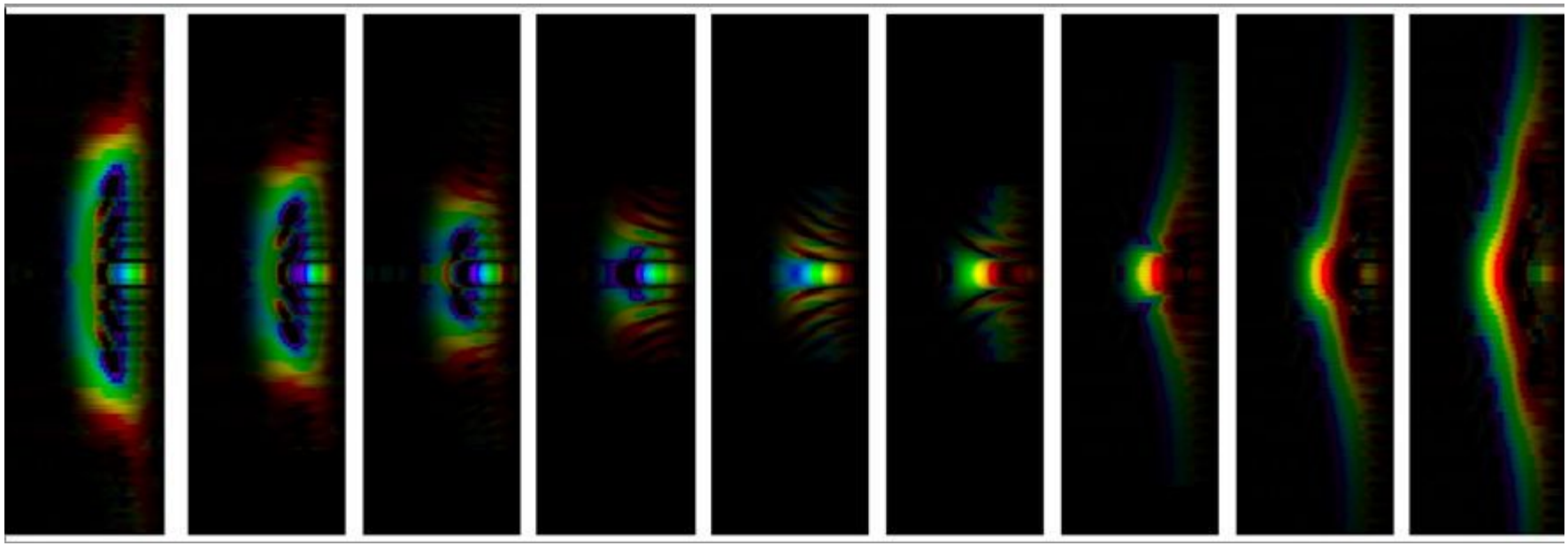
Нелинейно-оптические методы измерений в фемтосекундной оптике

О важности измерения временного профиля оптических импульсов



развертка фокусировки импульса

О важности измерения временного профиля оптических импульсов

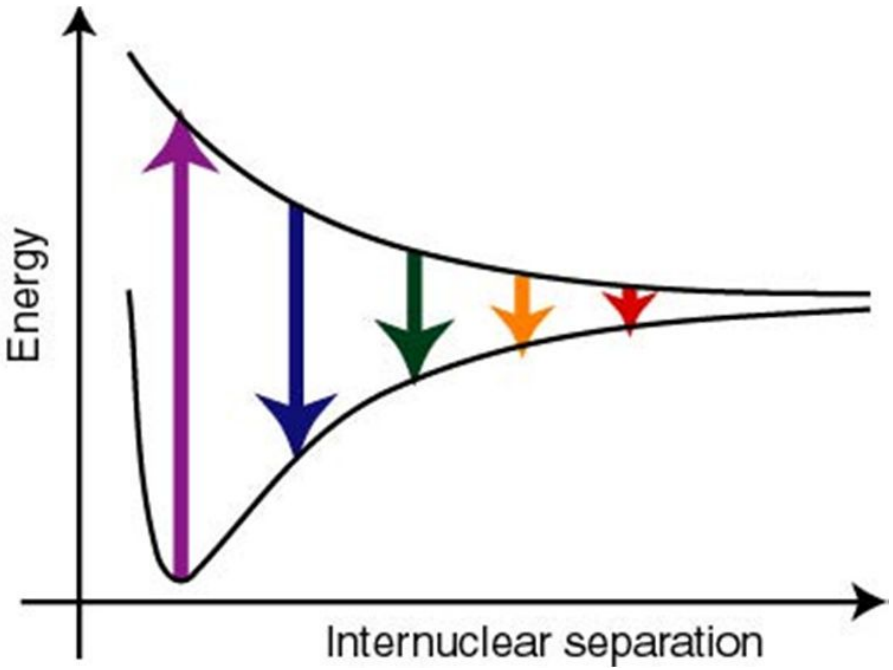


схема изменения свечения (люминесценции) молекулы при ее фотодиссоциации
 временная развертка дает информацию о молекулярной динамике

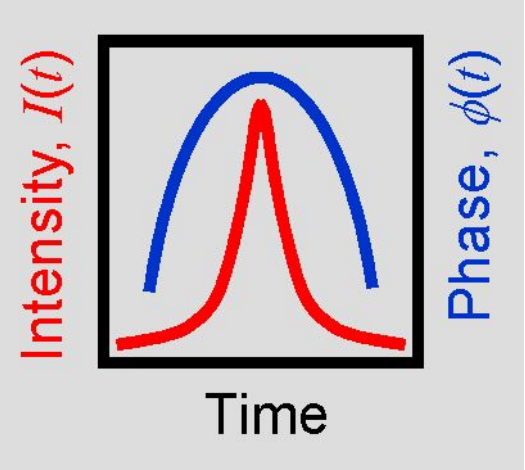
<u>Приложения:</u>

- сверхбыстрая спектроскопия
- лазерноиндуцированная химия
- лазерная метрология
- сверхбыстрое электрооптическое тестирование микросхем
- лазерноиндуцированная плазма
- генерация высших гармоник
- аттосекундная оптика
- оптические коммуникации
- биомедицинские приложения

