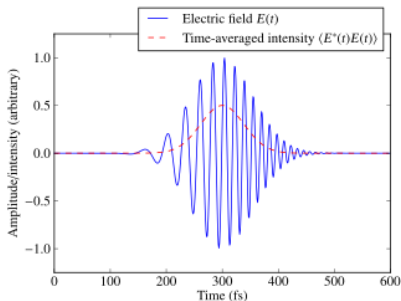


TRANSFORMACE A MĚŘENÍ ULTRAKRÁTKÝCH PULZŮ

Antonín Černoch

Společná laboratoř optiky



Obsah

1 Matematický popis

2 Transformace ultrakrátkých pulzů

- Pasivní transformace
- Aktivní transformace

3 Měření ultrakrátkých pulzů

- Autokorelace a křížová korelace
- Spektrální interferometrie s referenčním pulzem
- FROG
- SPIDER

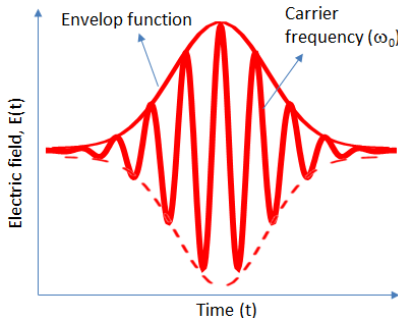
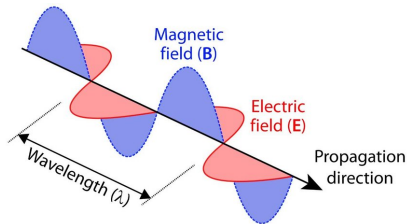
Elektromagnetický pulz

Elmag pulz lze popsat pouze přes elektrické pole až do té doby, kdy je pulz natolik silný, že by mohl urychlit elektrony na relativistické energie.

$$\mathcal{E}(t) = E(t) + E^*(t)$$

Detektory zaznamenají pouze intenzitu – obálku $I(t) = |E(t)|^2$.

frekvence $\sim 10^{14} - 10^{15}$ Hz
délky pulzů ps – fs



Elektrické pole

Časový popis

$$E(t) = A(t)e^{i\vartheta(t)}e^{i\vartheta_0}e^{-i\omega_0 t}$$

Spektrální popis

$$\tilde{E}(\omega) = \tilde{A}(\omega)e^{i\varphi(\omega)}$$

Fourierova transformace

$$E(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{E}(\omega)e^{-i\omega t} d\omega$$

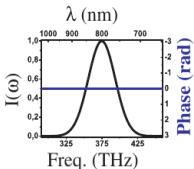
- pro určitou $\tilde{A}(\omega)$ určuje spektrální fáze délku a tvar pulzu
- $\varphi(\omega) \sim \textit{konst.} \rightarrow$ Fourier (transform) limited pulz, nejkratší pulz pro danou $\tilde{A}(\omega)$
- transform limited $\rightarrow$ délka pulzu nepřímo úměrná šířce spektra
- ostatní mohou být pouze širší

Rozvoj fáze do Taylorovy řady

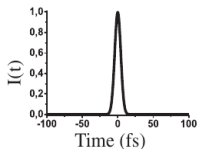
$$\varphi(\omega) = \varphi_0^{(0)} + \varphi_0^{(1)}(\omega - \omega_0) + \frac{1}{2}\varphi_0^{(2)}(\omega - \omega_0)^2 + \frac{1}{6}\varphi_0^{(3)}(\omega - \omega_0)^3 + \dots$$

$$\varphi_0^{(n)} = \left(\frac{d^n \varphi(\omega)}{d\omega^n} \right)_{\omega_0}$$

