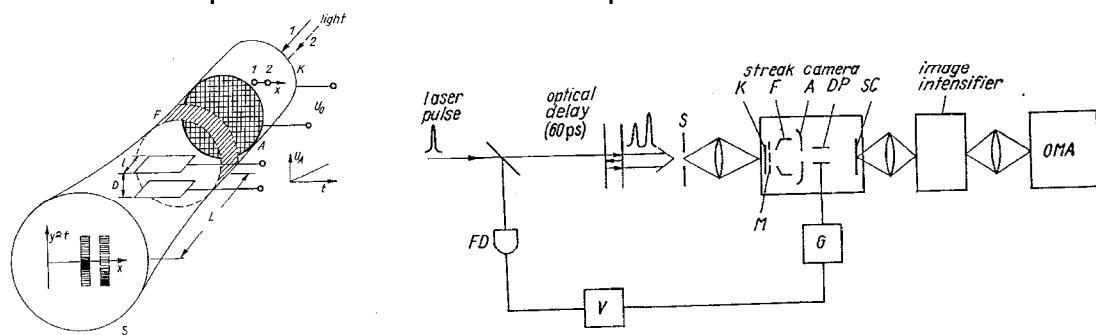


Měření optických signálů

Časové rozlišení detektorů

- Lidské oko: 150 ms [Segner, 1740]
- Mechanické závěrky (fotoaparát): <1 ms
- Mechanická streak-kamera s rotujícím zrcadlem: 1 μ s [Wheatstone, 1834], teoreticky až 1 ns
- Polovodičové PIN fotodiody (vnitřní fotoelektrický jev): několik ps, v praxi ale zpravidla 100 ps
- Detektory založené na vnějším fotoelektrickém jevu
Fotonásobiče: 50 ps
Elektrooptická streak-kamera: 1 ps



- Korelační metody založené na nelineární optice:
 - Generace druhé harmonické
 - Kerrův jev a jiné nelinearity 3. řádu
 - Dvoufotonová absorpcie

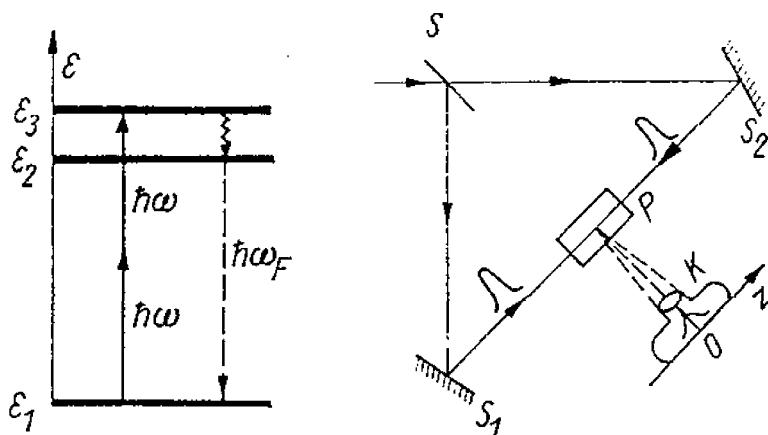
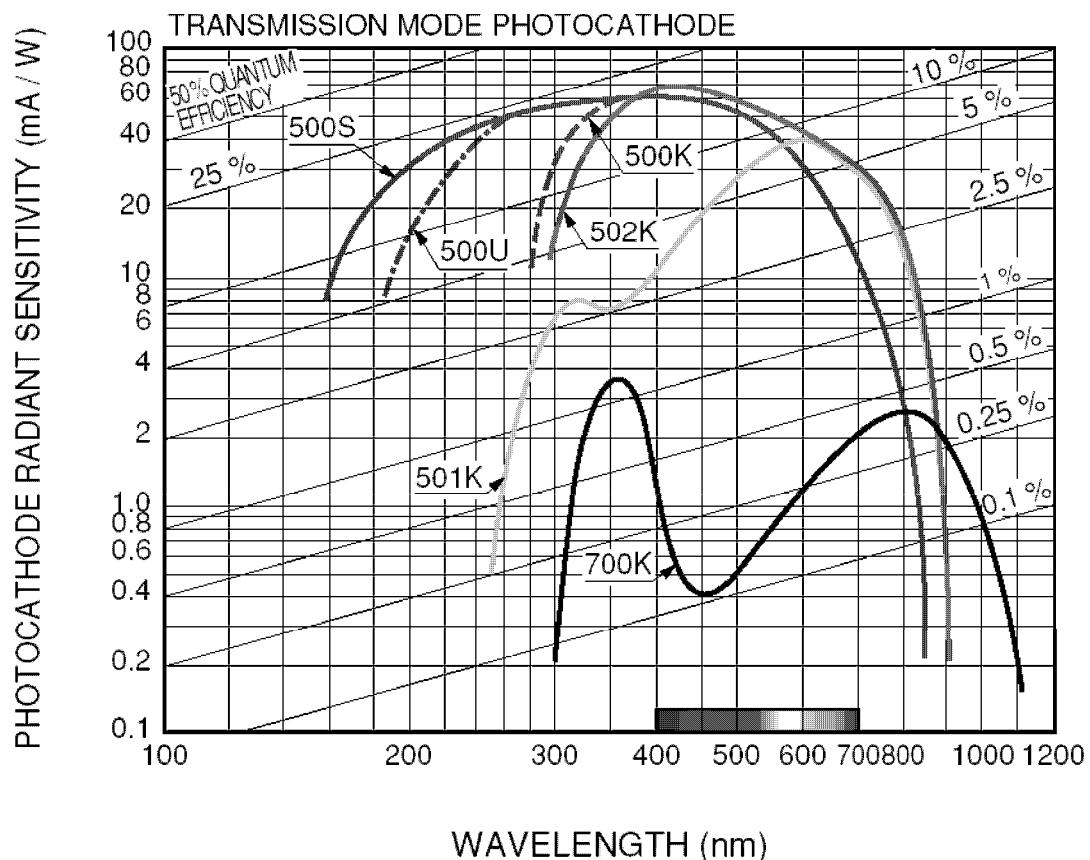
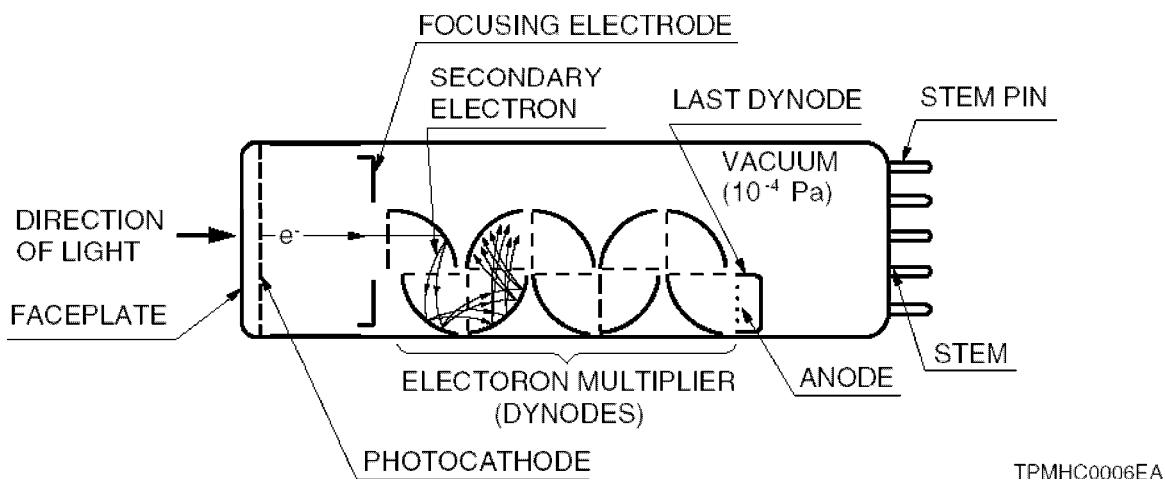


Schéma měření autokorelace založené na dvoufotonové absorpci

- detektory slabých kvantových signálů (fotonásobiče, lavinové fotodiody, iCCD)

