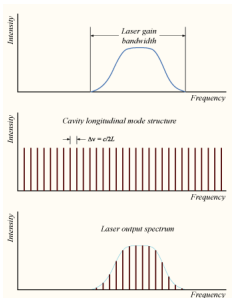
Základní technologie

Výzkumné programy

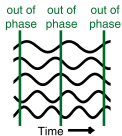
Experimentální místnosti

Cílové aplikace

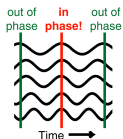
Výkonné laserové systémy ve světě



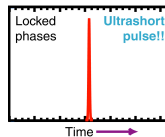
Random
phases
of all
laser
modes



Locked
phases
of all
laser
modes



Irradiance vs. time



Generace fs pulzů

Synchronizace módů (Mode-locking)

Základní pojmy

Elektromagnetické spektrum

Princip fungování laserů

Ultrakrátké pulzy

ELI beamlines

Struktura budovy

Blokové schéma laseru

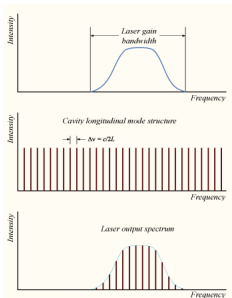
Základní technologie

Výzkumné programy

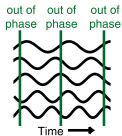
Experimentální místnosti

Cílové aplikace

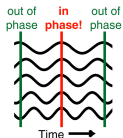
Výkonné laserové systémy ve světě



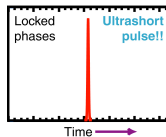
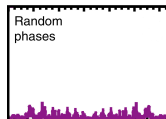
Random
phases
of all
laser
modes



Locked
phases
of all
laser
modes



Irradiance vs. time



Počet oscilujících módů

$$N = \frac{\Delta\omega_g}{\Delta\omega} = \Delta\omega_g \frac{2L_{res}}{c}$$

$\Delta\omega_g$ – šířka zisku nad prahem

$\Delta\omega$ – vzdálenost módů

L_{res} – délka rezonátoru

Délka pulzu, špičkový výkon

$$\Delta t \sim \frac{1}{N}$$

$$P_{peak} = N \times P_{mean}$$

N – počet oscilujících módů

Time-bandwidth product

$$\Delta t \Delta\nu = K$$

Δt – délka pulzu

$\Delta\nu$ – spektrální šířka pulzu

K – konst. závislá na tvaru pulzu

Zesilování fs pulzů

CPA = Chirped Pulse Amplification

Základní pojmy

Elektromagnetické spektrum

Princip fungování laserů

Ultrakrátké pulzy

ELI beamlines

Struktura budovy

Blokové schéma laseru

Základní technologie

Výzkumné programy

Experimentální místnosti

Cílové aplikace

Výkonné laserové systémy ve světě

Problém zesilování ultrakrátkých pulzů

- ▶ Ultrakrátké pulzy se vyznačují vysokou intenzitou záření
- ▶ Zesilování přímou cestou je limitováno prahem poškození optických komponent (zesilovacího prostředí)

Zesilování fs pulzů

CPA = Chirped Pulse Amplification

Základní pojmy

Elektromagnetické spektrum

Princip fungování laserů

Ultrakrátké pulzy

ELI beamlines

Struktura budovy

Blokové schéma laseru

Základní technologie

Výzkumné programy

Experimentální místnosti

Cílové aplikace

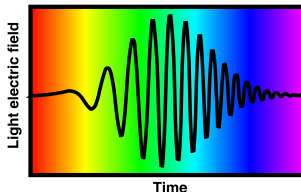
Výkonné laserové systémy ve světě

Problém zesilování ultrakrátkých pulzů

- ▶ Ultrakrátké pulzy se vyznačují vysokou intenzitou záření
- ▶ Zesilování přímou cestou je limitováno prahem poškození optických komponent (zesilovacího prostředí)

Řešení

- ▶ Časový chirp
- ▶ Běžně lze snížit intenzitu v řádu tisíců



Zesilování fs pulzů

CPA = Chirped Pulse Amplification

Základní pojmy

Elektromagnetické spektrum

Princip fungování laserů

Ultrakrátké pulzy

ELI beamlines

Struktura budovy

Blokové schéma laseru

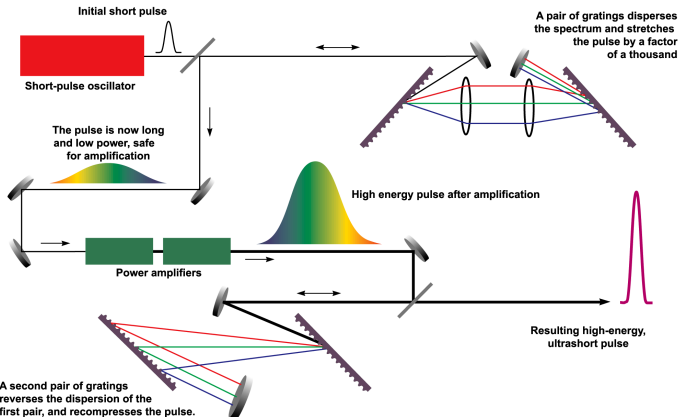
Základní technologie

Výzkumné programy

Experimentální místnosti

Cílové aplikace

Výkonné laserové systémy ve světě



Zesilování fs pulzů

Disperzní prvky

Základní pojmy

Elektromagnetické spektrum

Princip fungování laserů

Ultrakrátké pulzy

ELI beamlines

Struktura budovy

Blokové schéma laseru

Základní technologie

Výzkumné programy

Experimentální místnosti

Cílové aplikace

Výkonné laserové systémy ve světě

- ▶ Disperzní prvky – závislost fázové (grupové) rychlosti na frekvenci

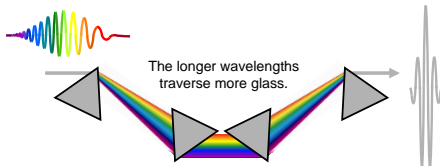
Zesilování fs pulzů

Disperzní prvky

- ▶ Disperzní prvky – závislost fázové (grupové) rychlosti na frekvenci

▶ Hranoly

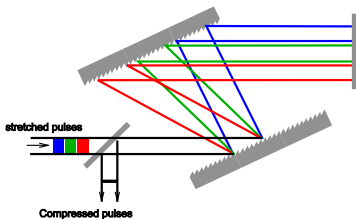
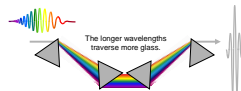
- ▶ Difrakční mřížky
- ▶ Chirpovaná zrcadla
- ▶ Optická vlákna, opt. prostředí s $n = n(\omega)$



Zesilování fs pulzů

Disperzní prvky

- ▶ Disperzní prvky – závislost fázové (grupové) rychlosti na frekvenci
- ▶ Hranoly
- ▶ **Difrakční mřížky**
- ▶ Chirpovaná zrcadla
- ▶ Optická vlákna, opt. prostředí s $n = n(\omega)$



Zesilování fs pulzů

Disperzní prvky

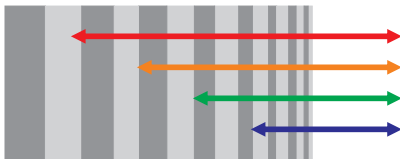
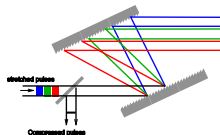
- ▶ Disperzní prvky – závislost fázové (grupové) rychlosti na frekvenci

