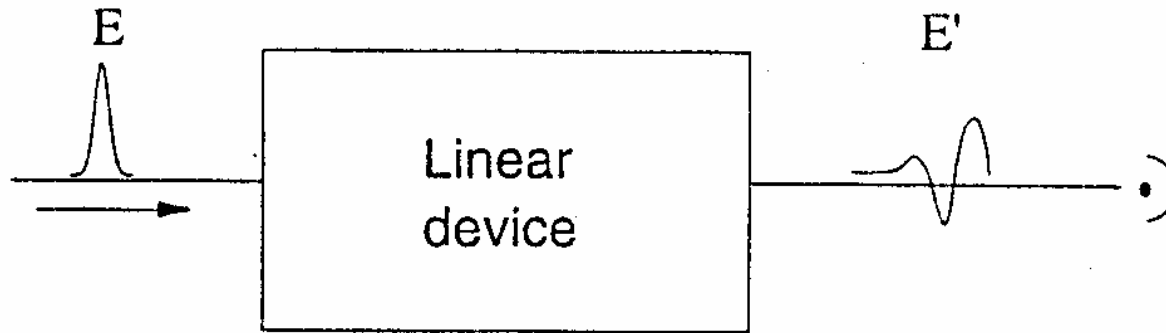


Методы интерферометрии в частотном пространстве

1. Метод линейной интерферометрии во временном пространстве
2. Метод линейной интерферометрии в частотном пространстве
3. Метод линейной интерферометрии в частотном пространстве при использовании сверхкоротких импульсов
4. Метод нелинейной интерферометрии в частотном пространстве

Оптический отклик линейной системы



Поставим задачу об определении оптического отклика линейной системы

$E(t)$ - падающий лазерный импульс

$E'(t)$ - выходной оптический импульс

Введем $R(t)$ - искомую функцию отклика исследуемой системы

выходной оптический импульс задается в виде свертки

$$E'(t) = \int R(t - t')E(t')dt'$$

Раскладывая $E(t)$ и $R(t)$ в интеграл Фурье:

Спектр плотности мощности в линейном отклике

$$E(t) = \int E(\omega) e^{i\omega t} \frac{d\omega}{2\pi} = \int |E(\omega)| e^{i\phi_\omega} e^{i\omega t} \frac{d\omega}{2\pi}$$

и

$$R(t) = \int R(\omega) e^{i\omega t} \frac{d\omega}{2\pi} = \int |R(\omega)| e^{i\phi_\omega^r} e^{i\omega t} \frac{d\omega}{2\pi}$$

получим:

$$E'(t) = \int R(\omega) E(\omega) e^{-i\omega t} \frac{d\omega}{2\pi}$$

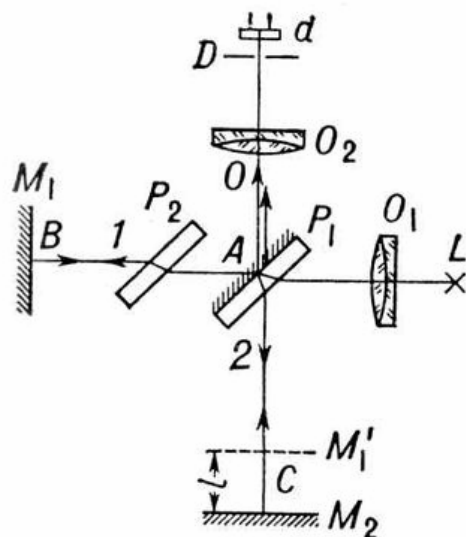
Результат измерения отклика детектором:

$$S = \int |E'(t)|^2 dt = \int |E'(\omega)|^2 \frac{d\omega}{2\pi} = \int |R(\omega)|^2 |E(\omega)|^2 \frac{d\omega}{2\pi}$$

- интенсивность импульса или интегрированная по спектру плотность мощности (теорема Парсеваля)

Видно, что информация о фазах ϕ_ω и ϕ_ω^r теряется, т.е. в линейном эксперименте получается один и тот же результат при возбуждении когерентном импульсом и случайным полем с тем же спектром мощности.