Об интенсивности и фазе в импульсе

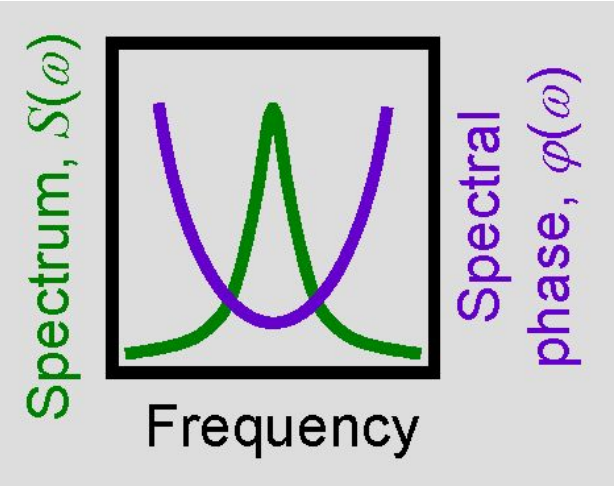
временное представление импульса

$$E(t) = \mathrm{Re}\left[\sqrt{I(t)}\exp\left(i\omega_0 t - i\phi(t)\right)\right]$$



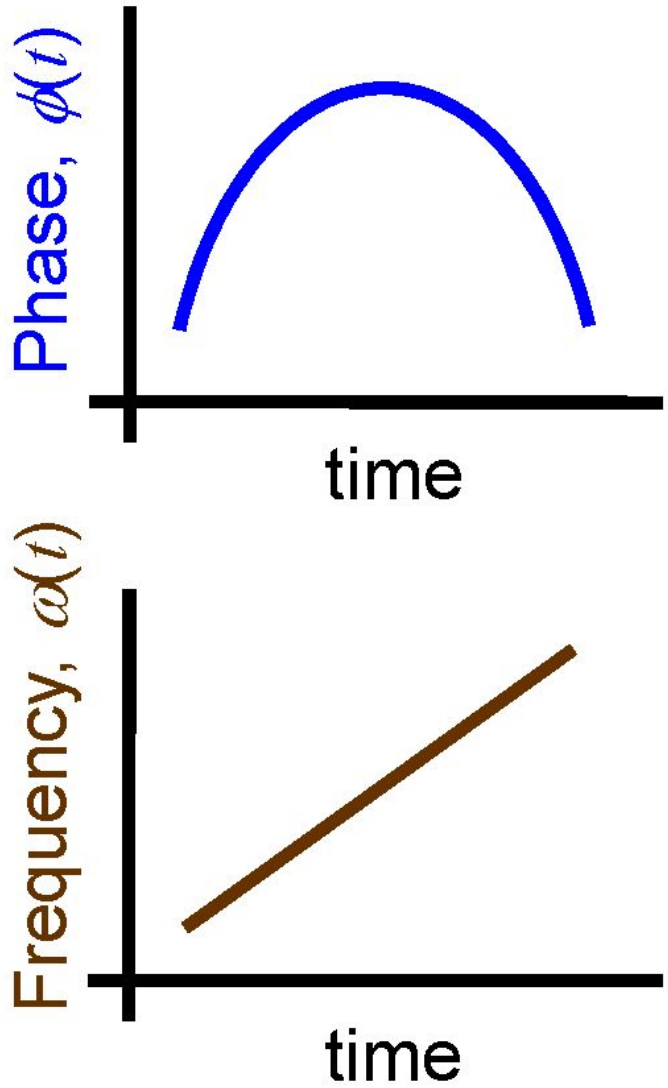
спектральное представление импульса

$$E(\omega) = \sqrt{S(\omega)}\exp\left(i\varphi(\omega)t\right)$$

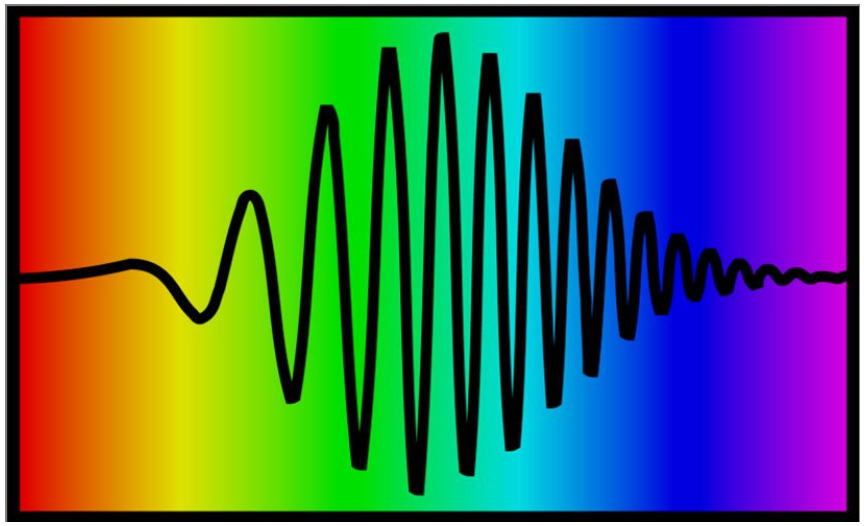


$$\varphi(\omega) = \varphi_0 + \left.\frac{d\varphi}{d\omega}\right|_{\omega=\omega_0}\left(\omega-\omega_0\right) + \frac{1}{2}\left.\frac{d^2\varphi}{d\omega^2}\right|_{\omega=\omega_0}\left(\omega-\omega_0\right)^2 + \ldots$$