- ▶ Hranoly

- ▶ Difrakční mřížky

- ▶ Chirpovaná zrcadla

- ▶ Optická vlákna, opt. prostředí s $n = n(\omega)$

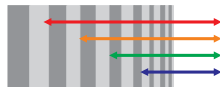
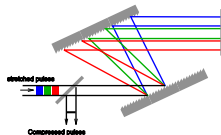
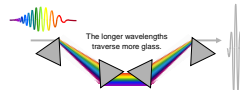


Zesilování fs pulzů

Disperzní prvky

- ▶ Disperzní prvky – závislost fázové (grupové) rychlosti na frekvenci

- ▶ Hranoly
- ▶ Difrakční mřížky
- ▶ Chirpovaná zrcadla
- ▶ Optická vlákna, opt. prostředí s $n = n(\omega)$

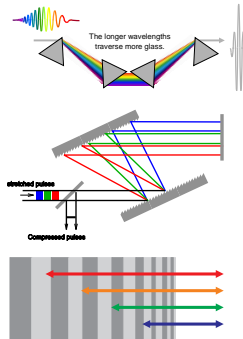


Zesilování fs pulzů

Disperzní prvky

- ▶ Disperzní prvky – závislost fázové (grupové) rychlosti na frekvenci

- ▶ Hranoly
- ▶ Difrakční mřížky
- ▶ Chirpovaná zrcadla
- ▶ Optická vlákna, opt. prostředí s $n = n(\omega)$



- ▶ Pro vysokovýkonové systémy se většinou používají difrakční mřížky v reflexním módu

Zesilování fs pulzů

Techniky SFG, SHG a OP(CP)A

Základní pojmy

Elektromagnetické spektrum

Princip fungování laserů

Ultrakrátké pulzy

ELI beamlines

Struktura budovy

Blokové schéma laseru

Základní technologie

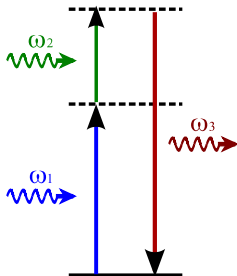
Výzkumné programy

Experimentální místnosti

Cílové aplikace

Výkonné laserové systémy ve světě

Sum Frequency Generation



Second Harmonic Generation

Optical Parametric (Chirped Pulse) Amplification

Zesilování fs pulzů

Techniky SFG, SHG a OP(CP)A

Základní pojmy

Elektromagnetické spektrum

Princip fungování laserů

Ultrakrátké pulzy

ELI beamlines

Struktura budovy

Blokové schéma laseru

Základní technologie

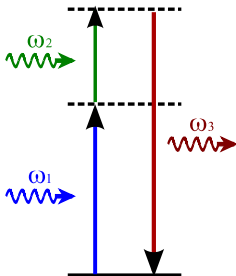
Výzkumné programy

Experimentální místnosti

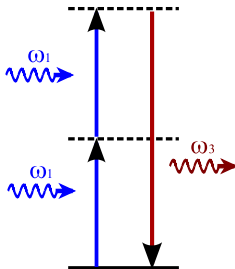
Cílové aplikace

Výkonné laserové systémy ve světě

Sum Frequency Generation



Second Harmonic Generation



Optical Parametric (Chirped Pulse) Amplification

Zesilování fs pulzů

Techniky SFG, SHG a OP(CP)A

Základní pojmy

Elektromagnetické spektrum

Princip fungování laserů

Ultrakrátké pulzy

ELI beamlines

Struktura budovy

Blokové schéma laseru

Základní technologie

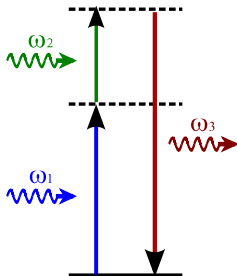
Výzkumné programy

Experimentální místnosti

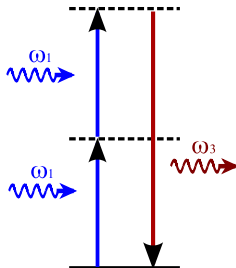
Cílové aplikace

Výkonné laserové systémy ve světě

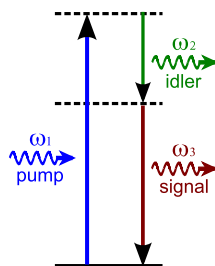
Sum Frequency Generation



Second Harmonic Generation



Optical Parametric (Chirped Pulse) Amplification



Zesilování fs pulzů

SHG a OPCPA – průchod prostředím

Základní pojmy

Elektromagnetické spektrum

Princip fungování laserů

Ultrakrátké pulzy

ELI beamlines

Struktura budovy

Blokové schéma laseru

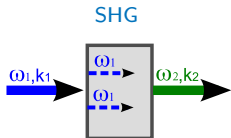
Základní technologie

Výzkumné programy

Experimentální místnosti

Cílové aplikace

Výkonné laserové systémy ve světě



OPCPA

Zákon zachování energie

$$\text{SHG: } \omega_2 = 2\omega_1$$

Zákon zachování hybnosti

Fázový synchronismus

$$\text{SHG: } \vec{k}_2 = 2\vec{k}_1$$

Zesilování fs pulzů

SHG a OPCPA – průchod prostředím

Základní pojmy

Elektromagnetické spektrum

Princip fungování laserů

Ultrakrátké pulzy

ELI beamlines

Struktura budovy

Blokové schéma laseru

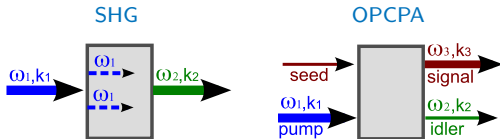
Základní technologie

Výzkumné programy

Experimentální místnosti

Cílové aplikace

Výkonné laserové systémy ve světě



Zákon zachování energie

$$\text{SHG: } \omega_2 = 2\omega_1$$

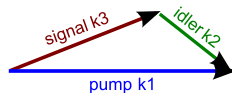
$$\text{OPCPA: } \omega_3 = \omega_1 - \omega_2$$

Zákon zachování hybnosti

Fázový synchronismus

$$\text{SHG: } \vec{k}_2 = 2\vec{k}_1$$

$$\text{OPCPA: } \vec{k}_3 = \vec{k}_1 - \vec{k}_2$$



Zesilování fs pulzů

SHG a OPCPA – průchod prostředím

Základní pojmy

Elektromagnetické spektrum

Princip fungování laserů

Ultrakrátké pulzy

ELI beamlines

Struktura budovy

Blokové schéma laseru

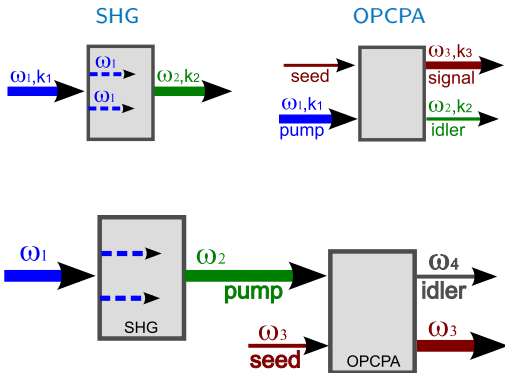
Základní technologie

Výzkumné programy

Experimentální místnosti

Cílové aplikace

Výkonné laserové systémy ve světě



Zákon zachování energie

$$\text{SHG: } \omega_2 = 2\omega_1$$

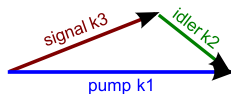
$$\text{OPCPA: } \omega_3 = \omega_1 - \omega_2$$