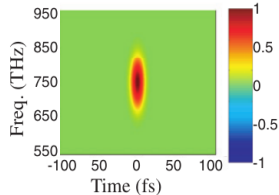
- φ_0 absolutní fáze (CEP), hraje významnou roli při nelineární interakci
- $\varphi_0^{(1)}$ zpoždění pulzu vůči počátku ($t = 0$), konstantní grupové zpoždění
- $\varphi_0^{(2)}$ chirp, způsobuje prodloužení pulzu, různé frekvence jsou různě zpožděné
- $\varphi_0^{(3)}$ kubický člen, způsobuje pre- a post-pulzy

transform
limitedSpectral intensity
and phase

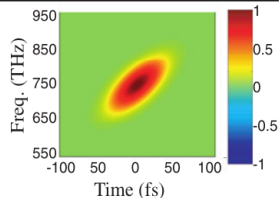
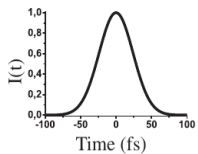
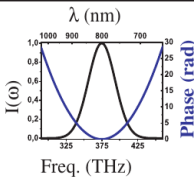
Temporal intensity



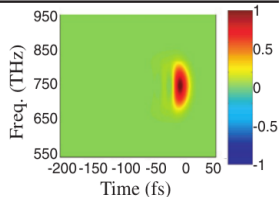
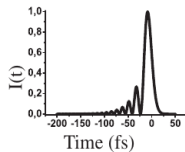
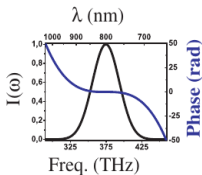
Spectrogram



chirp

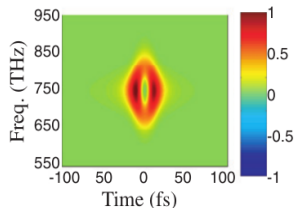
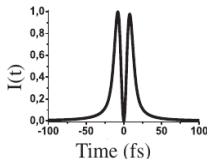
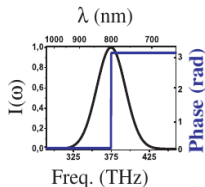


cubic

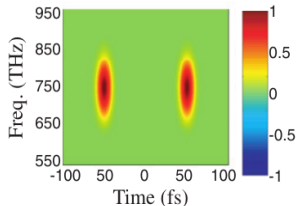
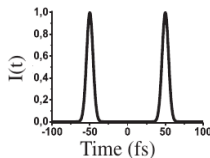
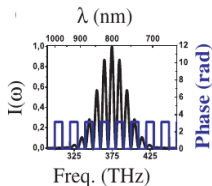


Složitější průběhy spektrální fáze

spektrální
 π -skok



sekvence
dvou pulzů



Obsah

1 Matematický popis

2 Transformace ultrakrátkých pulzů

- Pasivní transformace
- Aktivní transformace

3 Měření ultrakrátkých pulzů

- Autokorelace a křížová korelace
- Spektrální interferometrie s referenčním pulzem
- FROG
- SPIDER

Transformace ultrakrátkých pulzů

V časové doméně

$$E_{out}(t) = R(t) \otimes E_{in}(t)$$

- ve fs oblasti dnes téměř nemožné

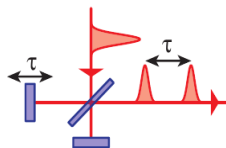
Ve spektru

$$\tilde{E}_{out}(\omega) = H(\omega) \otimes \tilde{E}_{in}(\omega)$$

- filtrace ve Fourierovské rovině
- pasivní – upravuje všechny pulzy stejně
- aktivní – lze měnit jednotlivé pulzy v sekvenci