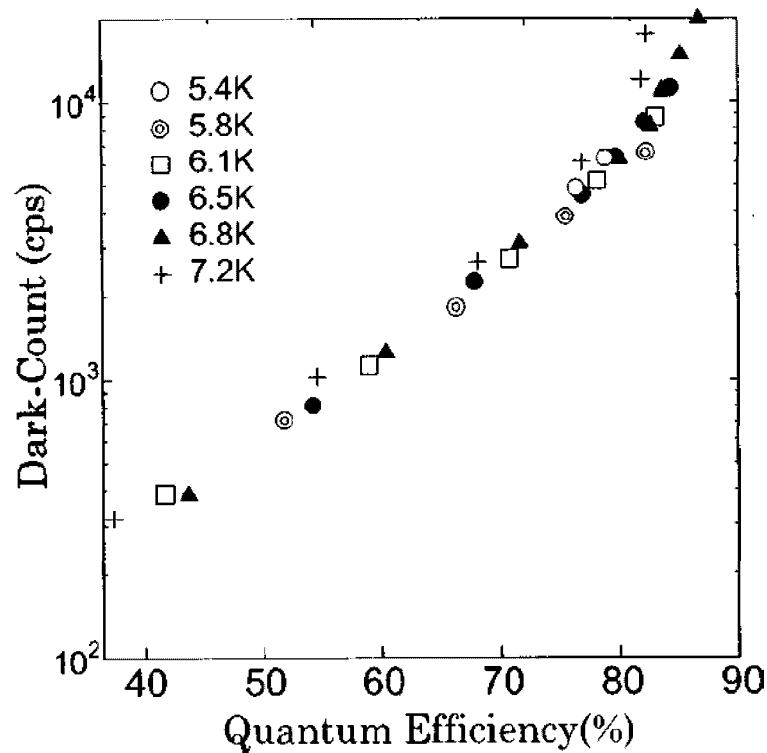
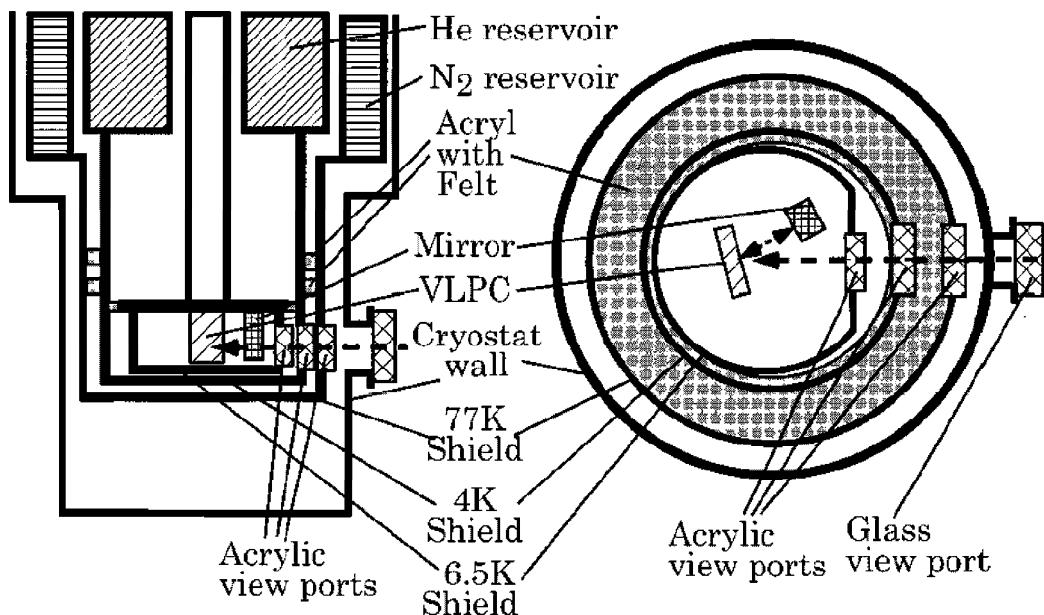
Fotonásobiče

- zpravidla citlivé jen v UV a ve spodní polovině viditelné oblasti (300-700 nm)
- kvantová účinnost max. 25%
- velmi nízký šum
- fotokatoda je zpravidla tvořena slitinami alkalických kovů



VLPC (visible light photon counter)
 [Takeuchi, Kim, Yamamoto, Hogue, 1998]

- využívá lavinový efekt v pásu nečistot v křemíku
- velký šum (10^4 pulsů/s i při chlazení na 7K)
- velká kvantová účinnost (až 88%)
- *může rozlišit počty fotonů*



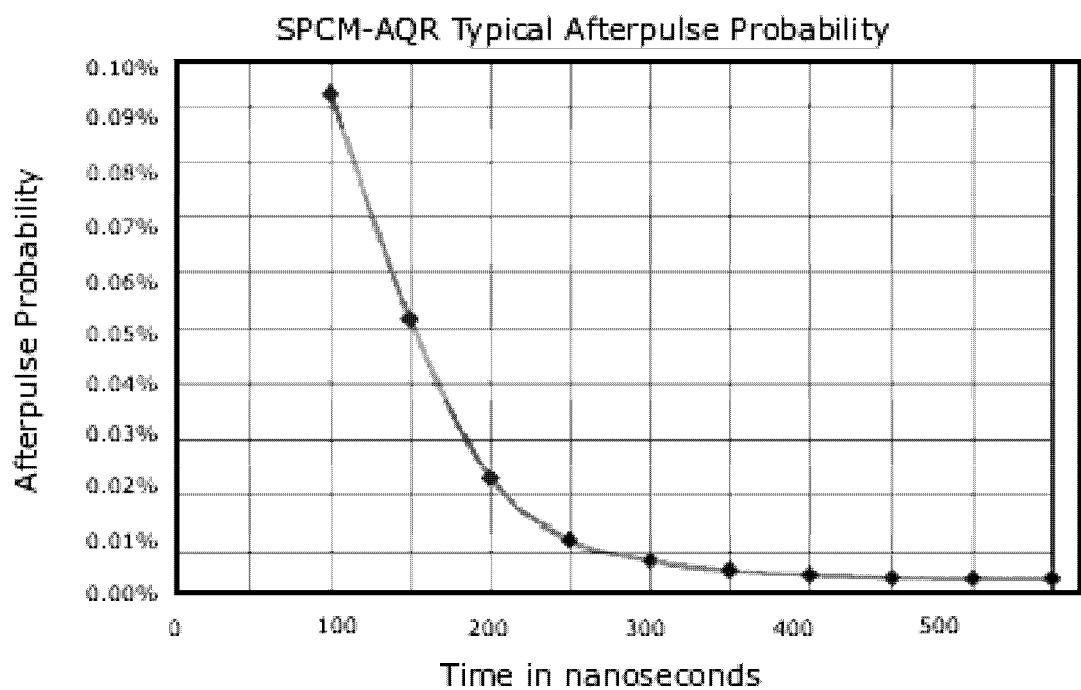
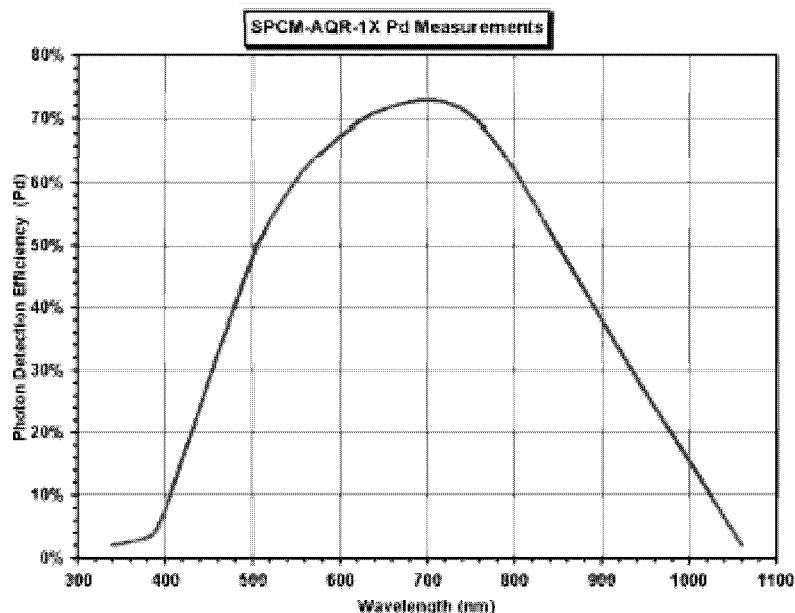
Lavinové fotodiody