Zákon zachování hybnosti

Fázový synchronismus

$$\text{SHG: } \vec{k}_2 = 2\vec{k}_1$$

$$\text{OPCPA: } \vec{k}_3 = \vec{k}_1 - \vec{k}_2$$



Základní pojmy

Elektromagnetické spektrum

Princip fungování laserů

Ultrakrátké pulzy

ELI beamlines

Struktura budovy

Blokové schéma laseru

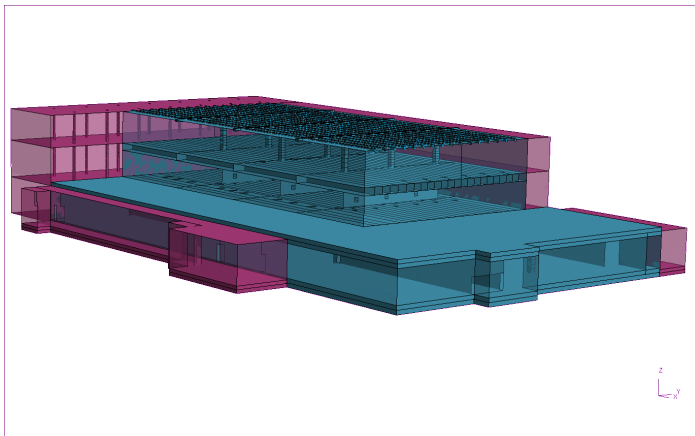
Základní technologie

Výzkumné programy

Experimentální místnosti

Cílové aplikace

Výkonné laserové systémy ve světě



- ▶ **Monolitická struktura** (laserové a experimentální technologie)
- ▶ **Podpůrné technologie** (vakuové pumpy, klimatizace, vedlejší laboratoře, ...)

Struktura budovy

Umístění laserů v budově

Základní pojmy

Elektromagnetické spektrum

Princip fungování laserů

Ultrakrátké pulzy

ELI beamlines

Struktura budovy

Blokové schéma laseru

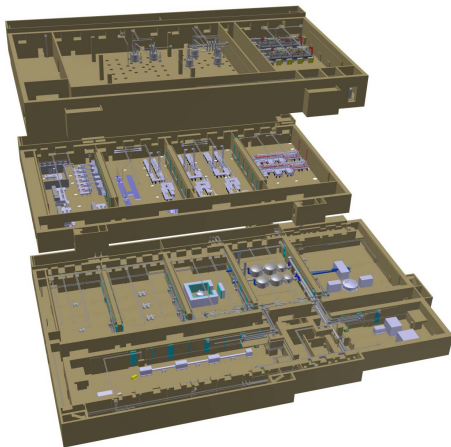
Základní technologie

Výzkumné programy

Experimentální místnosti

Cílové aplikace

Výkonné laserové systémy ve světě



1. patro

- ▶ 10 PW laser (L4a)
- ▶ Chlazení, kryogenika
- ▶ Podpůrné technologie

Přízemí

- ▶ Laserové haly (L1–L3)
- ▶ OPCPA zesilovače pro 10 PW laser (L4b)

Podzemí

- ▶ Kompresorové hala pro 10 PW laser (L4c)
- ▶ Kompresorová hala pro L1–L3
- ▶ Distribuce svazků ve vakuu
- ▶ 6 experimentálních hal

Blokové schéma laseru

Základní pojmy

Elektromagnetické spektrum

Princip fungování laserů

Ultrakrátké pulzy

ELI beamlines

Struktura budovy

Blokové schéma laseru

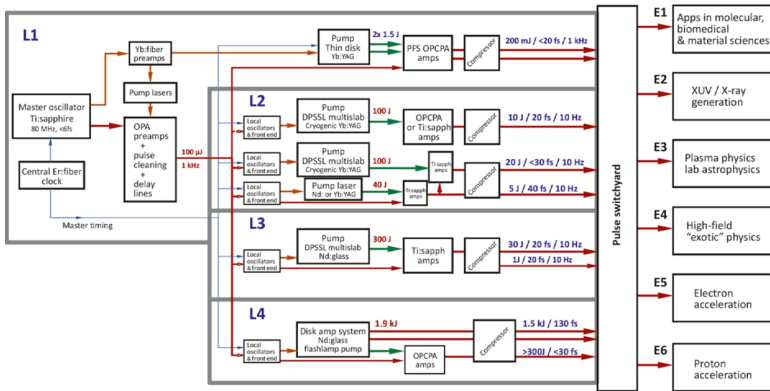
Základní technologie

Výzkumné programy

Experimentální místnosti

Cílové aplikace

Výkonné laserové systémy ve světě



Blokové schéma laseru

Základní pojmy

Elektromagnetické spektrum

Princip fungování laserů

Ultrarátké pulzy

ELI beamlines

Struktura budovy

Blokové schéma laseru

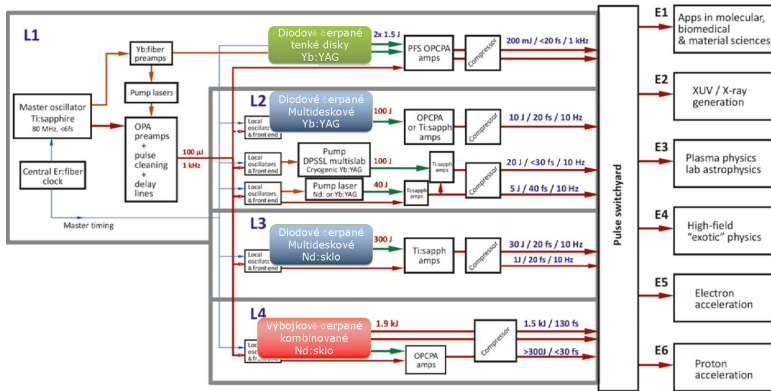
Základní technologie

Výzkumné programy

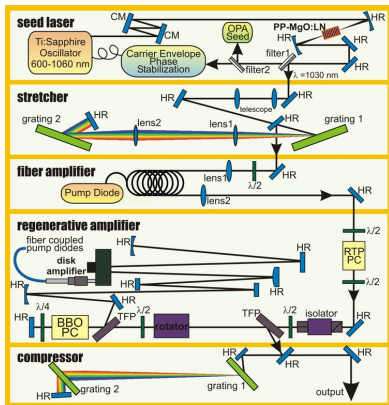
Experimentální místnosti

Cílové aplikace

Výkonné laserové systémy ve světě



Front-end — Počátek všeho



Thomas Metzger, MPQ

Front-end

a synchronizace laserových systémů

Základní pojmy

Elektromagnetické spektrum

Princip fungování laserů

Ultrarátké pulzy

ELI beamlines

Struktura budovy

Blokové schéma laseru

Základní technologie

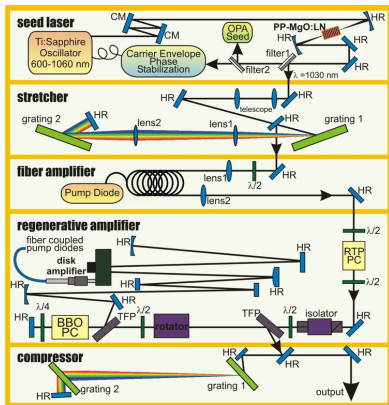
Výzkumné programy

Experimentální místnosti

Cílové aplikace

Výkonné laserové systémy ve světě

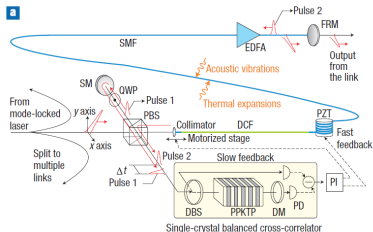
Front-end — Počátek všeho



Thomas Metzger, MPQ

Synchronizace laserových systémů

- ▶ Unikátní na projektu ELI Beamlines – v jedné budově několik výkonných fs laserů s odlišnými parametry
- ▶ Snaha dosáhnout i vzájemné časové synchronizace mezi všemi lasery v budově a to na úrovni až desítek fs v experimentálních halách
- ▶ Běžná elektronická signalizace (ns) zdaleka nestačí
- ▶ fs synchronizace lze dosáhnout pouze opticky pomocí optických cross-korelátorů