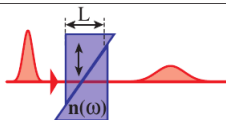
Pasivní transformace

Michelsonův
interferometr



$$H(\omega) = \frac{1}{2} (1 + e^{i\omega\tau})$$

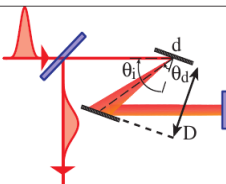
Disperzní linka



$$H(\omega) = e^{i\phi(\omega)}$$

$$\phi(\omega) = n(\omega) L \omega / c$$

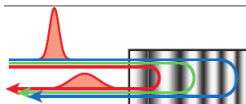
mřížkový
kompresor



$$H(\omega) = e^{i\phi(\omega)}$$

$$\phi(\omega) = 2 \frac{\omega}{c} D \frac{\cos(\theta_i + \theta_d)}{\cos \theta_i}$$

chirp mirror

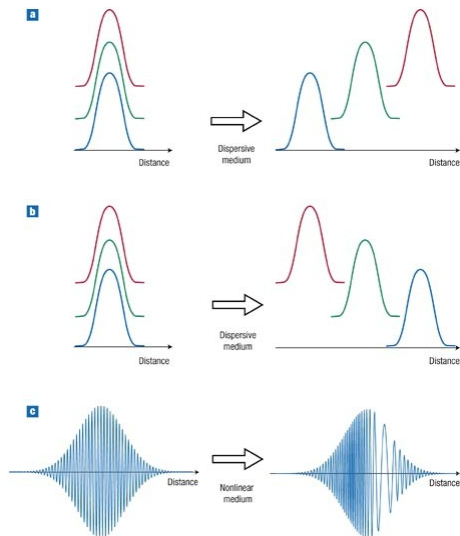
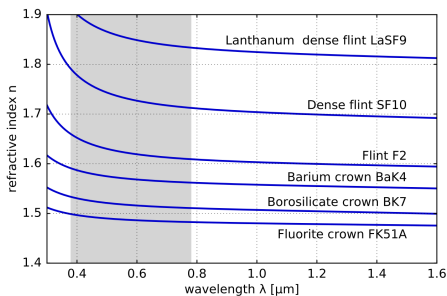


$$H(\omega) = |H(\omega)| e^{i\phi(\omega)}$$

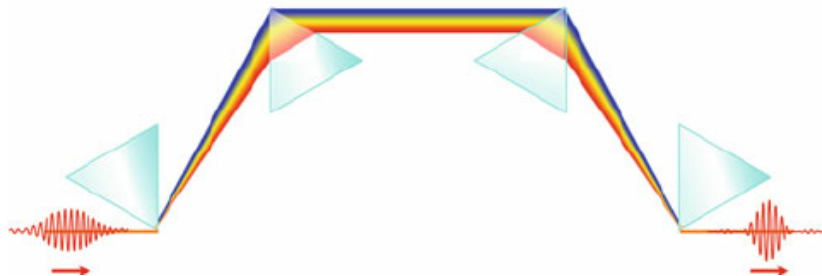
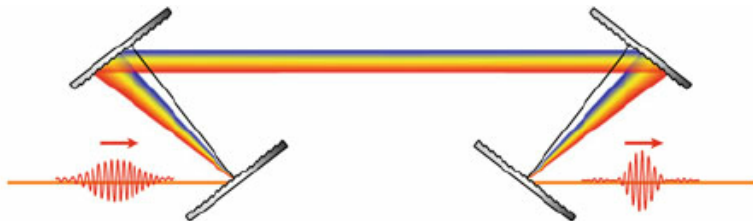
$|H(\omega)|$ is the reflectivity