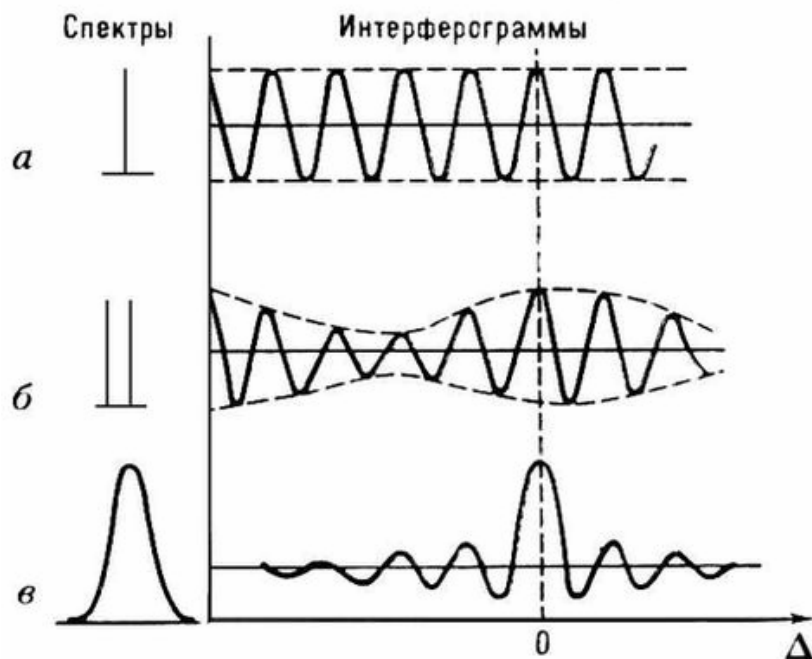
Метод линейной интерферометрии во временном пространстве (фурье спектроскопия)



Положим, что $R(t)$ производится интерферометром Майкельсона

Сначала регистрируется интерферограмма исследуемого излучения, а затем путём её Фурье-преобразования вычисляется спектр.

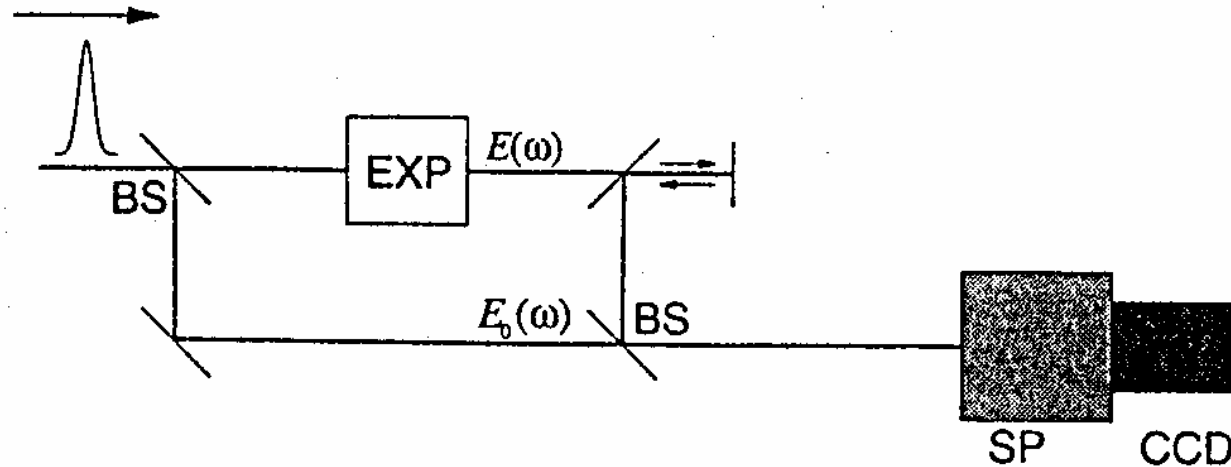
Интерферограммы получают с помощью интерферометра. При поступательном перемещении одного из зеркал интерферометра изменяется разность хода лучей в плечах, исследуемое излучение модулируется, причём частота модуляции зависит от скорости изменения разности хода и длины волны.