Jungwon K., et al., Nature photonics, Vol. 2, 2008

Základní pojmy

Elektromagnetické spektrum

Princip fungování laserů

Ultračtrátké pulzy

ELI beamlines

Struktura budovy

Blokové schéma laseru

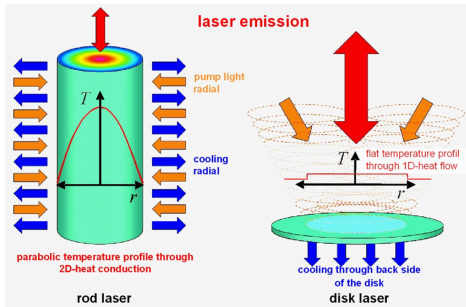
Základní technologie

Výzkumné programy

Experimentální místnosti

Cílové aplikace

Výkonné laserové systémy ve světě



Výhody

- ▶ Účinné chlazení (tloušťka 100–900 μm)
- ▶ Téměř nedochází ke vzniku tepelné čočky
- ▶ kHz opakovací frekvence i vysoké energie
- ▶ Výborná kvalita svazku a stabilita generace
- ▶ "Power scalability" $\approx d^2$

Technologie tenkých disků

Základní pojmy

Elektromagnetické spektrum

Princip fungování laserů

Ultrakrátké pulzy

ELI beamlines

Struktura budovy

Blokové schéma laseru

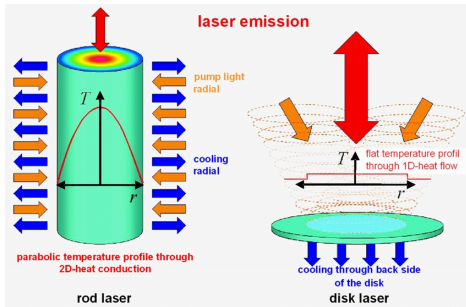
Základní technologie

Výzkumné programy

Experimentální místnosti

Cílové aplikace

Výkonné laserové systémy ve světě

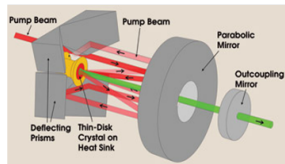


Výhody

- ▶ Účinné chlazení (tloušťka 100–900 μm)
- ▶ Téměř nedochází ke vzniku tepelné čočky
- ▶ kHz opakovací frekvence i vysoké energie
- ▶ Výborná kvalita svazku a stabilita generace
- ▶ "Power scalability" $\approx d^2$

Nevýhody

- ▶ Nízký zisk na 1 průchod, proto



Technologie tenkých disků

Aktivní prostředí Yb:YAG

Základní pojmy

Elektromagnetické spektrum

Princip fungování laserů

Ultrakrátké pulzy

ELI beamlines

Struktura budovy

Blokové schéma laseru

Základní technologie

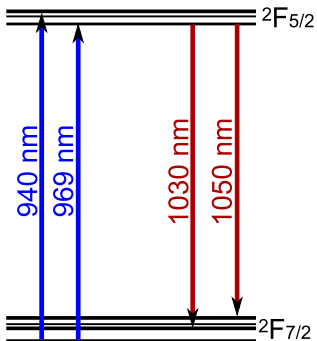
Výzkumné programy

Experimentální místnosti

Cílové aplikace

Výkonné laserové systémy ve světě

Zjednodušené schéma energetických hladin Yb:YAG



Proč ionty Yb?

- ▶ **Velice jednoduchá struktura elektronických hladin – pouze 2 pásy** ⇒
 - ▶ Žádná absorpce z excitovaného stavu "Excited-state absorption"
 - ▶ Minimum nežádoucích cross-relaxačních procesů
- ▶ Malý kvantový defekt (poměr λ_L/λ_P) ⇒ vysoká laserová účinnost, výrazné snížení tepelných efektů
- ▶ Dostatečně široké spektrum zisku ⇒ přeladitelnost + generace ultrakrátkých pulzů
- ▶ Poměrně dlouhá doba života el. na horní laserové hladině (1-2 ms) ⇒ Q-spínání
- ▶ Absorpční pásy 940 nm, 969 nm – čerpání komerčně dostupnými las. diodami ⇒ účinnost

Technologie tenkých disků

Aktivní prostředí Yb:YAG

Základní pojmy

Elektromagnetické spektrum

Princip fungování laserů

Ultrakrátké pulzy

ELI beamlines

Struktura budovy

Blokové schéma laseru

Základní technologie

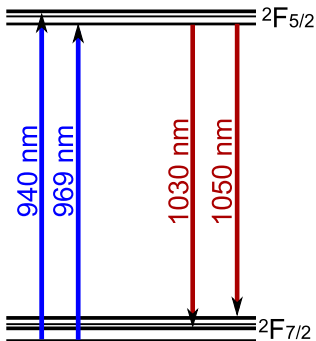
Výzkumné programy

Experimentální místnosti

Cílové aplikace

Výkonné laserové systémy ve světě

Zjednodušené schéma energetických hladin Yb:YAG



Proč ionty Yb?

- ▶ Velice jednoduchá struktura elektronických hladin – pouze 2 pásy ⇒
 - ▶ Žádná absorpce z excitovaného stavu "Excited-state absorption"
 - ▶ Minimum nežádoucích cross-relaxačních procesů
- ▶ Malý kvantový defekt (poměr λ_L/λ_P) ⇒ vysoká laserová účinnost, výrazné snížení tepelných efektů
- ▶ Dostatečně široké spektrum zisku ⇒ přeladitelnost + generace ultrakrátkých pulzů
- ▶ Poměrně dlouhá doba života el. na horní laserové hladině (1-2 ms) ⇒ Q-spínání
- ▶ Absorpční pásy 940 nm, 969 nm – čerpání komerčně dostupnými las. diodami ⇒ účinnost

Technologie tenkých disků

Aktivní prostředí Yb:YAG

Základní pojmy

Elektromagnetické spektrum

Princip fungování laserů

Ultrakrátké pulzy

ELI beamlines

Struktura budovy

Blokové schéma laseru

Základní technologie

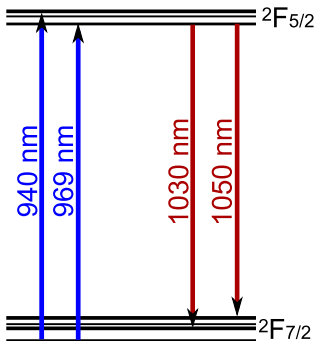
Výzkumné programy

Experimentální místnosti

Cílové aplikace

Výkonné laserové systémy ve světě

Zjednodušené schéma energetických hladin Yb:YAG



Proč ionty Yb?