$\phi(\omega)$ designed until the fourth order

Normální a anomální disperze

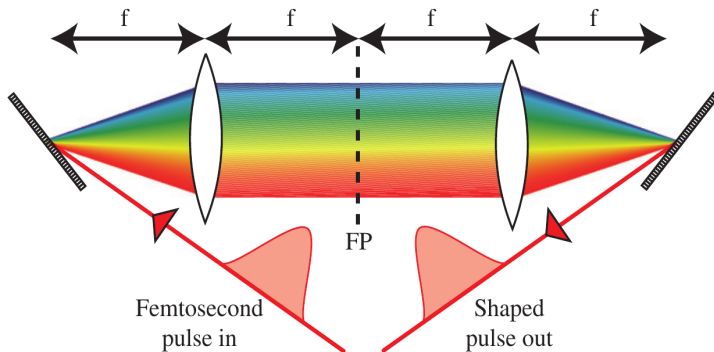


Kompresní (dekompresní) linky



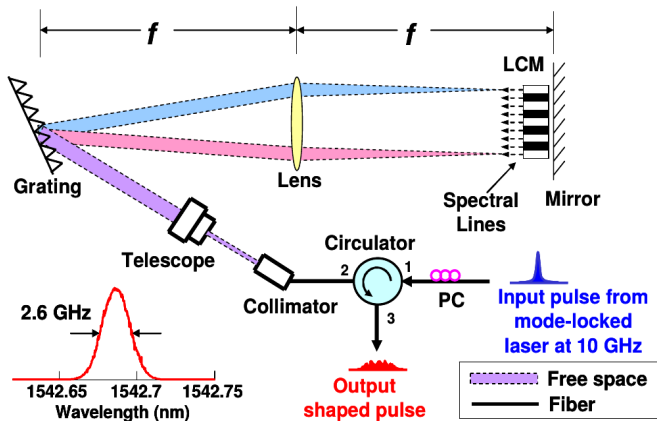
Aktivní transformace

- filtrace ve Fourierovské rovině (LC nebo AOM)
- posun fáze spektrálních komponent
- nelineární efekty



LCM ve Fourierovské rovině

- LCM – Liquid Crystal Mirror
- SLM – Spatial Light Modulator
- může transformovat amplitudu, fázi, polarizaci

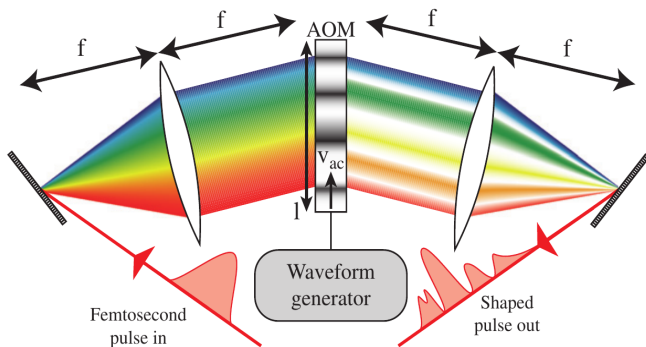


nevýhody

chluchá místa mezi pixely, diskrétní pixelizace (omezené rozlišení),
pomalá změna ($1 \mu\text{s}$) $\rightarrow$ opakovačka 1 kHz

AOM ve Fourierovské rovině

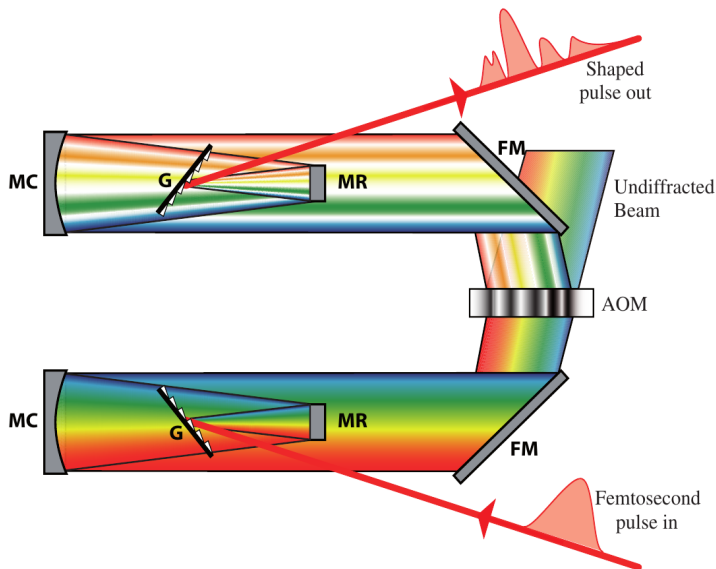
- AOM – Acusto-Optic Modulator
- může transformovat amplitudu a fázi



nevýhody

opakovačka < 100 kHz, disperze v krystalu,
absorpce akustické vlny $\rightarrow$ omezená délka krystalu