Об интенсивности и фазе в импульсе: линейный чирп (временное представление)



Фаза импульса определяет мгновенную частоту (цвет) импульса

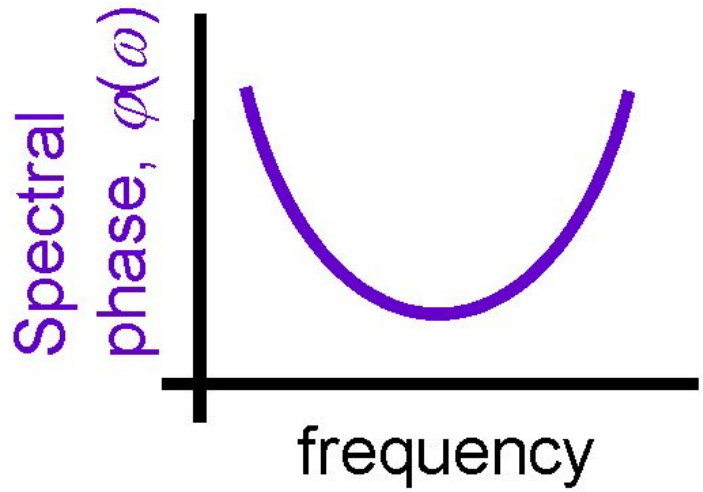


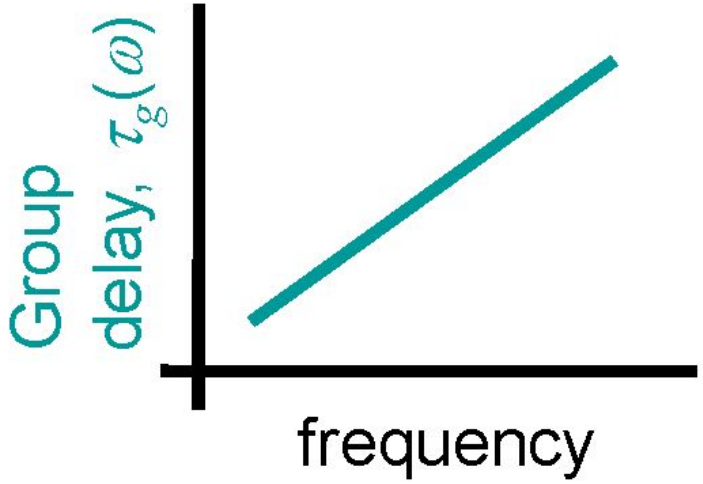
$$E(t) = \mathrm{Re}\left[\sqrt{I(t)}\exp\left(i\omega_0 t - i\phi(t)\right)\right]$$

если $\phi(t) = -\alpha t^2$, то

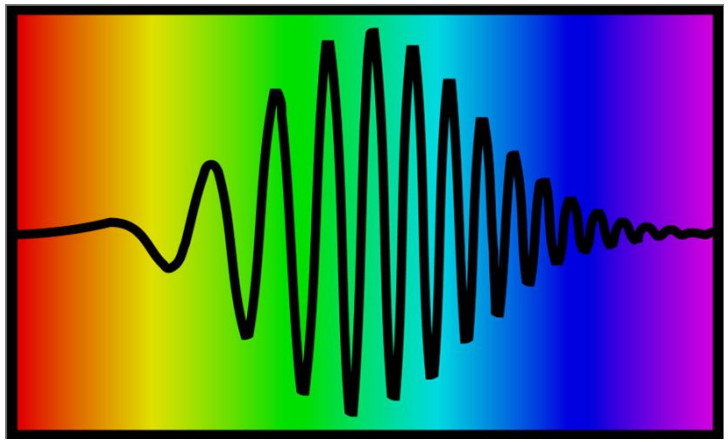
$$\omega(t) = \omega_0 - \frac{d\phi}{dt} = \omega_0 + 2\alpha t$$

Об интенсивности и фазе в импульсе: линейный чирп (спектральное представление)