- ▶ Velice jednoduchá struktura elektronických hladin – pouze 2 pásy \Rightarrow
 - ▶ Žádná absorpce z excitovaného stavu "Excited-state absorption"
 - ▶ Minimum nežádoucích cross-relaxačních procesů
- ▶ Malý kvantový defekt (poměr λ_L/λ_P) \Rightarrow vysoká laserová účinnost, výrazné snížení tepelných efektů
- ▶ Dostatečně široké spektrum zisku \Rightarrow přeladitelnost + generace ultrakrátkých pulzů
- ▶ Poměrně dlouhá doba života el. na horní laserové hladině (1-2 ms) \Rightarrow Q-spínání
- ▶ Absorpční pásy 940 nm, 969 nm – čerpání komerčně dostupnými las. diodami \Rightarrow účinnost

Technologie tenkých disků

Aktivní prostředí Yb:YAG

Základní pojmy

Elektromagnetické spektrum

Princip fungování laserů

Ultrakrátké pulzy

ELI beamlines

Struktura budovy

Blokové schéma laseru

Základní technologie

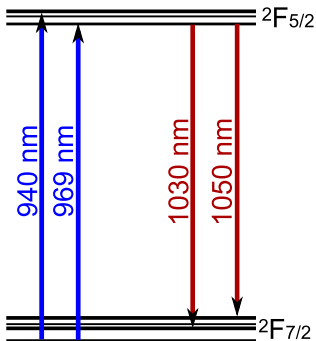
Výzkumné programy

Experimentální místnosti

Cílové aplikace

Výkonné laserové systémy ve světě

Zjednodušené schéma energetických hladin Yb:YAG



Proč ionty Yb?

- ▶ Velice jednoduchá struktura elektronických hladin – pouze 2 pásy \Rightarrow
 - ▶ Žádná absorpce z excitovaného stavu "Excited-state absorption"
 - ▶ Minimum nežádoucích cross-relaxačních procesů
- ▶ Malý kvantový defekt (poměr λ_L/λ_P) \Rightarrow vysoká laserová účinnost, výrazné snížení tepelných efektů
- ▶ Dostatečně široké spektrum zisku \Rightarrow přeladitelnost + generace ultrakrátkých pulzů
- ▶ Poměrně dlouhá doba života el. na horní laserové hladině (1-2 ms) \Rightarrow Q-spínání
- ▶ Absorpční pásy 940 nm, 969 nm – čerpání komerčně dostupnými las. diodami \Rightarrow účinnost

Technologie tenkých disků

Aktivní prostředí Yb:YAG

Základní pojmy

Elektromagnetické spektrum

Princip fungování laserů

Ultrakrátké pulzy

ELI beamlines

Struktura budovy

Blokové schéma laseru

Základní technologie

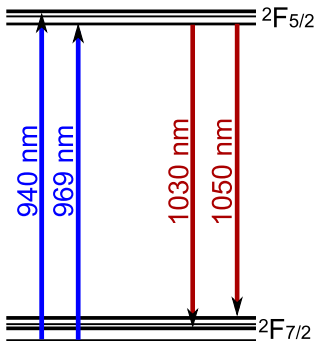
Výzkumné programy

Experimentální místnosti

Cílové aplikace

Výkonné laserové systémy ve světě

Zjednodušené schéma energetických hladin Yb:YAG



Proč ionty Yb?

- ▶ Velice jednoduchá struktura elektronických hladin – pouze 2 pásy \Rightarrow
 - ▶ Žádná absorpce z excitovaného stavu "Excited-state absorption"
 - ▶ Minimum nežádoucích cross-relaxačních procesů
- ▶ Malý kvantový defekt (poměr λ_L/λ_P) \Rightarrow vysoká laserová účinnost, výrazné snížení tepelných efektů
- ▶ Dostatečně široké spektrum zisku \Rightarrow přeladitelnost + generace ultrakrátkých pulzů
- ▶ Poměrně dlouhá doba života el. na horní laserové hladině (1-2 ms) \Rightarrow Q-spínání
- ▶ Absorpční pásy 940 nm, 969 nm – čerpání komerčně dostupnými las. diodami \Rightarrow účinnost

Technologie tenkých disků

Aktivní prostředí Yb:YAG

Základní pojmy

Elektromagnetické spektrum

Princip fungování laserů

Ultrakrátké pulzy

ELI beamlines

Struktura budovy

Blokové schéma laseru

Základní technologie

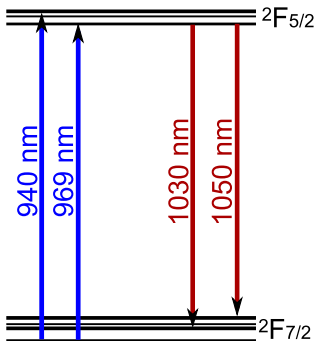
Výzkumné programy

Experimentální místnosti

Cílové aplikace

Výkonné laserové systémy ve světě

Zjednodušené schéma energetických hladin Yb:YAG



Proč ionty Yb?

- ▶ Velice jednoduchá struktura elektronických hladin – pouze 2 pásy \Rightarrow
 - ▶ Žádná absorpce z excitovaného stavu "Excited-state absorption"
 - ▶ Minimum nežádoucích cross-relaxačních procesů
- ▶ Malý kvantový defekt (poměr λ_L/λ_P) \Rightarrow vysoká laserová účinnost, výrazné snížení tepelných efektů
- ▶ Dostatečně široké spektrum zisku \Rightarrow přeladitelnost + generace ultrakrátkých pulzů
- ▶ Poměrně dlouhá doba života el. na horní laserové hladině (1-2 ms) \Rightarrow Q-spínání
- ▶ Absorpční pásy 940 nm, 969 nm – čerpání komerčně dostupnými las. diodami \Rightarrow účinnost

Technologie tenkých disků

Aktivní prostředí Yb:YAG

Základní pojmy

Elektromagnetické spektrum

Princip fungování laserů

Ultrakrátké pulzy

ELI beamlines

Struktura budovy

Blokové schéma laseru

Základní technologie

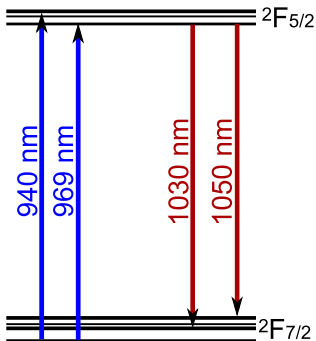
Výzkumné programy

Experimentální místnosti

Cílové aplikace

Výkonné laserové systémy ve světě

Zjednodušené schéma energetických hladin Yb:YAG



Proč ionty Yb?

- ▶ Velice jednoduchá struktura elektronických hladin – pouze 2 pásy \Rightarrow
 - ▶ Žádná absorpce z excitovaného stavu "Excited-state absorption"
 - ▶ Minimum nežádoucích cross-relaxačních procesů
- ▶ Malý kvantový defekt (poměr λ_L/λ_P) \Rightarrow vysoká laserová účinnost, výrazné snížení tepelných efektů
- ▶ Dostatečně široké spektrum zisku \Rightarrow přeladitelnost + generace ultrakrátkých pulzů
- ▶ Poměrně dlouhá doba života el. na horní laserové hladině (1-2 ms) \Rightarrow Q-spínání
- ▶ Absorpční pásy 940 nm, 969 nm – čerpání komerčně dostupnými las. diodami \Rightarrow účinnost

Čerpací systémy OPCPA

Tenkodiskové zesilovače (L1: 10 Tw, 1 kHz)