Si – 400-1100 nm,

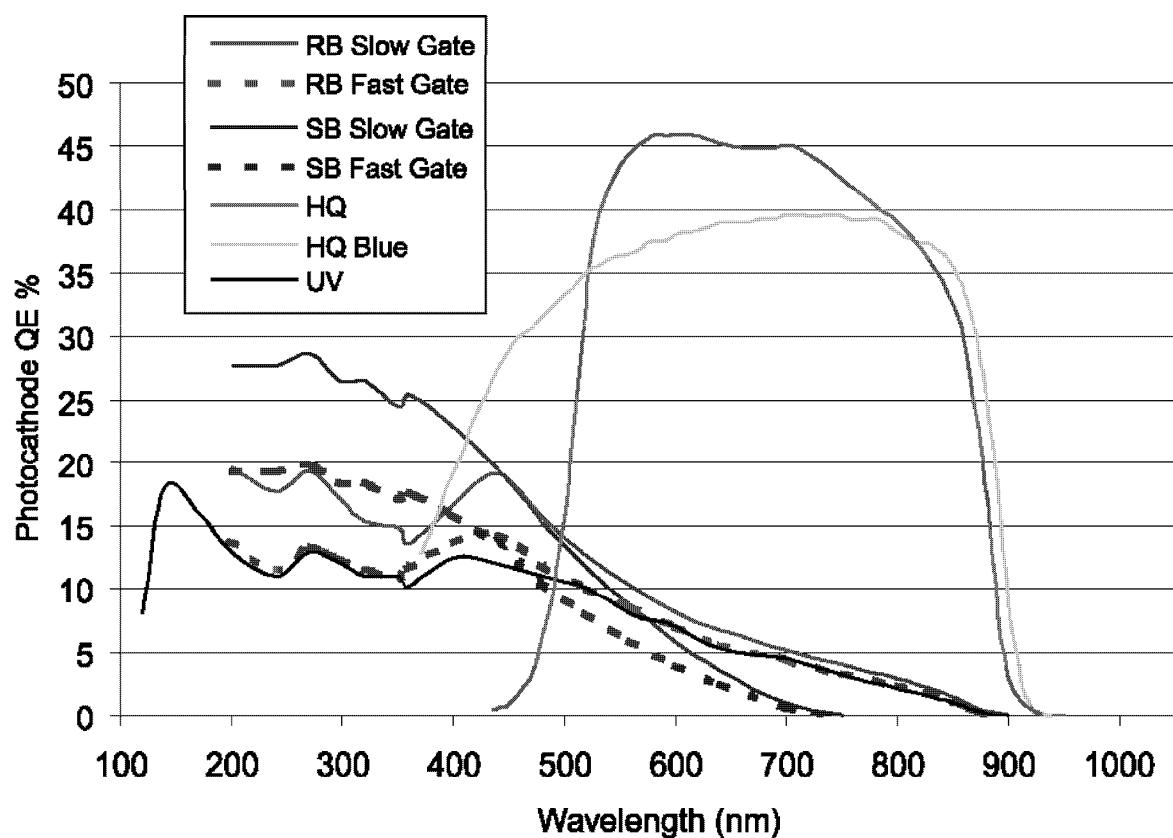
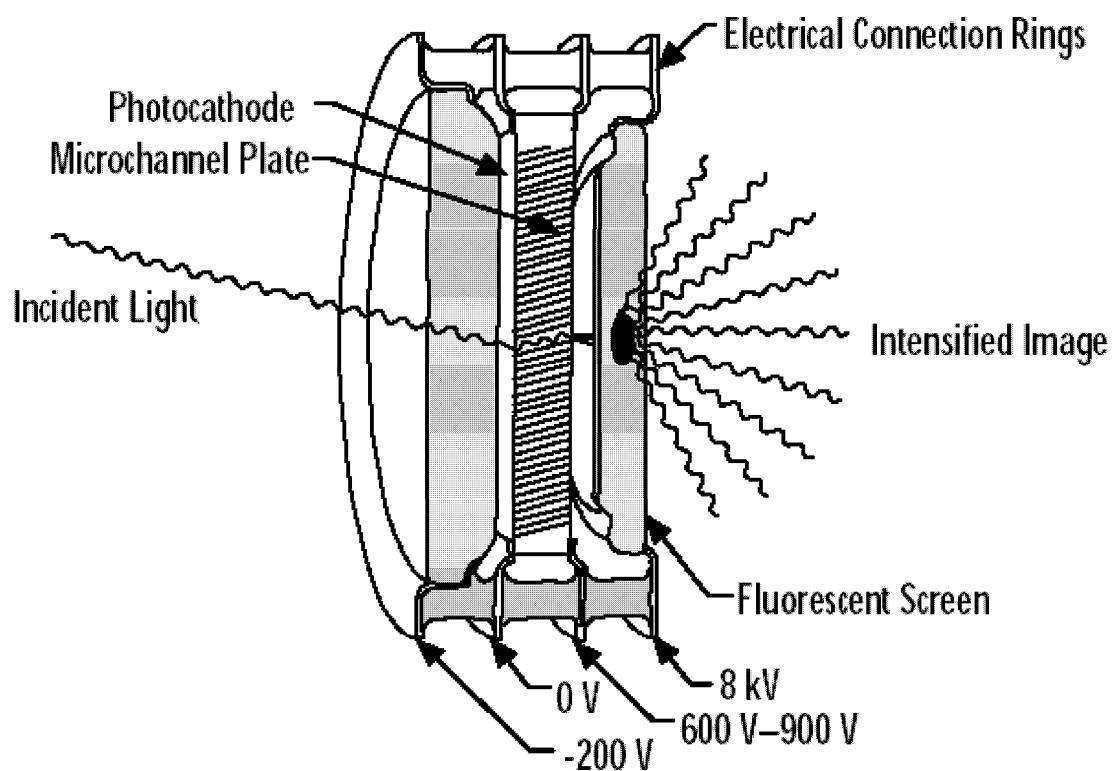
- 10-1000 temných pulsů za sekundu
- až 76% maximální kvantová účinnost
- termoelektrické chlazení

Ge, InGaAs, InGaAsP – 800-2000 nm

- typicky 10^4 - 10^6 temných pulsů za sekundu
- max. 15% kvantová účinnost
- chlazení tekutým dusíkem



Intenzifikovaná CCD kamera



Autokorelační metody (založené na generaci 2. harmonické)

pro detekci impulsů <1 ps

$$E(t) = \sqrt{I(t)} e^{i[\omega t + \varphi(t)]} = \int \sqrt{I(\omega)} e^{i\varphi(\omega)} e^{i\omega t} d\omega$$

Detekuje se intenzita druhé harmonické:

$$I_{SHG}(\tau) \propto \int |[E(t) + E(t-\tau)]|^2 dt$$

Pokud je interferenční člen zprůměrován, dostáváme:

Intenzitní autokorelace

$$I_{SHG}(\tau) \propto 1 + 2 \int I(t)I(t-\tau) dt / \int I^2(t) dt \quad (\text{kontrast } 3:1)$$

Ve vhodném geometrickém uspořádání lze eliminovat konstantní člen:

„Background-free“ intenzitní autokorelace

$$I_{SHG}(\tau) \propto \int I(t)I(t-\tau) dt / \int I^2(t) dt$$

- Poskytuje kusou informaci o délce pulsu
- Neposkytuje ale téměř žádnou informaci o fázi (chirpu) a o tvaru a struktuře pulsu (a jeho případné asymetrie)
- Intenzitní spektrum $I(\omega)$ může prozradit nekonstantnost $\varphi(t)$.