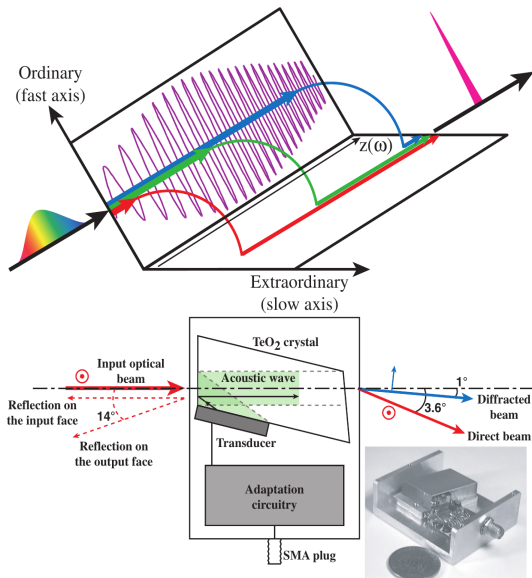
AOM ve Fourierovské rovině s kompenzací disperze



FM – folded
mirror

Tvarování posunem fáze

- AOPDF – Acusto-Optic Programmable Dispersive Filter
- frekvenční míchání vstupního a kontrolního pole
- různé spektrální složky jsou difrakcí přesunuty do extraordinární osy v různých hloubkách v závislosti na podmínce fázového sladění a z.z.e.
- opakovačka 100 kHz



Obsah

- 1 Matematický popis
- 2 Transformace ultrakrátkých pulzů
 - Pasivní transformace
 - Aktivní transformace
- 3 Měření ultrakrátkých pulzů
 - Autokorelace a křížová korelace
 - Spektrální interferometrie s referenčním pulzem
 - FROG
 - SPIDER

Měření ultrakrátkých pulzů

Dnešní detektory nemají dostatečně rychlou odezvu, zaznamenají pouze energii, tvar pulzu detektoru je dán *přístrojovou funkcí* detektoru.

- neúplné metody – určí se pouze délka pulzu, buď bez nebo s NLC, kolineární a nekolineární geometrie
 - autokorelace – pomocí Michelsonova interferometru
 - křížová korelace – s referenčním pulzem
- spektrální interferometrie
 - s referenčním pulzem
 - Frequency Resolved Optical Gating
 - Spectral Phase Interferometry for Direct Electric-field Reconstruction

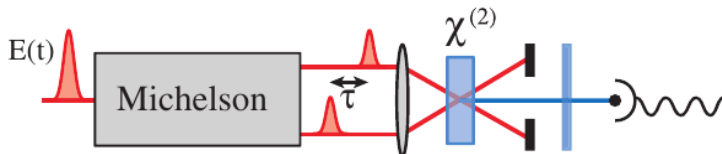
Autokorelace

bez NLC

měří se intenzita interferogramu

s NLC

měří se intenzita druhé harmonické kolineární nebo nekolineární konfigurace



nevýhody

- určí se pouze délka pulzu
- musíme znát přibližný tvar pulzu
- výsledek časově symetrický