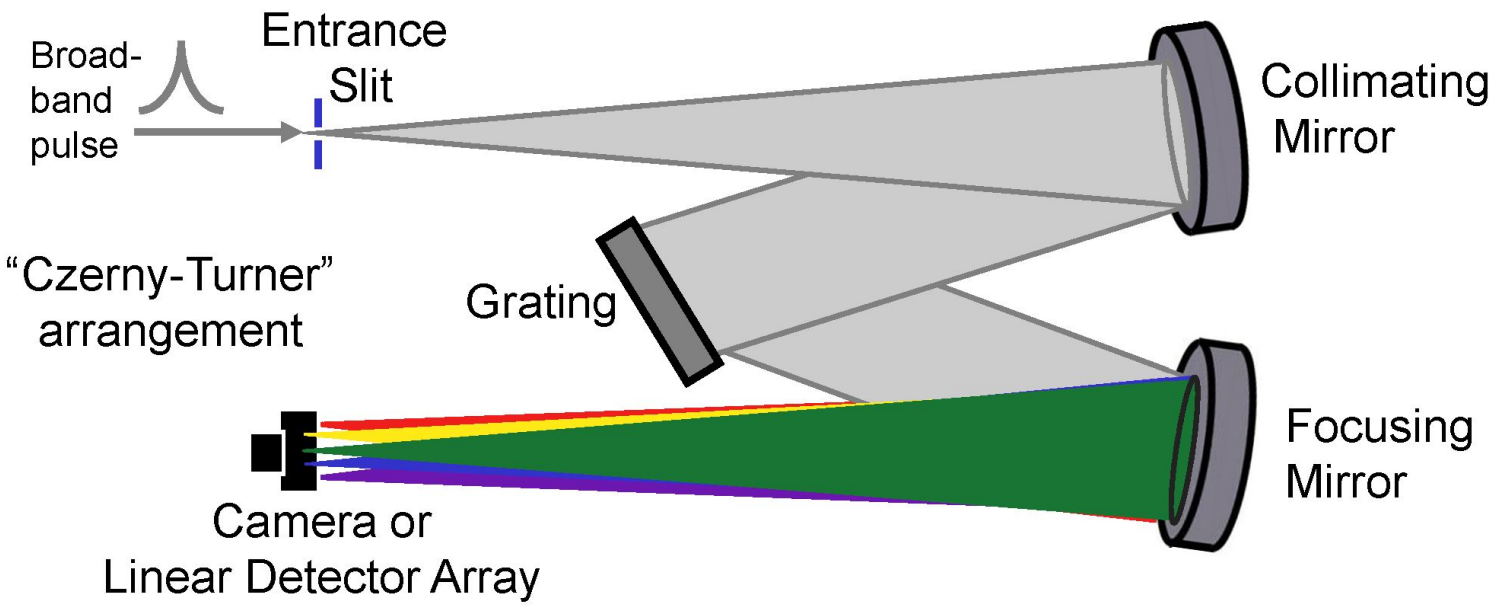




Фаза импульса определяет мгновенную частоту (цвет) импульса

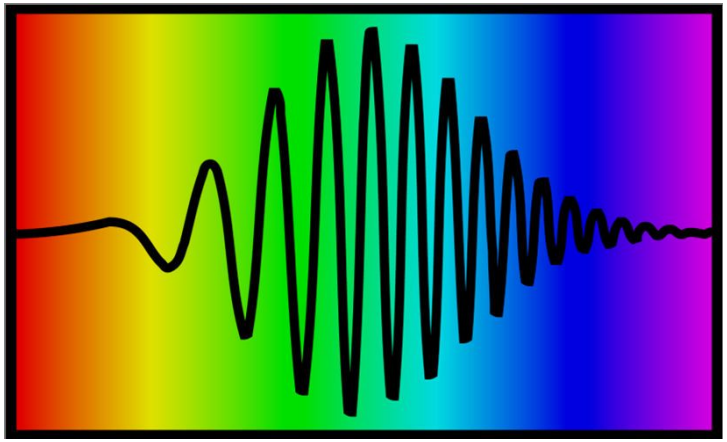


Потеря информации о фазе в спектральных измерениях



$$E(\omega) = \sqrt{S(\omega)}\exp\left(i\varphi(\omega)t\right)$$

Измеряется $S(\omega)$, а не $\varphi(\omega)$



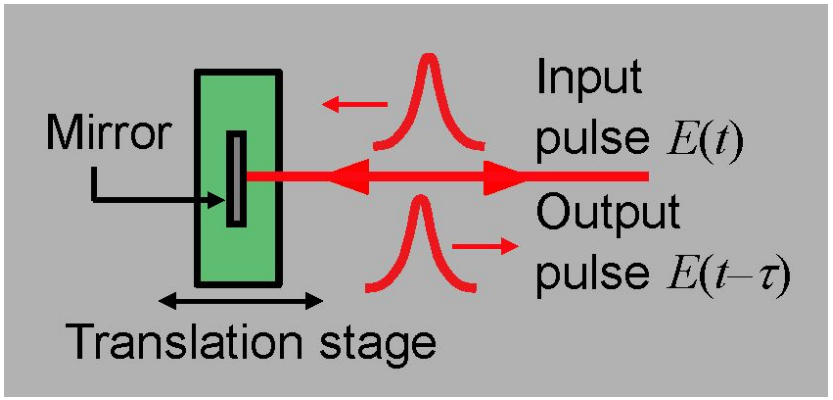
Временные измерения: как достигнуть фемтосекундного разрешения?

Все детекторы медленные (не быстрее 1 нс)
(самые быстрые - стрик-камеры)