Pokud se provede experiment s interferometrickým rozlišením:

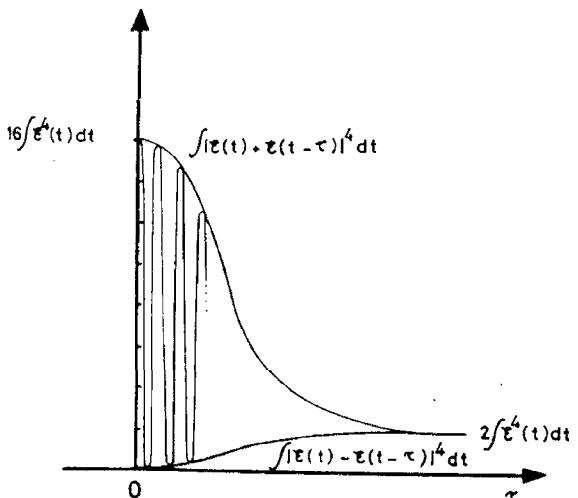
Interferometrická autokorelace

$$\text{Horní obálka (konstruktivní): } \int |E(t) + E(t-\tau)|^4 dt$$

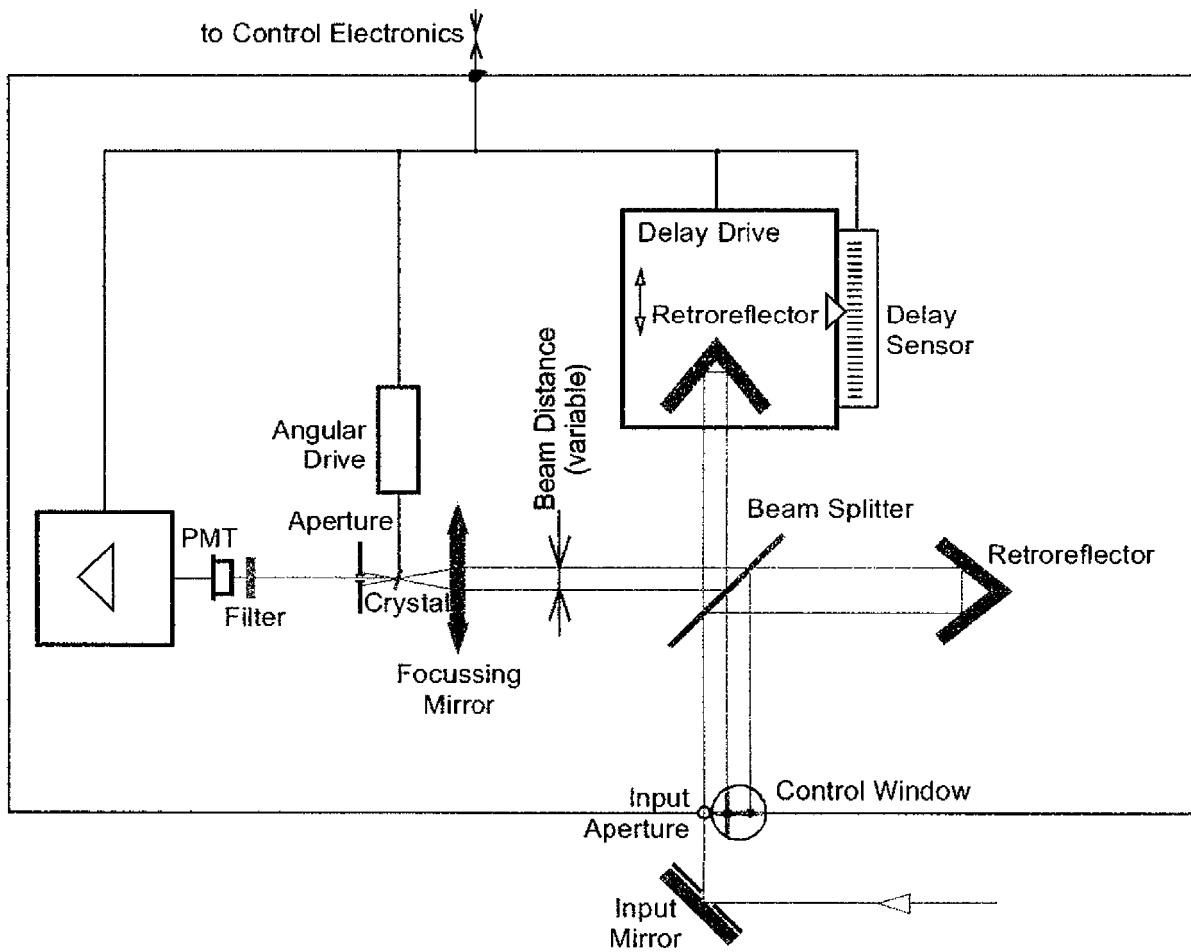
$$\text{Dolní obálka (destruktivní): } \int |E(t) - E(t-\tau)|^4 dt \\ (\text{kontrast } 9:1)$$

- Citlivá na tvar impulsu
- Různé průběhy chirpu dávají charakteristický tvar obálek

Spolu s informací o **intenzitním spektru** $I(\omega)$ lze numericky fitovat obecné tvary impulsu a nalézt průběh amplitudy i fáze pro určité přepokládané tvary impulsů



Autokorelátor Pulsescope 15 (APE Berlin)



Autokorelátor i cross-korelátor

Měří šířky pulsů [ac]: 50 fs – 3,5 ps

Rozlišení: < 1 fs

Může měřit intenzitní (i background-free) a obálky interferometrické autokorelace.

Spektrometr s rotující mřížkou

Intenzitní spektrum 400-1500 nm

Rozlišení: 0,2 nm

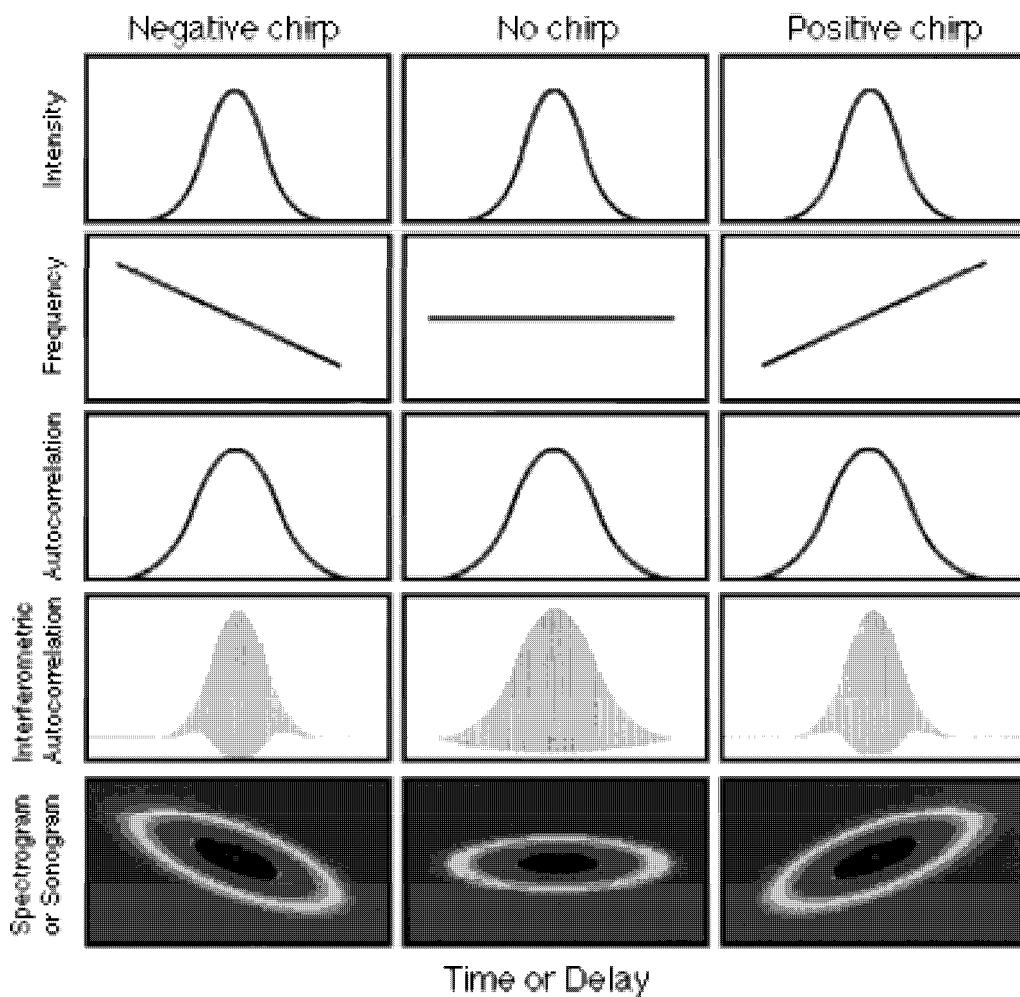
Úplná charakterizace ultrakrátkého impulsu

Oddělená měření v časové a frekvenční oblasti nemohou poskytnout informaci pro úplnou charakterizaci impulsu.