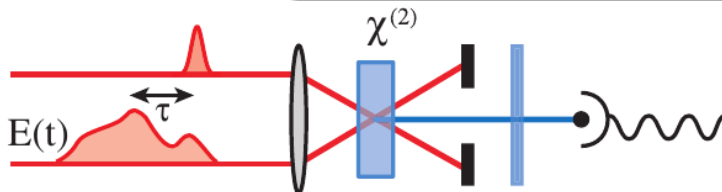
Křížová (cross) korelace

bez NLC

měří se intenzita
interferogramu

s NLC

měří se intenzita druhé harmonické
kolineární nebo nekolineární konfigurace
není potřeba interferometrická stabilita



nevýhody

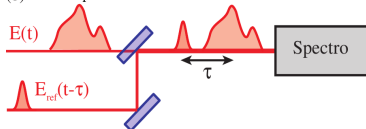
- určí se pouze délka pulzu
- musíme mít krátký známý pulz, který je koherentní

Spektrální interferometrie s referenčním pulzem

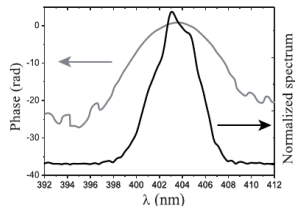
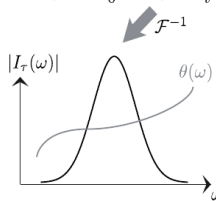
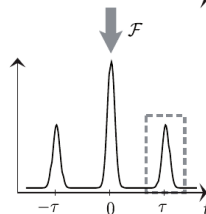
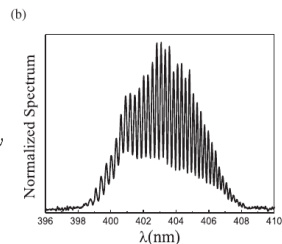
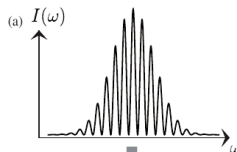
(a) měření spektrální amplitudy



(b) měření spektrální fáze

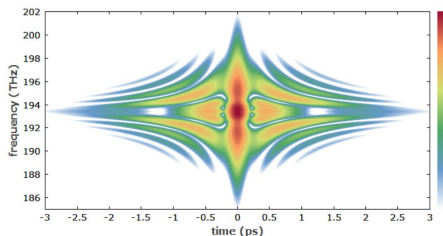
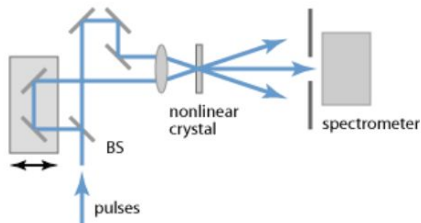
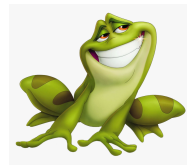


- časové zpoždění τ fixní
- referenční pulz musí být koherentní



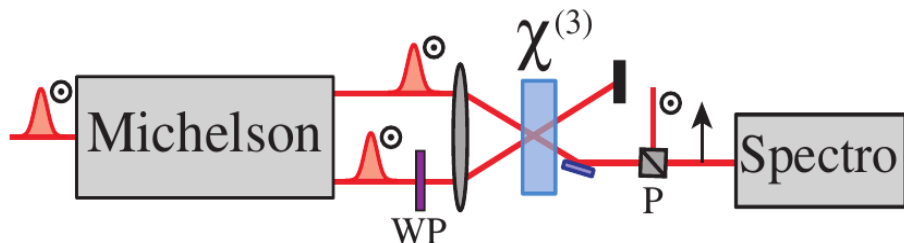
FROG – Frequency Resolved Optical Gating

- autokorelace + NLC + spektroskopie
- záznam desítek až stovek spekter v závislosti na τ
- iterativní algoritmus pro určení spektrální fáze (dlouhý výpočetní čas)
- data jsou redundantní, ale umožňují kontrolu konzistence