Недостатки:

1. требование высокой механической стабильности
2. необходимо очень точно определять оптические пути
3. для повышения спектрального разрешения необходимо записывать много периодов в интерферограмме

Метод линейной интерферометрии в частотном пространстве



Сигнальная волна $E(\omega)$ интерферирует с эталонной $E_0(\omega)$ в интерферометре Маха-Цендера;

$$S(\omega) = |E_0(\omega) + E(\omega)|^2 = |E_0(\omega)|^2 + |E(\omega)|^2 + 2\text{Re}E_0^*(\omega)E(\omega)$$

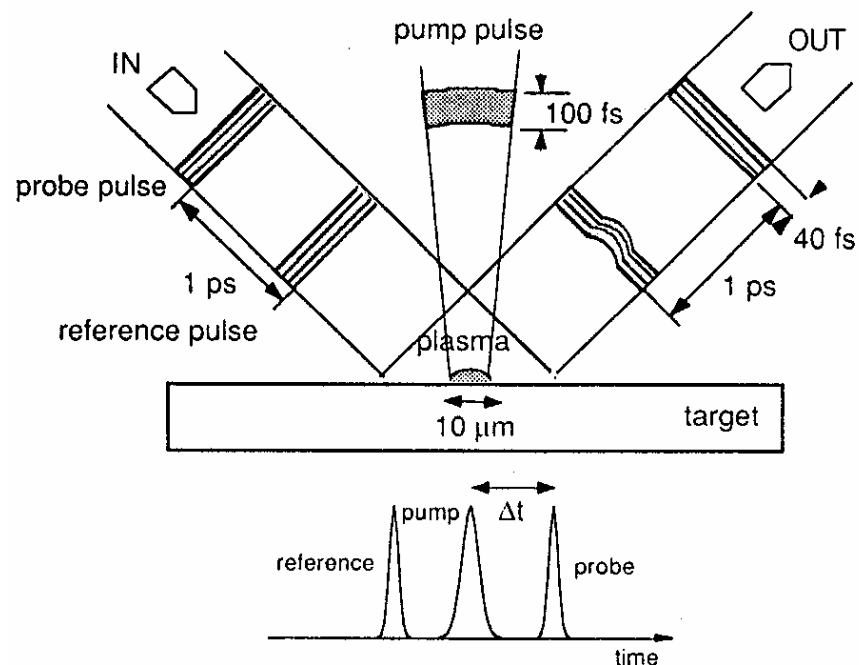
последний, интерференционный, член несет информацию о разности фаз Фурье-компонент:

$$\Delta\phi = \phi(\omega) - \phi_0(\omega)$$

Достоинства:

1. интерферограмма измеряется одновременно (можно работать с одиночным импульсом)
2. нет изменения оптических путей

Метод линейной интерферометрии в частотном пространстве при использовании сверхкоротких импульсов



Идея: сигнальный и эталонный импульсы заведомо **не пересекаются** во времени, т.е. не интерферируют в пространстве,

но их спектры – пересекаются и **интерферируют** в частотном пространстве (на диф. решетке, в спектрометре и т.д.),

а результат интерференции спектров несет информацию как об амплитудах, так и об относительной разности фаз фурье-компонент сигнального и эталонного импульсов

Метод линейной интерферометрии в частотном пространстве при использовании сверхкоротких импульсов

тоже самое, но математически:

два импульса, $E_1(t)$ и $E_2(t - \tau)$, сдвинутые на временной интервал τ ,

интерferируют в спектрометре:

$$S = \int |E_1(t) + E_2(t + \tau)|^2 dt = \\ = \int \int dt [(E_1(\omega) + E_2(\omega)e^{+i\omega\tau}) (E_1^*(\omega) + E_2^*(\omega)e^{-i\omega\tau})] \frac{d\omega}{4\pi^2}$$

тогда спектральная плотность мощности, соответствующая частоте ω , имеет вид:

$$S(\omega) = |E_1(\omega)|^2 + |E_2(\omega)|^2 + f^*(\omega)e^{-i\omega\tau} + f(\omega)e^{i\omega\tau}$$

где

$$f(\omega) = E_1(\omega)E_2^*(\omega)$$

спектральная плотность мощности каждого из импульсов поодиночке, $|E_1(\omega)|^2$ и $|E_2(\omega)|^2$

может быть определена независимо и можно извлечь спектральную плотность мощности интерференционного члена:

$$S'(\omega) = f^*(\omega)e^{-i\omega\tau} + f(\omega)e^{i\omega\tau}$$

Метод линейной интерферометрии в частотном пространстве при использовании сверхкоротких импульсов