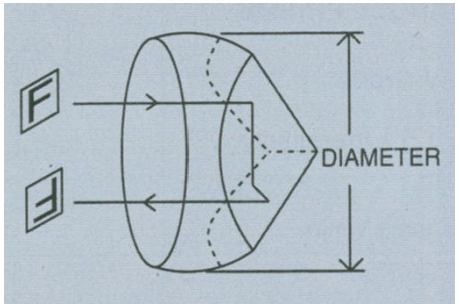
но можно создать оптическую задержку

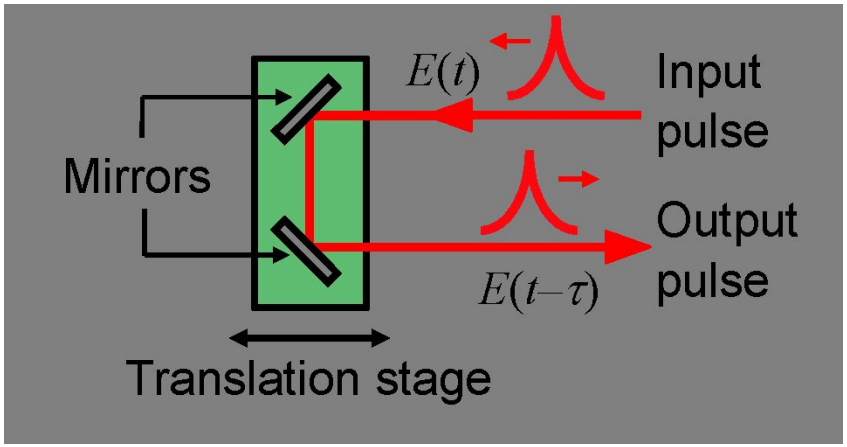
$$\tau = 2L/c$$

300 мкм □ 2 пс



тройное отражение сохраняет параллельность входного и выходного импульсов

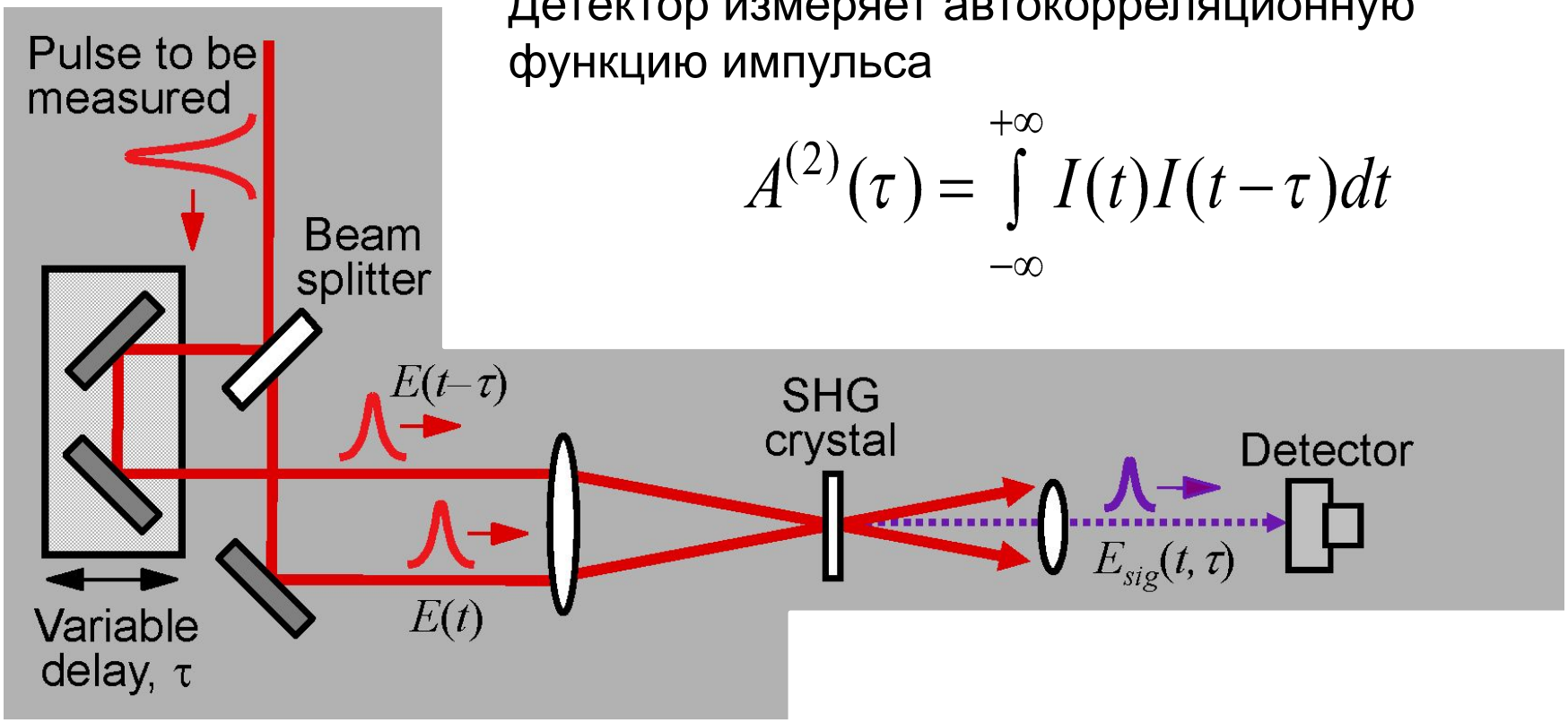




Автокорреляционные измерения

Детектор измеряет автокорреляционную функцию импульса

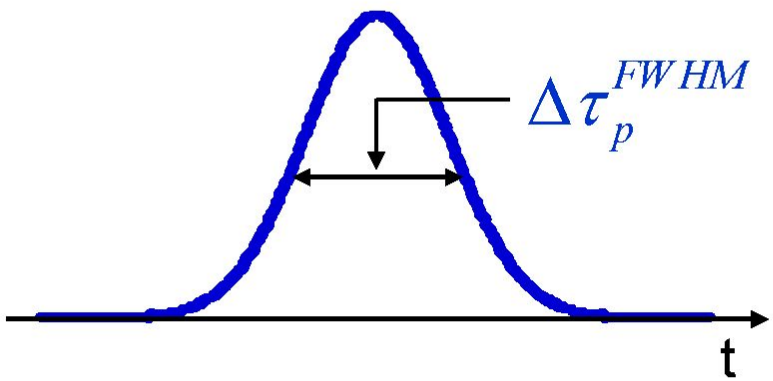
$$A^{(2)}(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} I(t)I(t-\tau)dt$$

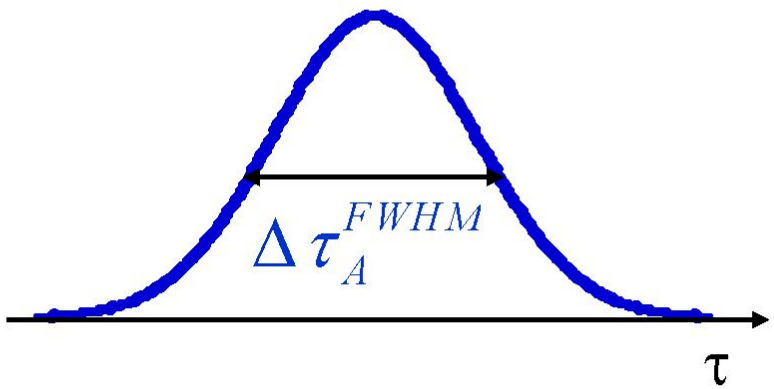


Автокорреляционные измерения гауссовых импульсов

$$I(t) = \exp\left[-\left(\frac{2\sqrt{\ln 2}\,t}{\Delta\tau_p^{FWHM}}\right)^2\right]$$

$$A^{(2)}(\tau) = \exp\left[-\left(\frac{2\sqrt{\ln 2}\,\tau}{\Delta\tau_A^{FWHM}}\right)^2\right]$$