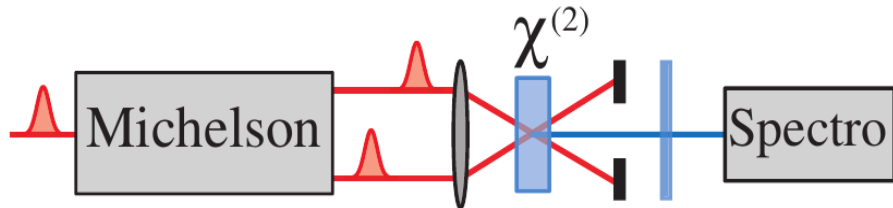
PG (Polarization Gated) FROG

- gate a probe pulz mají vůči sobě pootočené polarizace o 45° , interakcí gate a probe pulzů v NLC 3. řádu (Kerrův jev v křemenném skle) se otáčí polarizace probe, který potom projde polarizátorem P
- výsledný signál není nutné náročně zpracovávat
- potřeba polarizátoru s velkým extinkčním poměrem (nepropustný v UV)



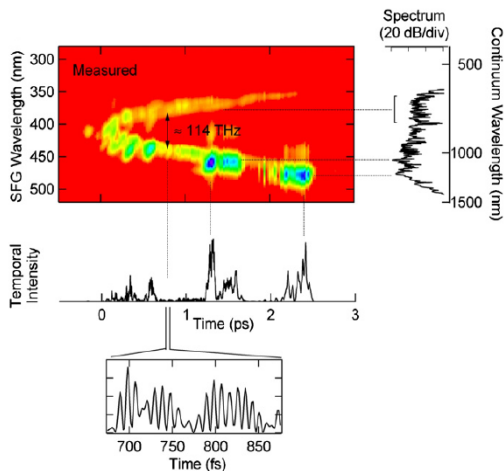
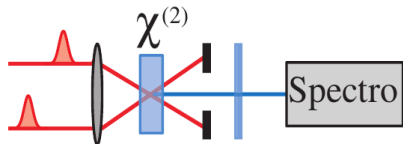
SHG (Second Harmonic Generation) FROG

- oproti PG jednodušší a účinnější, použitelný i v FUV
- výsledek je středově symetrický, lze odstranit dalším měřením (jeden půl skrz skleněnou destičku)
- pro velmi krátké pulzy je metoda citlivá na fázové sladění v NLC



XFROG

- NLC buď se součtovou nebo rozdílovou frekvencí
- dva nezávislé pulzy, lze určit spektrální fázi obou
- není nutná interferometrická stabilita (pulse-to-pulse)
- nezměří relativní fázi nepřekrývajících se pulzů v sekvenci



Další žaby

SD (Self-diffraction) Frog

- dva překrývající se svazky vytvoří v NLC 3. řádu difrakční mřížku
- oba se odklání, jeden z nich na spektrák
- použitelné pro velké energie

TS (Transition Grating) Frog

- podobný jak SD, navíc ještě třetí pulz s proměnným zpožděním
- odklon třetího pulzu na mřížce vytvořené dvěma pulzy
- větší citlivost než SD

I (Interferometric) Frog

- kolineární šíření svazků
- využívá geometrické vlastnosti svazků (fokus)

Výrobci

- Coherent
- Newport
- Quantifi Photonics
- a kdokoliv jiný vlastníci garáž

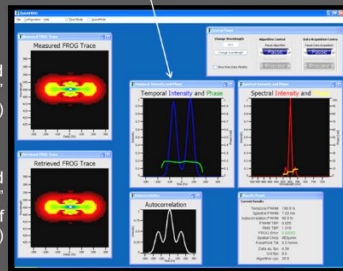


What GRENOUILLE Measures

Intensity and phase vs. time

Measured
"FROG trace"
(spectrogram)

Retrieved
"FROG trace"
(verification of
measurement)



QuickFROG
"pulse" panel

Controls

Spectrum
and
spectral
phase

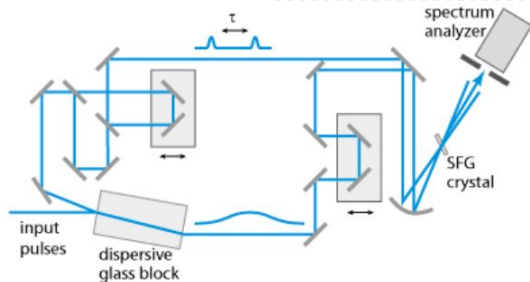
Autocorrelation

Various other parameters,
including spatial chirp and
pulse-front tilt

FROG, GRENOUILLE and QuickFROG
also measure the beam spatial profile.