Základní pojmy

Elektromagnetické spektrum

Princip fungování laserů

Ultrakrátké pulzy

ELI beamlines

Struktura budovy

Blokové schéma laseru

Základní technologie

Výzkumné programy

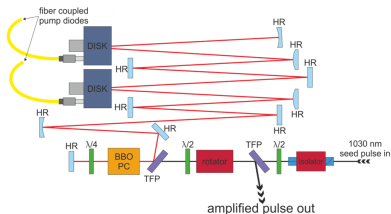
Experimentální místnosti

Cílové aplikace

Výkonné laserové systémy ve světě

Regenerační zesilovač (150 průchodů tenkým diskem)

Víceprůchodový zesilovač (20 průchodů tenkým diskem)



Metzger et al. Opt. Lett. 34, 2123 (2009)

Čerpací systémy OPCPA

Tenkodiskové zesilovače (L1: 10 Tw, 1 kHz)

Základní pojmy

Elektromagnetické spektrum

Princip fungování laserů

Ultrakrátké pulzy

ELI beamlines

Struktura budovy

Blokové schéma laseru

Základní technologie

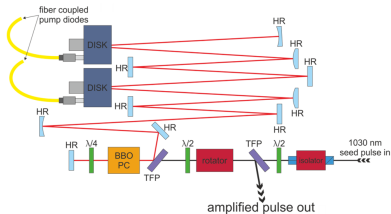
Výzkumné programy

Experimentální místnosti

Cílové aplikace

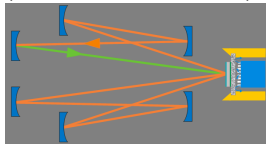
Výkonné laserové systémy ve světě

Regenerační zesilovač (150 průchodů tenkým diskem)



Metzger et al. Opt. Lett. 34, 2123 (2009)

Víceprůchodový zesilovač (20 průchodů tenkým diskem)



T. Metzger, MPQ

Základní pojmy

Elektromagnetické spektrum

Princip fungování laserů

Ultrakrátké pulzy

ELI beamlines

Struktura budovy

Blokové schéma laseru

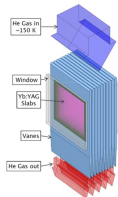
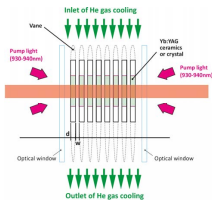
Základní technologie

Výzkumné programy

Experimentální místnosti

Cílové aplikace

Výkonné laserové systémy ve světě



- ▶ Technologie vyvíjená v Anglii RAL/STFC umožňující generaci až 100 J v pulzu při vysoké opakovací frekvenci 10Hz
- ▶ Podobná technologie demonstrována i v LLNL: 60 J/10 Hz Mercury laser
- ▶ 2 zesilovače, každý 8 disků (Yb:YAG) s rozdílnou koncentrací Yb-iontů
- ▶ Kryogenní chlazení – 160 K
- ▶ Struktura 1 desky
 - ▶ E1 – Yb:YAG oblast, část z ní čerpána
 - ▶ E2 – Cr:YAG oblast (3cm) = absorpční oblast, k potlačení ASE
 - ▶ E3 – povrchová úprava

Základní pojmy

Elektromagnetické spektrum

Princip fungování laserů

Ultrakrátké pulzy

ELI beamlines

Struktura budovy

Blokové schéma laseru

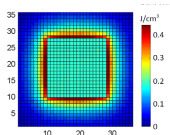
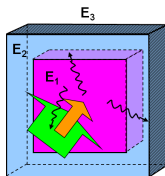
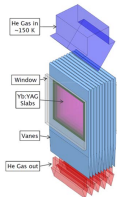
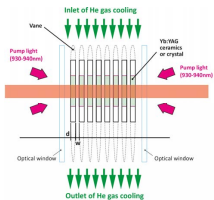
Základní technologie

Výzkumné programy

Experimentální místnosti

Cílové aplikace

Výkonné laserové systémy ve světě



- ▶ Technologie vyvíjená v Anglii RAL/STFC umožňující generaci až 100 J v pulzu při vysoké opakovací frekvenci 10Hz
- ▶ Podobná technologie demonstrována i v LLNL: 60 J/10 Hz Mercury laser
- ▶ 2 zesilovače, každý 8 disků (Yb:YAG) s rozdílnou koncentrací Yb-iontů
- ▶ Kryogenní chlazení – 160 K
- ▶ Struktura 1 desky
 - ▶ E1 – Yb:YAG oblast, část z ní čerpána
 - ▶ E2 – Cr:YAG oblast (3cm) = absorpční oblast, k potlačení ASE
 - ▶ E3 – povrchová úprava

Čerpací systémy OPCPA

Technologie multideskových kryogenně chlazených zesilovačů

Základní pojmy

Elektromagnetické spektrum

Princip fungování laserů

Ultrakrátké pulzy

ELI beamlines

Struktura budovy

Blokové schéma laseru

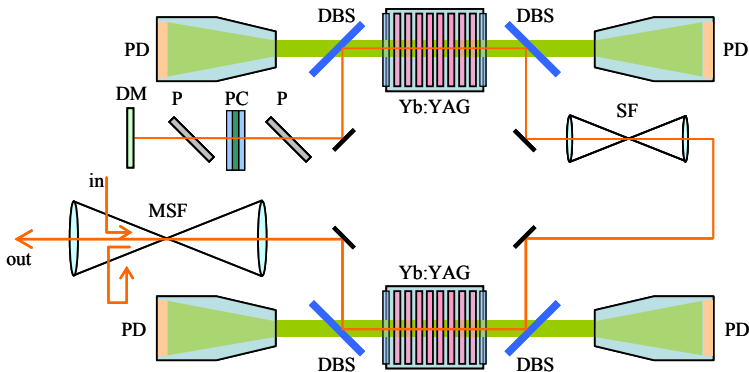
Základní technologie

Výzkumné programy

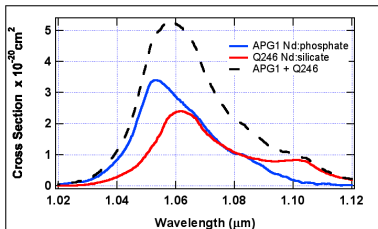
Experimentální místnosti

Cílové aplikace

Výkonné laserové systémy ve světě

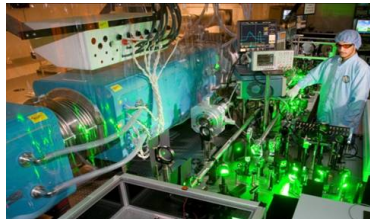


Emisní spektra Nd:skel



Texas Petawatt laser:

185 J / 130 fs – scalability 1900 J / 130 fs



- ▶ Aktivní medium – kombinace Nd:skel : vysoká energie a širka pásma odpovídající <130 fs
- ▶ Ideální délka pulzu a energie na urychlování elektronů
- ▶ Laser lze později použít jako čerpací pro OPCPA širokopásmového zesilovače

Základní pojmy

Elektromagnetické spektrum

Princip fungování laserů

Ultrakrátké pulzy

ELI beamlines

Struktura budovy

Blokové schéma laseru

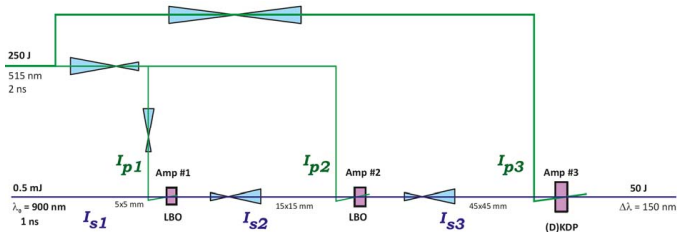
Základní technologie

Výzkumné programy

Experimentální místnosti

Cílové aplikace

Výkonné laserové systémy ve světě



Základní pojmy

Elektromagnetické spektrum

Princip fungování laserů

Ultrakrátké pulzy

ELI beamlines

Struktura budovy

Blokové schéma laseru

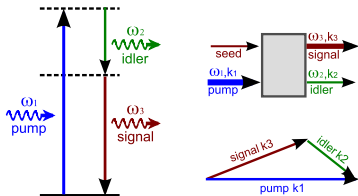
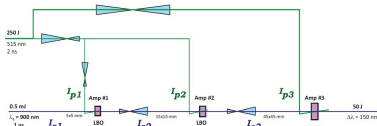
Základní technologie