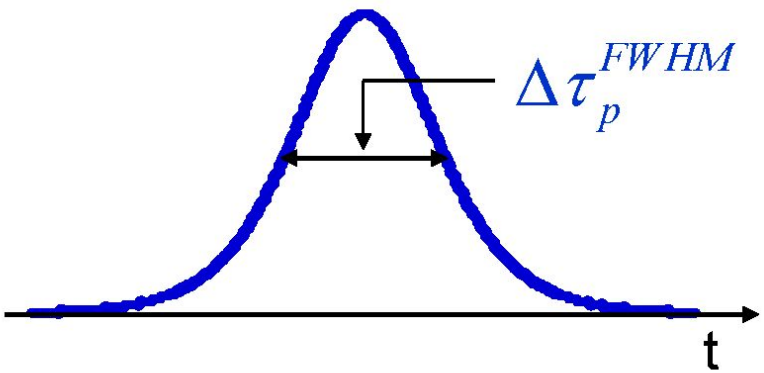


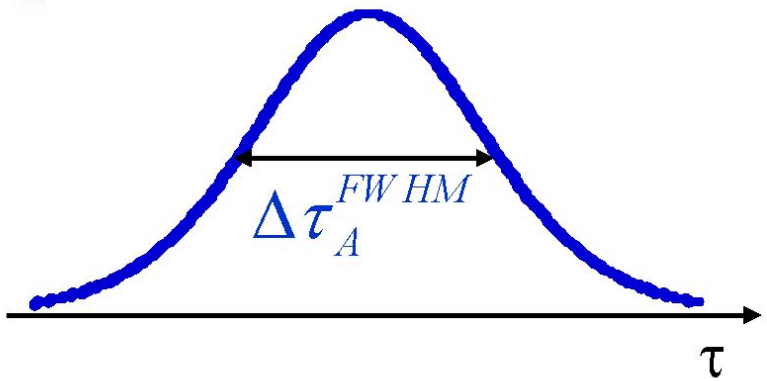
$$1.41\,\Delta\tau_p^{FWHM} = \Delta\tau_A^{FWHM}$$

Автокорреляционные измерения sech-импульсов

$$I(t) = \operatorname{sech}^2\left[\frac{1.7627t}{\Delta t_p^{FWHM}}\right]$$

$$A^{(2)}(\tau) = \frac{3}{\sinh^2\left(\frac{2.7196\tau}{\Delta\tau_A^{FWHM}}\right)}\left[\frac{2.7196\tau}{\Delta\tau_A^{FWHM}}\coth\left(\frac{2.7196\tau}{\Delta\tau_A^{FWHM}}\right)-1\right]$$



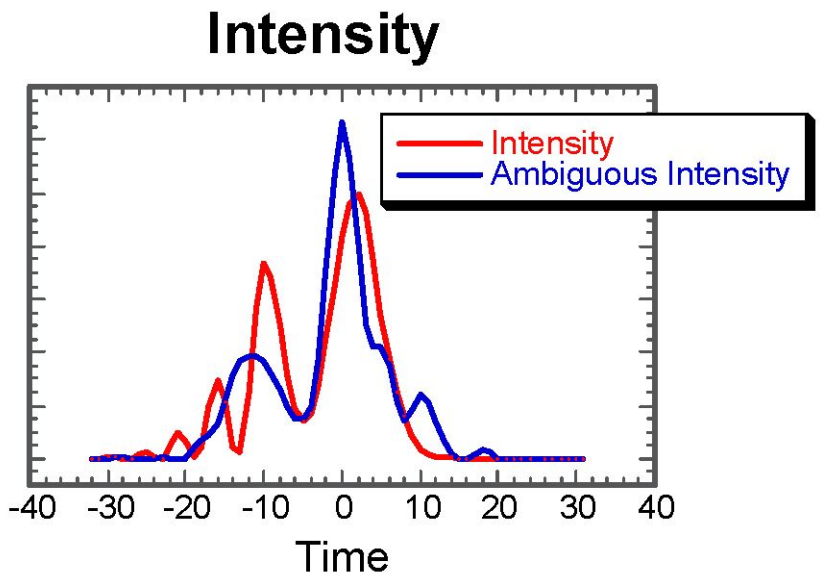


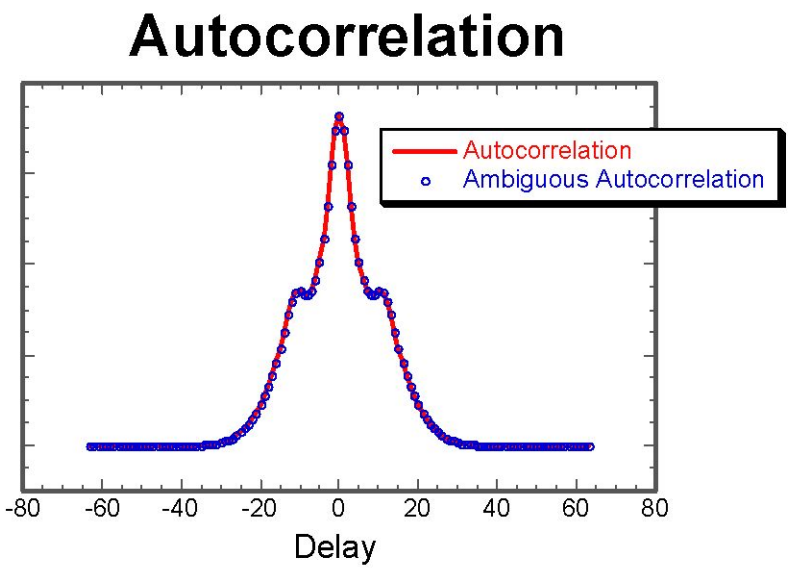
$$1.54\,\Delta\tau_p^{FWHM} = \Delta\tau_A^{FWHM}$$