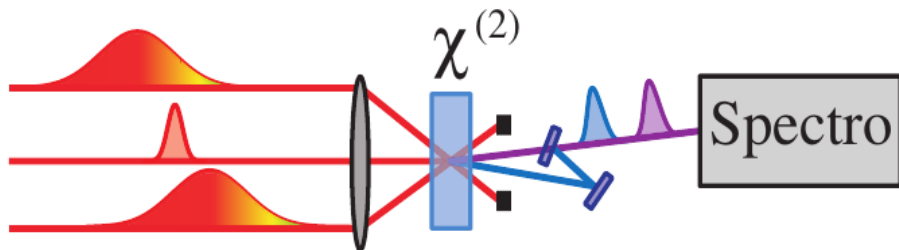
SPIDER – Spectral Phase Interferometry for Direct Electric-field Reconstruction

- tři interagující pulzy v NLC, jeden je prodloužen v disperzním prostředí (sklo nebo 2 mřížky)
- součtové frekvence s různými částmi čerpaného pulzu
- není potřeba složitého výpočtu, ale bez kontroly konzistence



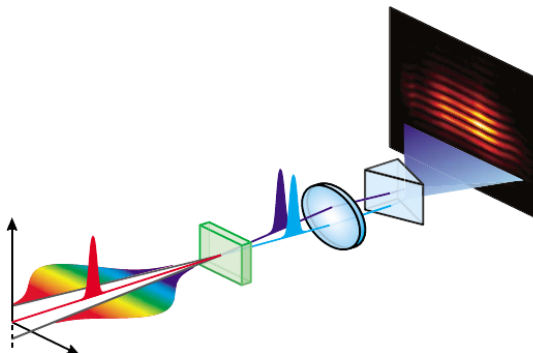
ZAP (Zero Additional Phase) SPIDER

- testovací pulz nečerpovaný
- není potřeba interferometrická stabilita



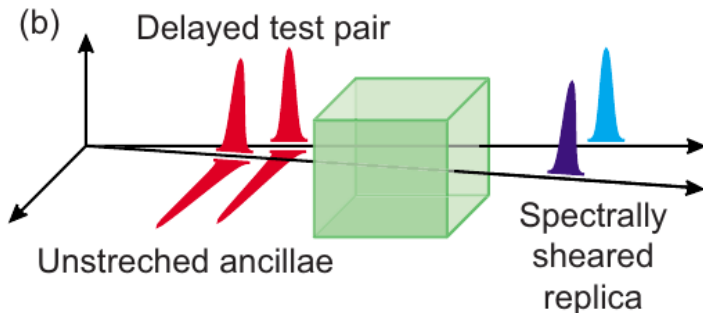
SEA (Spatial Encoded Arrangement) SPIDER

- podobný jako ZAP
- dva výstupní pulzy interferují ve zobrazovacím interferometru
- není potřeba tak vysokého rozlišení spektráku (ve spektru nejsou rychle oscilující proužky)



ARAIGNEE

- francouzská mutace
- delší krystal, netřeba prodlužovat pulzy
- pulz na HWP pod 22.5° , křemenná destička, stříh zrcátkem



FROG vs SPIDER



- pro velmi krátké pulzy musí mít FROG přesně zkalibrovaný spektrák v celém rozsahu
- pro delší pulzy musí mít SPIDER spektrák s vysokým rozlišením a optický prvek s velkou disperzí
- obě varianty mají verzi pro single-shot měření