Výzkumné programy

Experimentální místnosti

Cílové aplikace

Výkonné laserové systémy ve světě



Výhody OPCPA oproti CPA s laserovým prostředím

- ▶ Velký zisk na jeden průchod \Rightarrow není potřeba mnohaprůchodová geometrie \Rightarrow kompaktnost
- ▶ Široké frekvenční pásmo zesílení \Rightarrow generace velmi krátkých pulzů (jednotky fs)
- ▶ Generace tepla jen díky slabé parazitní absorpci \Rightarrow slabé tepelné efekty
- ▶ Vysoká kvantová účinnost \Rightarrow jednoduchá škálovatelnost k vysokým energiím a špičkovým výkonům
- ▶ Vysoká kvalita svazku zesílených pulzů
- ▶ Parametrický zisk jen po dobu trvání čerpacího pulzu \Rightarrow minimalizace problémů se ztrátou energie díky ASE \Rightarrow vysoký kontrast signál–šum

Základní pojmy

Elektromagnetické spektrum

Princip fungování laserů

Ultrakrátké pulzy

ELI beamlines

Struktura budovy

Blokové schéma laseru

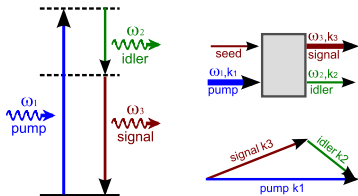
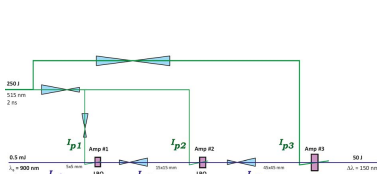
Základní technologie

Výzkumné programy

Experimentální místnosti

Cílové aplikace

Výkonné laserové systémy ve světě



Výhody OPCPA oproti CPA s laserovým prostředím

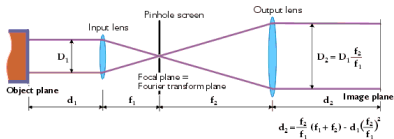
- ▶ Velký zisk na jeden průchod \Rightarrow není potřeba mnohaprůchodová geometrie \Rightarrow kompaktnost
- ▶ Široké frekvenční pásmo zesílení \Rightarrow generace velmi krátkých pulzů (jednotky fs)
- ▶ Generace tepla jen díky slabé parazitní absorpci \Rightarrow slabé tepelné efekty
- ▶ Vysoká kvantová účinnost \Rightarrow jednoduchá škálovatelnost k vysokým energiím a špičkovým výkonům
- ▶ Vysoká kvalita svazku zesílených pulzů
- ▶ Parametrický zisk jen po dobu trvání čerpacího pulzu \Rightarrow minimalizace problémů se ztrátou energie díky ASE \Rightarrow vysoký kontrast signál–šum

Nevýhody

- ▶ Parametrický zisk jen po dobu trvání čerpacího pulzu \Rightarrow přesná synchronizace čerpacího a "seed" pulzu
- ▶ Potřeba sladit trvání čerpacího a "seed" pulzu pro dosažení max. účinnosti
- ▶ Potřeba splnění fázového synchronizmu \Rightarrow komplikovanější nastavování
- ▶ Potřeba vysoké kvality čerpacího svazku

Distribuce laserových svazků

Prostorové filtry



1. Zajišťují transport svazků mezi jednotlivými zesilovači a optickými prvky laserového řetězce → zobrazují obrazu výstupní apertury předcházejícího zesilovače na vstupní aperturu zesilovače následujícího ⇒ geometricky přenášejí prostorové rozložení intenzity svazku do vhodné roviny následujícího prvku ⇒ téměř optimální vazba energie od jednoho zesilovače k druhému
2. Zvětšují průměr laserového svazku tak, aby odpovídal průměru vstupní apertury následujícího zesilovače
3. Odstraňují lokální modulace intenzity ⇒ zhlazují profil svazku (zdroj modulací – malé místní nehomogenity laserového média nebo submilimetrová rozptylová centra na povrchu optických prvků). Pokud nejsou modulace průběžně odstraňovány mohou narůst do velkých hodnot a vážně poškodit optické prvky laseru.

Základní pojmy

Elektromagnetické spektrum

Princip fungování laserů

Ultrakrátké pulzy

ELI beamlines

Struktura budovy

Blokové schéma laseru

Základní technologie

Výzkumné programy

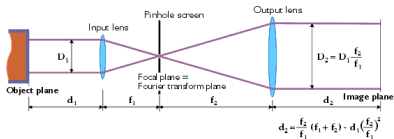
Experimentální místnosti

Cílové aplikace

Výkonné laserové systémy ve světě

Distribuce laserových svazků

Prostorové filtry



1. Zajišťují transport svazků mezi jednotlivými zesilovači a optickými prvky laserového řetězce → zobrazují obrazu výstupní apertury předcházejícího zesilovače na vstupní aperturu zesilovače následujícího ⇒ geometricky přenášejí prostorové rozložení intenzity svazku do vhodné roviny následujícího prvku ⇒ téměř optimální vazba energie od jednoho zesilovače k druhému
2. Zvětšují průměr laserového svazku tak, aby odpovídal průměru vstupní apertury následujícího zesilovače
3. Odstraňují lokální modulace intenzity ⇒ zhlazují profil svazku (zdroj modulací – malé místní nehomogenity laserového média nebo submilimetrová rozptylová centra na povrchu optických prvků). Pokud nejsou modulace průběžně odstraňovány mohou narůst do velkých hodnot a vážně poškodit optické prvky laseru.

Základní pojmy

Elektromagnetické spektrum

Princip fungování laserů

Ultrakrátké pulzy

ELI beamlines

Struktura budovy

Blokové schéma laseru

Základní technologie

Výzkumné programy

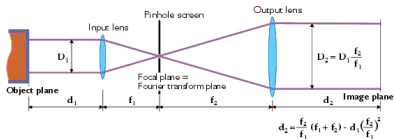
Experimentální místnosti

Cílové aplikace

Výkonné laserové systémy ve světě

Distribuce laserových svazků

Prostorové filtry



1. Zajišťují transport svazků mezi jednotlivými zesilovači a optickými prvky laserového řetězce → zobrazují obrazu výstupní apertury předcházejícího zesilovače na vstupní aperturu zesilovače následujícího ⇒ geometricky přenášejí prostorové rozložení intenzity svazku do vhodné roviny následujícího prvku ⇒ téměř optimální vazba energie od jednoho zesilovače k druhému
2. Zvětšují průměr laserového svazku tak, aby odpovídal průměru vstupní apertury následujícího zesilovače
3. Odstraňují lokální modulace intenzity ⇒ zhlazují profil svazku (zdroj modulací – malé místní nehomogenity laserového média nebo submilimetrová rozptylová centra na povrchu optických prvků). Pokud nejsou modulace průběžně odstraňovány mohou narůst do velkých hodnot a vážně poškodit optické prvky laseru.