Недостатки автокорреляционных измерений

автокорреляционная функция симметрична

$$A^{(2)}(\tau)=\int_{-\infty}^{+\infty} I(t)I(t-\tau)dt=\left[t_1=t-\tau\right]=\int_{-\infty}^{+\infty} I(t_1+\tau)I(t_1)dt_1=A^{(2)}(-\tau)$$



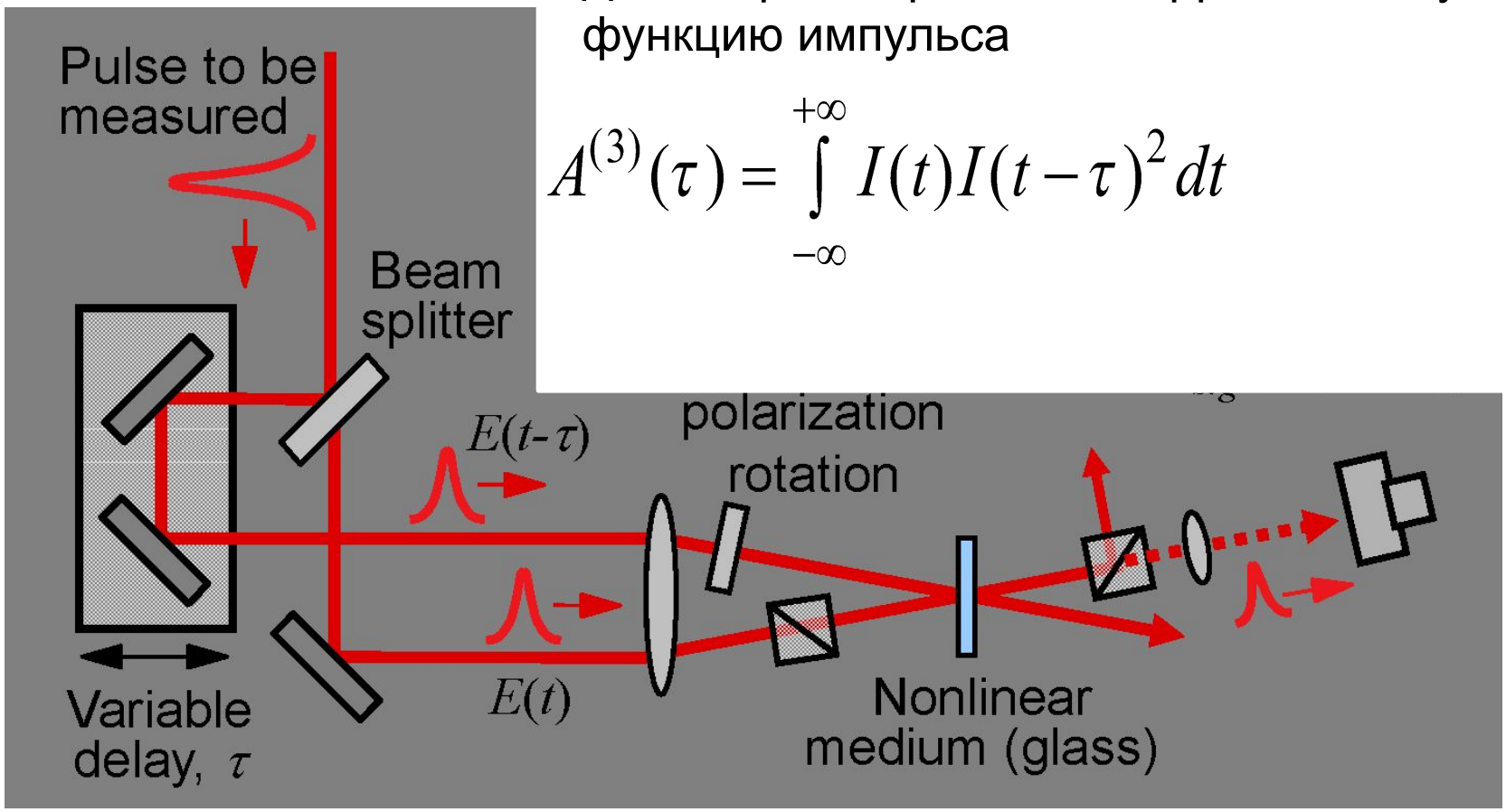


- неоднозначность в восстановлении импульса

Вариант решения - кубичные автокорреляционные измерения

Детектор измеряет автокорреляционную функцию импульса

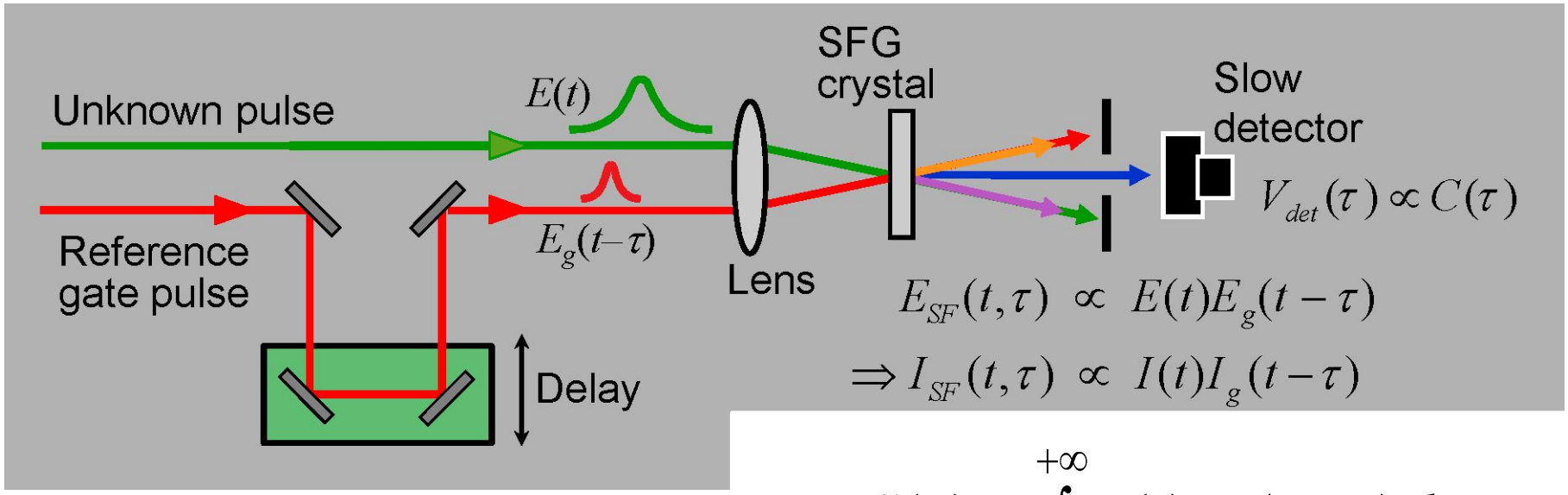
$$A^{(3)}(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} I(t) I(t-\tau)^2 dt$$