Hybridní časově-frekvenční měření:

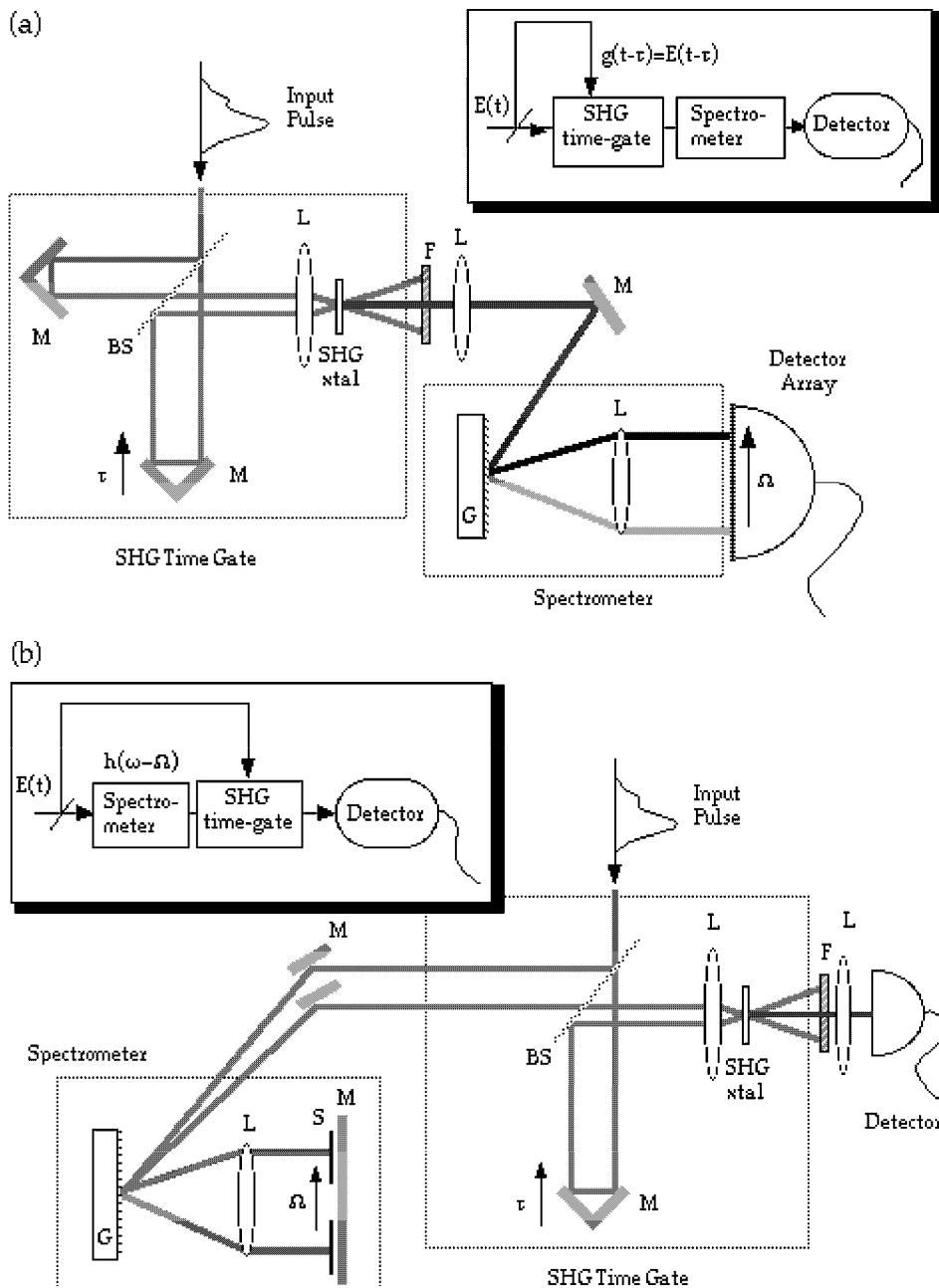
Spektrogram: $S(\omega, t) = \left| \int_{-\infty}^{+\infty} E(t)g(t - \tau)e^{-i\omega\tau} d\tau \right|^2$ (vybíráme krátké časové úseky impulsu a měříme jejich spektrum)

Sonogram: $S(\Omega, T) = \left| \int_{-\infty}^{+\infty} E(\omega)h(\omega - \Omega)e^{-i\omega T} d\omega \right|^2$ (vybíráme úzké spektrální oblasti a měříme jejich časový průběh)



Úplná charakterizace ultrakrátkeho pulsu – FROG (frequency resolved optical gating)

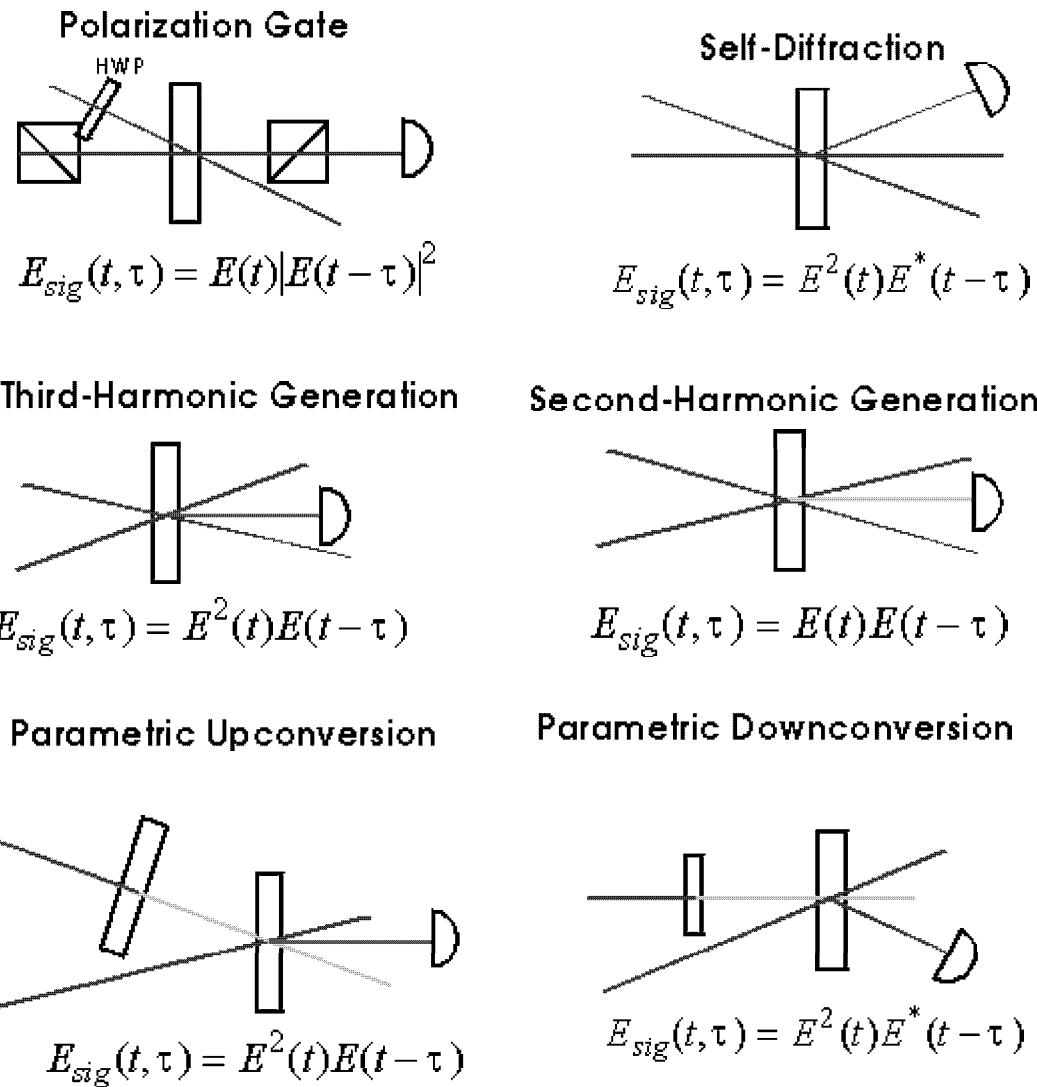
Měříme spektrogram (nebo sonogram): $S(\omega, t) = \left| \int_{-\infty}^{+\infty} E(t)E(t-\tau)e^{-i\omega\tau} dt \right|^2$
(spektrum autokorelace pomocí druhé harmonické)