применим обратное Фурье-преобразование для спектральной плотности мощности интерференционного члена:

$$F^{-1} [S'(\omega)] = F^{-1} [f^*(\omega)e^{-i\omega\tau} + f(\omega)e^{i\omega\tau}] = f(t - \tau) + f(-t - \tau)$$

выделяя домножением на функцию Хевисайда часть, удовлетворяющую принципу причинности, делая прямое преобразование Фурье и выделяя одну спектральную компоненту, получим:

$$F [\theta(t)F^{-1} [S'(\omega)]] = E_1^*(\omega)E_2(\omega)e^{i\omega\tau}$$

или, окончательно:

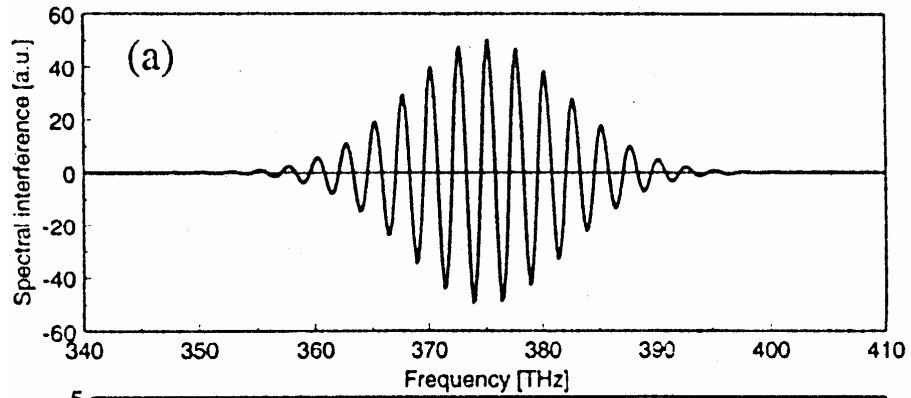
$$E_2(\omega) = \frac{F [\theta(t)F^{-1} [S'(\omega)]] e^{-i\omega\tau}}{E_1^*(\omega)}$$

знание амплитуды и фазы $E_1(\omega) = |E_1(\omega)|e^{i\phi_1}$ эталонного импульса позволяет

восстановить амплитуду и фазу $E_2(\omega) = |E_2(\omega)|e^{i\phi_2}$ исследуемого импульса.

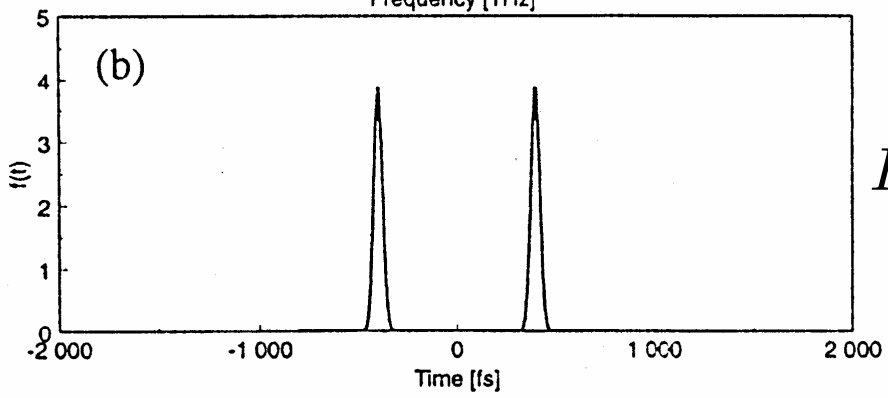
Метод линейной интерферометрии в частотном пространстве при использовании сверхкоротких импульсов

продемонстрируем для гауссовых импульсов:



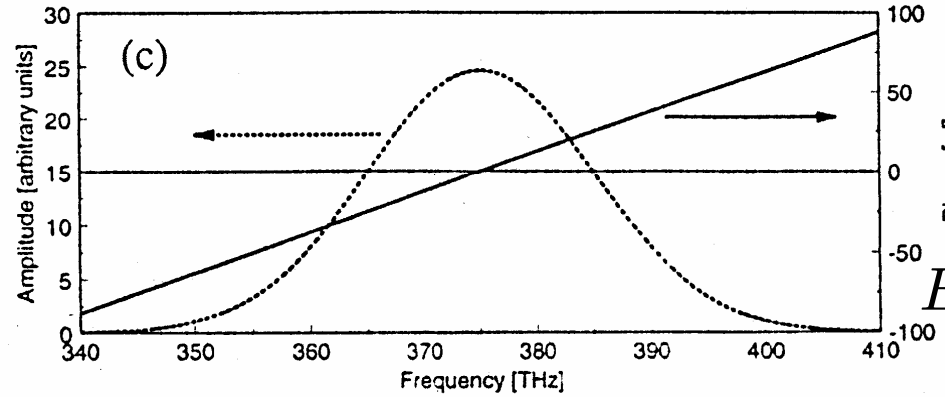
(a) – спектр интерференционного члена

$$S'(\omega) = f^*(\omega)e^{-i\omega\tau} + f(\omega)e^{i\omega\tau}$$



(б) – его обратное Фурье преобразование

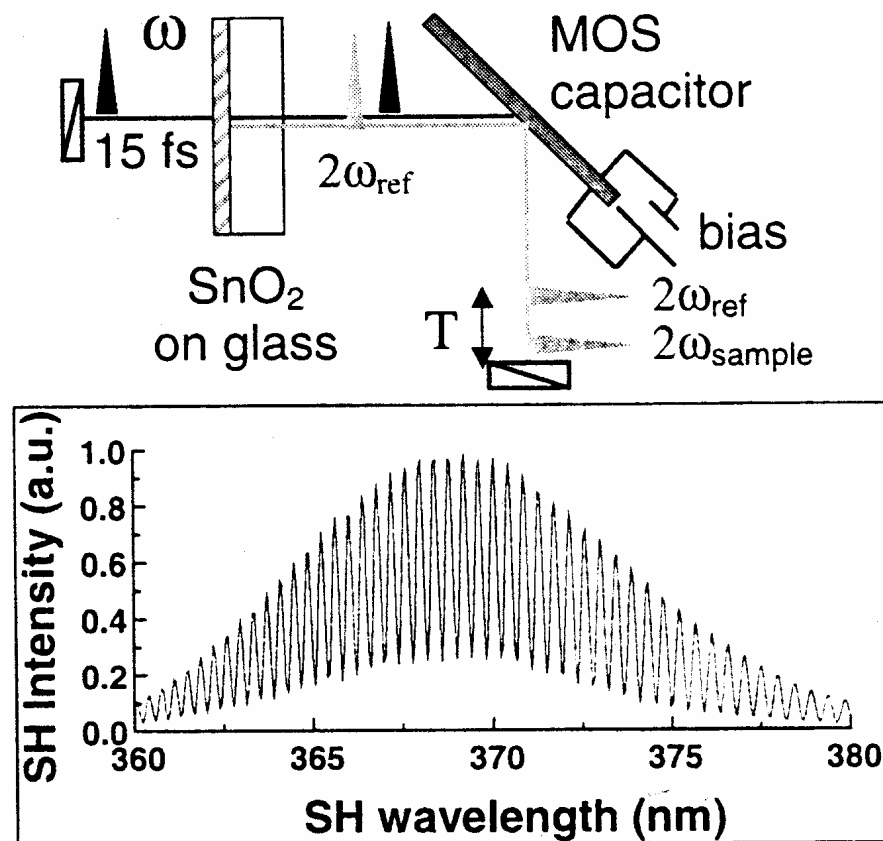
$$F^{-1} [S'(\omega)] = f(t - \tau) + f(-t - \tau)$$



(c) – спектр восстановленных амплитуды и фазы

$$E_2(\omega) = \frac{F [\theta(t) F^{-1} [S'(\omega)]] e^{-i\omega\tau}}{E_1^*(\omega)}$$

Метод нелинейной интерферометрии в частотном пространстве



Идея: один фемтосекундный лазерный импульс генерирует сигнальный и эталонный импульсы второй гармоники, разведенные во времени.

Спектр интерференционного члена одновременно дает информацию об амплитуде и относительной фазе **всех** фурье-компонент сигнального импульса ВГ.