автокорреляционная функция несимметрична, но информация о фазе по-прежнему утеряна

Другой вариант – использование стробирование коротким импульсом

Детектор измеряет кросс-корреляционную функцию импульсов

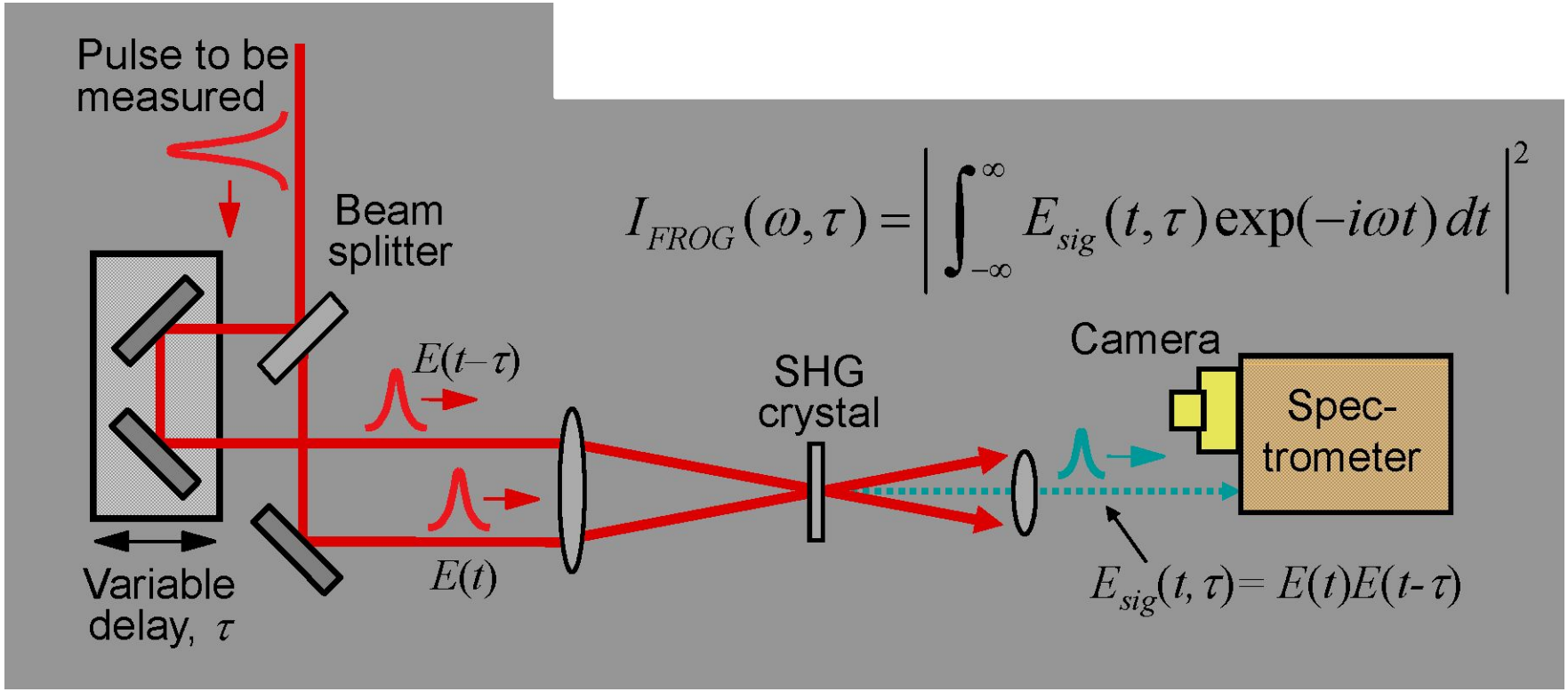


$$C(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} I(t) I_g(t-\tau) dt$$

требуется референсный импульс, короче измеряемого

Последний вариант – поставить спектрометр

Frequency-Resolved Optical Gating (FROG)
детектор после спектрометра измеряет спектрограмму



проблема – решение обратной задачи восстановления импульса