Ze spektrogramu (reálná funkce dvou proměnných) lze rekonstruovat úplnou informaci o tvaru pulsu (komplexní funkce jedné proměnné) iterativním algoritmem („phase retrieval algorithm“).

FROG – experimentální techniky

Lze použít různé nelineární jevy jako „gating“ pro metodu FROG.



- Metody založené na nelinearitách 2. řádu (SHG, PU, PD) neposkytují informaci o asymetrii pulsu, k tomu jsou třeba liché nelinearity (3. řad: PG, SD, THG)
- Metody založené na nelinearitách 3. řádu jsou zpravidla méně efektivní, potřebují velké energie v pulsu. Nelinearity 2. řádu umožňují měřit pJ energie opakovaně a μJ pro jediný impuls.
- Nejpoužívanější jsou PG (pro silné pulsy) a SHG (pro slabé pulsy)
- PG dává nejintuitivnější výsledky a algoritmus rychle konverguje

FROG – příklady

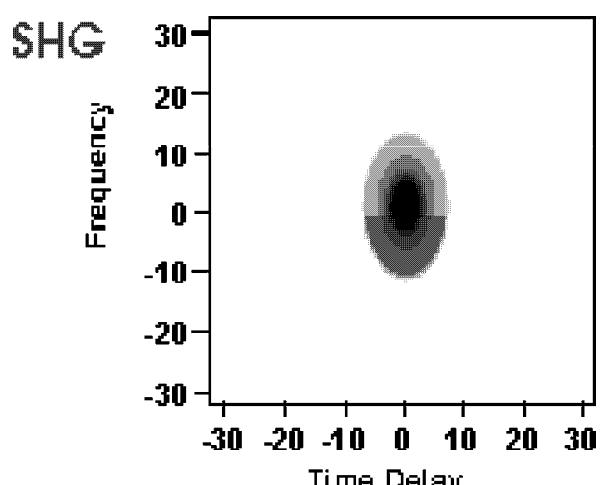
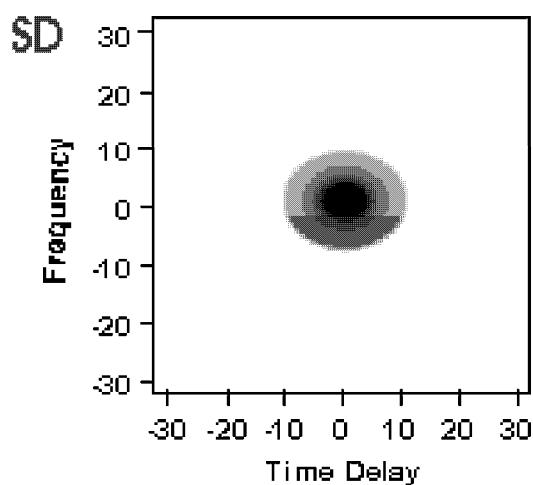
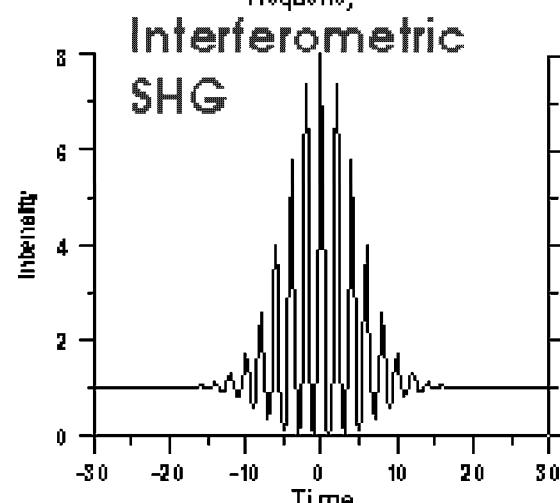
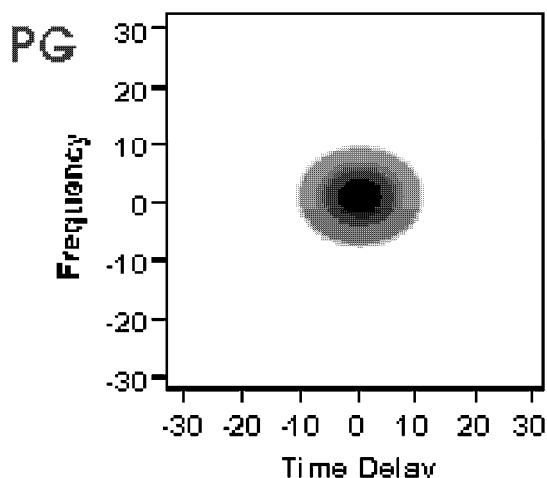
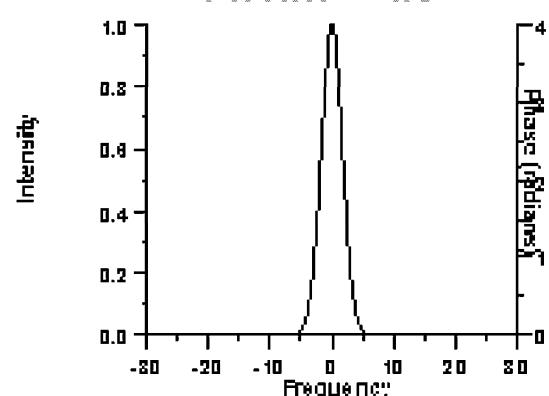
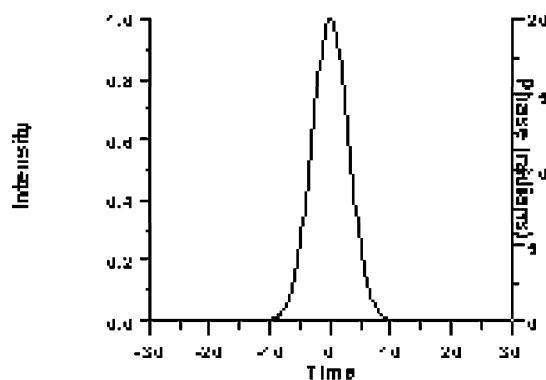
Transform-limited Pulse