Základní pojmy

Elektromagnetické spektrum

Princip fungování laserů

Ultrakrátké pulzy

ELI beamlines

Struktura budovy

Blokové schéma laseru

Základní technologie

Výzkumné programy

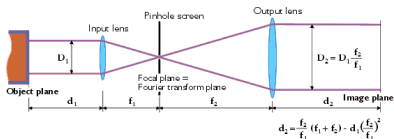
Experimentální místnosti

Cílové aplikace

Výkonné laserové systémy ve světě

Distribuce laserových svazků

Prostorové filtry



1. Zajišťují transport svazků mezi jednotlivými zesilovači a optickými prvky laserového řetězce → zobrazují obrazu výstupní apertury předcházejícího zesilovače na vstupní aperturu zesilovače následujícího ⇒ geometricky přenášejí prostorové rozložení intenzity svazku do vhodné roviny následujícího prvku ⇒ téměř optimální vazba energie od jednoho zesilovače k druhému
2. Zvětšují průměr laserového svazku tak, aby odpovídal průměru vstupní apertury následujícího zesilovače
3. Odstraňují lokální modulace intenzity ⇒ zhlazují profil svazku (zdroj modulací – malé místní nehomogenity laserového média nebo submilimetrová rozptylová centra na povrchu optických prvků). Pokud nejsou modulace průběžně odstraňovány mohou narůst do velkých hodnot a vážně poškodit optické prvky laseru.

Princip prostorové filtrace

Vstupní čočka filtru vytváří ve své ohniskové rovině difrakční obrazec = Fourierova transformace rozdělení intenzity světla v předmětové rovině (prostorové frekvenční spektrum)

Vyšší prostorové frekvence → odpovídají modulacím intenzity malých rozměrů → ve větších vzdálenostech od osy

Nízkofrekvenční složky prostorového spektra → odpovídají hladkému profilu svazku → blízko osy

Vložení clonky s malým otvorem do ohniskové roviny ⇒ filtrace vyšších prostorových frekvencí

Výstupní čočka prostorového filtru → inverzní Fourierova transformace vyfiltrovaného prostorového spektra

Distribuce laserových svazků

Cassegrain systém pro přenos femtosekundových pulzů

Základní pojmy

Elektromagnetické spektrum

Princip fungování laserů

Ultračtrátké pulzy

ELI beamlines

Struktura budovy

Blokové schéma laseru

Základní technologie

Výzkumné programy

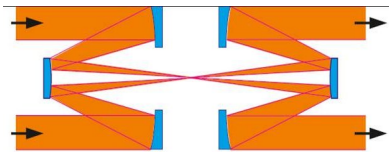
Experimentální místnosti

Cílové aplikace

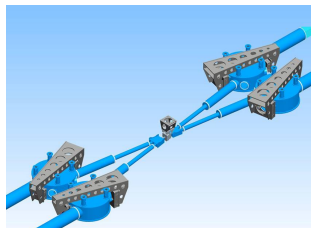
Výkonné laserové systémy ve světě

- ▶ Pro přenos fs-pulzů \Rightarrow reflexní teleskopy \rightarrow Cassegrain teleskop
- ▶ 2 svazky přenášeny jedním systémem
- ▶ Optika vibračně oddělena od vakuových komor

Schéma teleskopu



Úvodní inženýrský návrh



Základní pojmy

Elektromagnetické spektrum

Princip fungování laserů

Ultrakrátké pulzy

ELI beamlines

Struktura budovy

Blokové schéma laseru

Základní technologie

Výzkumné programy

Experimentální místnosti

Cílové aplikace

Výkonné laserové systémy ve světě

Experimentální místnost E1

Aplikace v materiálovém, biomed. a molekulárním výzkumu

Experimentální místnost E2

Ultrakrátké repetiční XUV a rentgenové zdroje záření

Experimentální místnost E3

Plasmová fyzika a fyzika vysokých hustot energie

Experimentální místnost E4

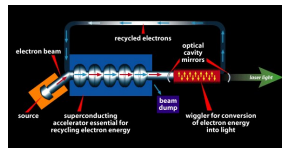
Fyzika a teorie intenzivních polí

Experimentální místnost E5

Urychlování elektronů

Experimentální místnost E6

Urychlování protonů



Základní pojmy

Elektromagnetické spektrum

Princip fungování laserů

Ultrakrátké pulzy

ELI beamlines

Struktura budovy

Blokové schéma laseru

Základní technologie

Výzkumné programy

Experimentální místnosti

Cílové aplikace

Výkonné laserové systémy ve světě

Unikátní vlastnosti centra

- ▶ Unikátní rozsah energií
- ▶ Vysoké opakovací frekvence
- ▶ Výborná stabilita mezi pulzy (diodové čerpání a tenké disky)
- ▶ Synchronizace všech systémů až na úrovni fs
- ▶ Ultrakrátké a synchronizované svazky částic, laserů a rentgenových fotonů o vysokých intenzitách
- ▶ Distribuční systém

Základní pojmy

Elektromagnetické spektrum

Princip fungování laserů

Ultrakrátké pulzy

ELI beamlines

Struktura budovy

Blokové schéma laseru

Základní technologie

Výzkumné programy

Experimentální místnosti

Cílové aplikace

Výkonné laserové systémy ve světě

Unikátní vlastnosti centra

- ▶ Unikátní rozsah energií
- ▶ Vysoké opakovací frekvence
- ▶ Výborná stabilita mezi pulzy (diodové čerpání a tenké disky)
- ▶ Synchronizace všech systémů až na úrovni fs
- ▶ Ultrakrátké a synchronizované svazky částic, laserů a rentgenových fotonů o vysokých intenzitách
- ▶ Distribuční systém

Potenciální aplikace, transfer technologií

- ▶ Urychlovače (nové a kompaktní přístupy, e.g. kompaktní FEL)
- ▶ Časově rozlišené pump-probe experimenty (fúzní plazma, laboratorní astrofyzika, apod.)
- ▶ Medicína (hadronová terapie a tomografie nádorů)
- ▶ Bio-chemie (dynamika rychlých přechodových jevů)
- ▶ Bezpečnost (nedestruktivní inspekce materiálů)

Základní pojmy

Elektromagnetické spektrum

Princip fungování laserů

Ultrakrátké pulzy

ELI beamlines

Struktura budovy

Blokové schéma laseru

Základní technologie

Výzkumné programy

Experimentální místnosti

Cílové aplikace

Výkonné laserové systémy ve světě

VULCAN Laser

RAL STFC, UK

(1 PW, 500 J/500 fs, 1054 nm)



Texas Petawatt

Uni. of Texas, USA

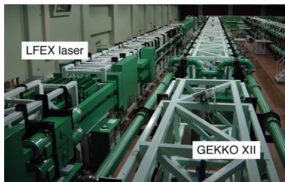
(1 PW, 185 J/130 fs, 1054 nm)



Osaka PW module

Uni. of Osaka, Japan

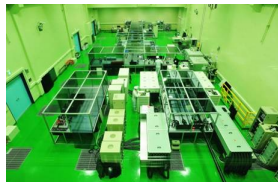
(1 PW, 500 J/500 fs, 1053 nm)



GIST-APRI Petawatt

Apri, South Korea

(1 PW, 32 J/30 fs, 800 nm)



Základní pojmy

Elektromagnetické spektrum

Princip fungování laserů

Ultrakrátké pulzy

ELI beamlines

Struktura budovy

Blokové schéma laseru

Základní technologie

Výzkumné programy

Experimentální místnosti

Cílové aplikace

Výkonné laserové systémy ve světě

Děkuji za pozornost