FWHM = 4, A = 0, B = 0, C = 0

T-B (FWHM) = 0.441 T-B (RMS) 0.5

FWHM = 7.06

FWHM = 4.0



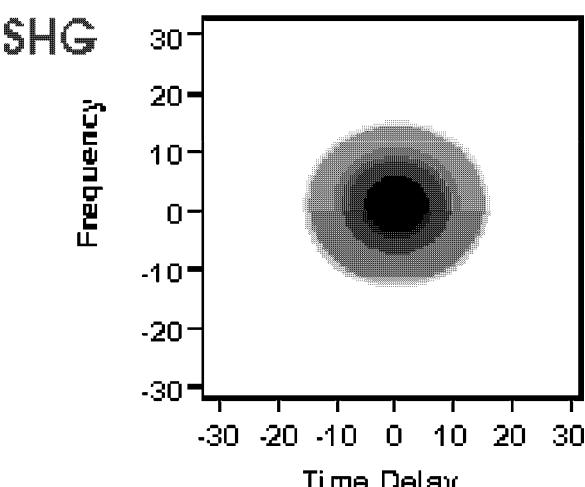
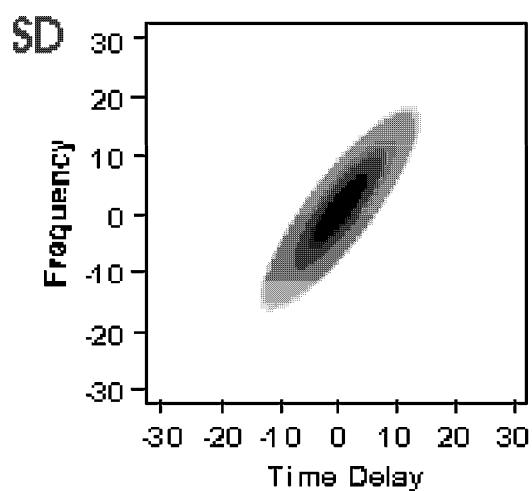
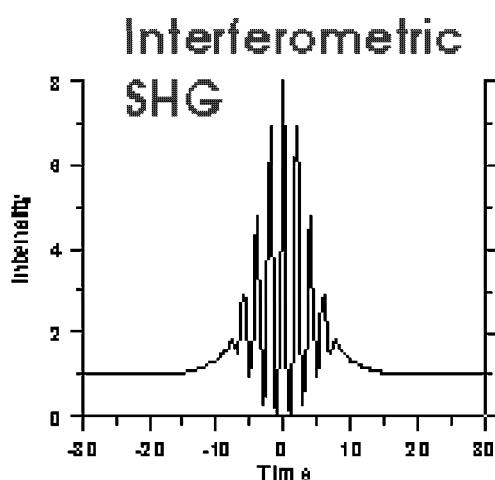
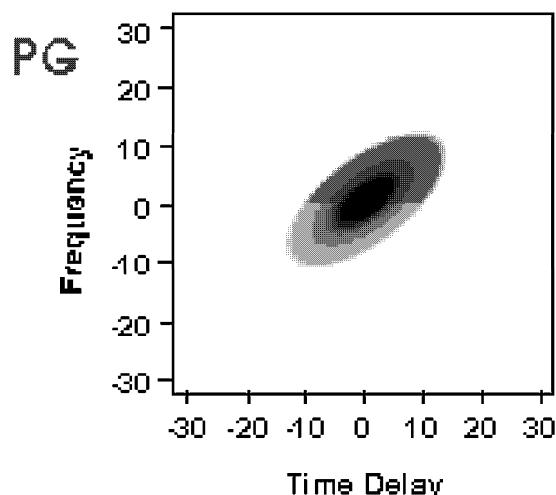
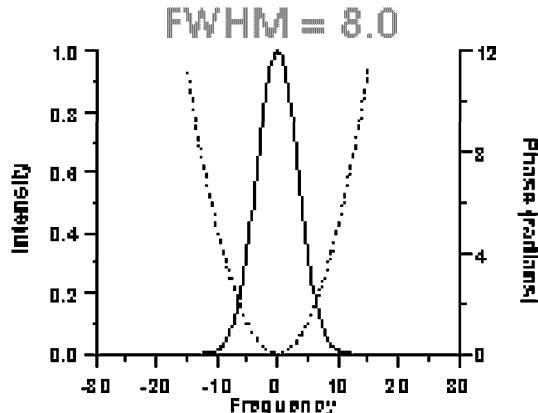
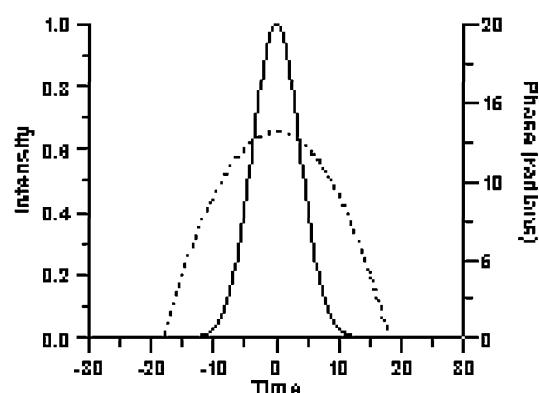
FROG – příklady

Linearly Chirped Pulse

FWHM = 8, A = 0.05, B = 0, C = 0

T-B (FWHM) = 1.110 T-B (RMS) 1.258

FWHM = 8.88



FROG – příklady

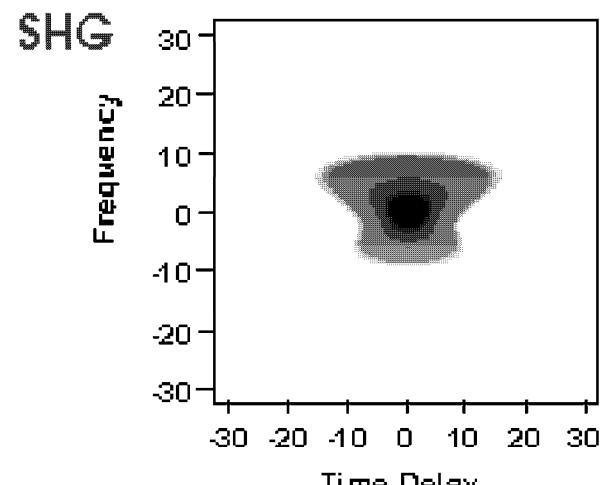
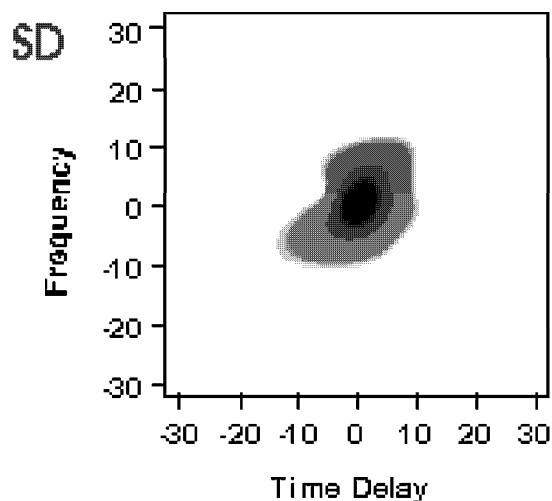
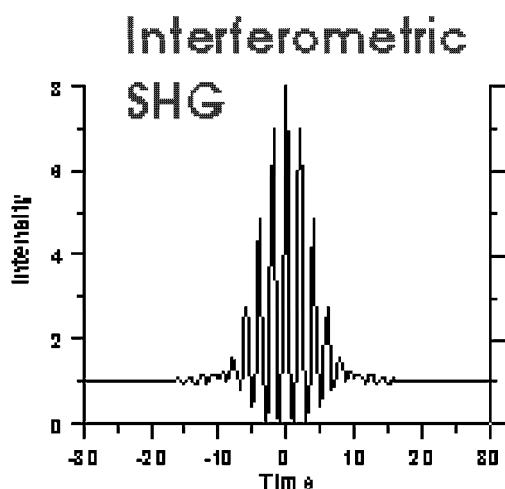
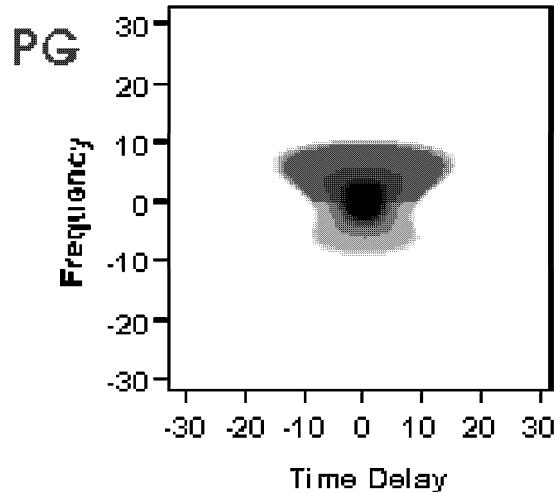
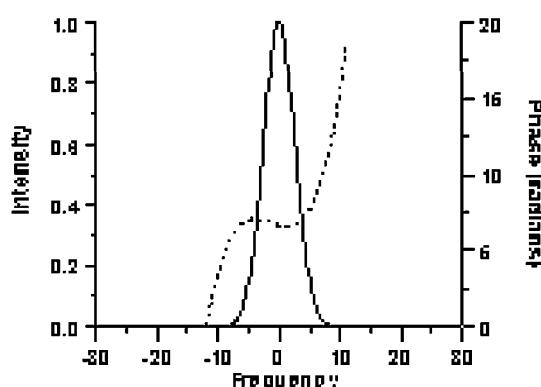
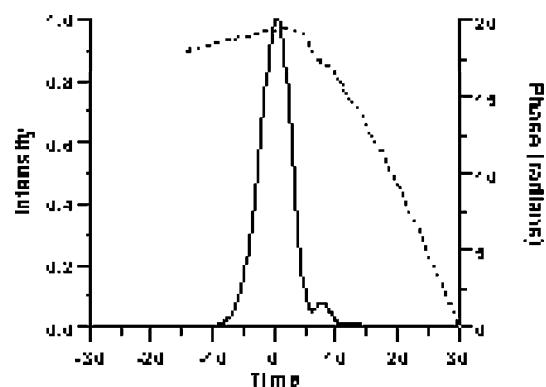
Cubic and Quadratic Phase

FWHM = 6, A = 0.03, B = 0.007, C = 0

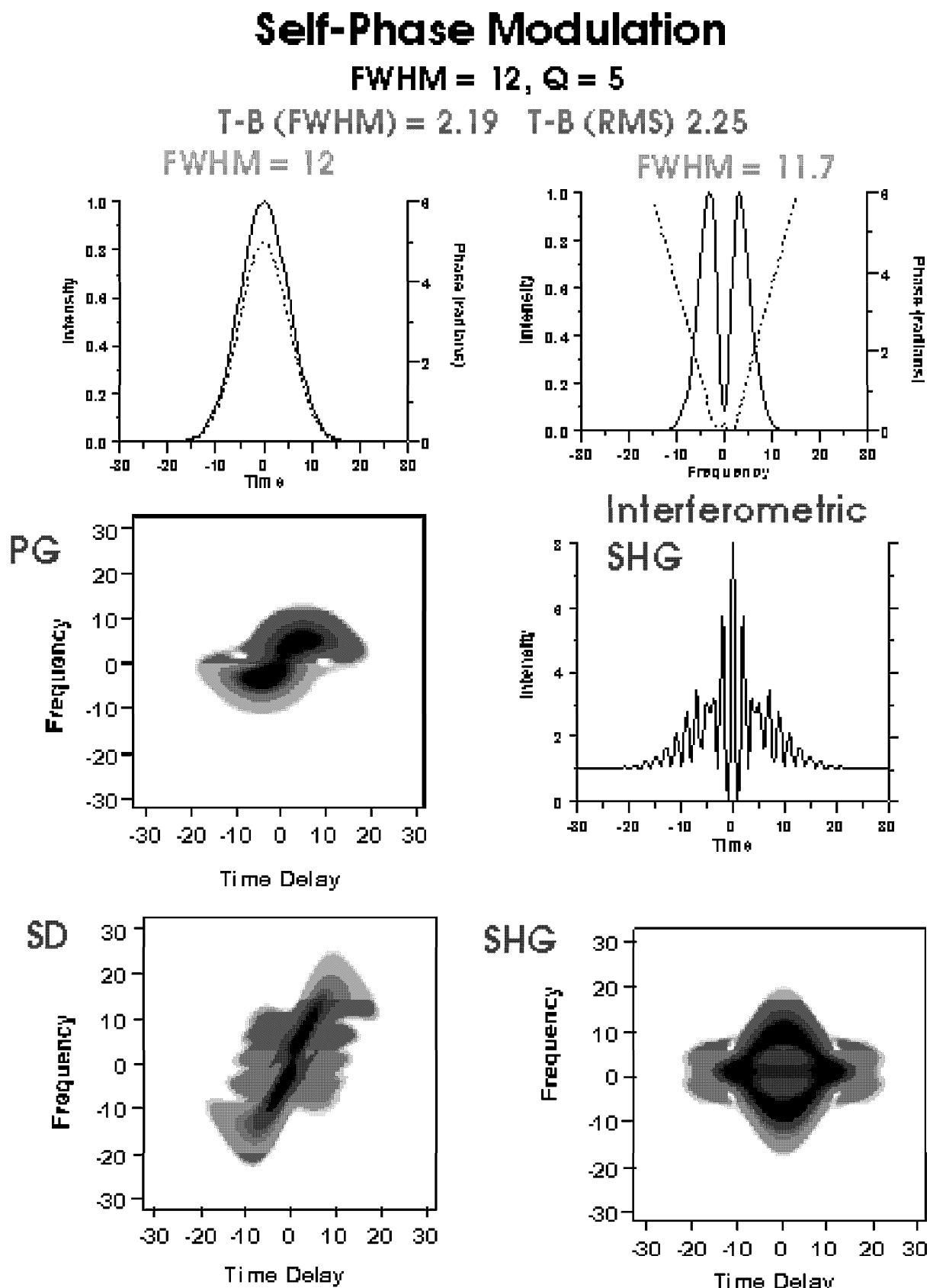
T-B (FWHM) = 0.555 T-B (RMS) 0.802

FWHM = 5.92

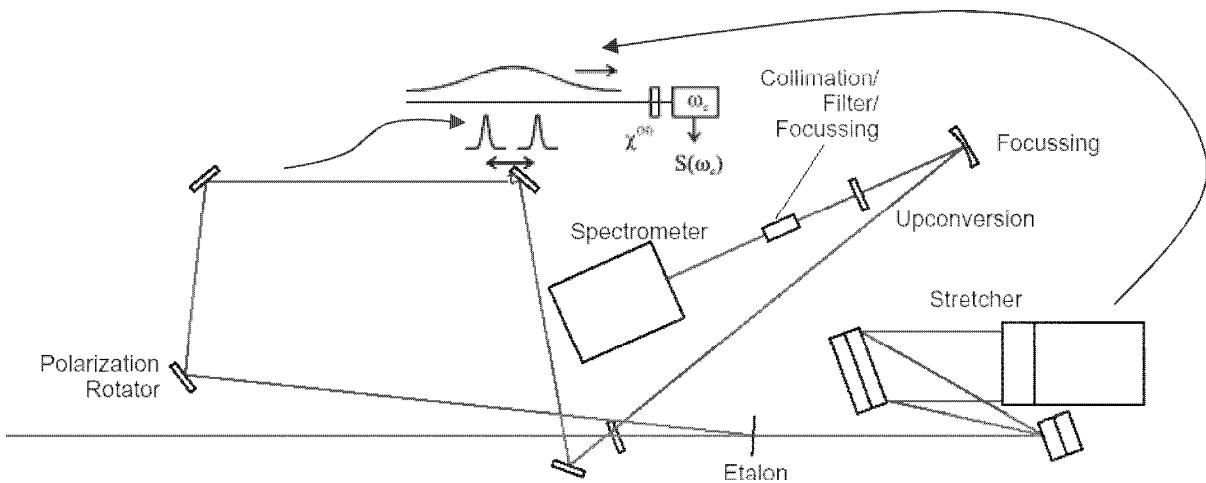
FWHM = 6.0



FROG – příklady



Úplná charakterizace ultrakrátkého pulsu – SPIDER (spectral phase interferometry for direct electric field reconstruction)



Založen na spektrální střihové interferometrii (shear interferometry).

- Pár pulsů se generuje pomocí etalonu
- Mřížkový stretcher produkuje prodloužený čerpovaný puls
- Dvojice pulsů se superponuje na prodloužený puls a každá replika získává jiný spektrální posuv v procesu parametrické konverze nahoru
- Výsledný signál se získá interferencí těchto frekvenčně posunutých replik
- Velmi jednoduchý neiterativní algoritmus pro rekonstrukci fáze

