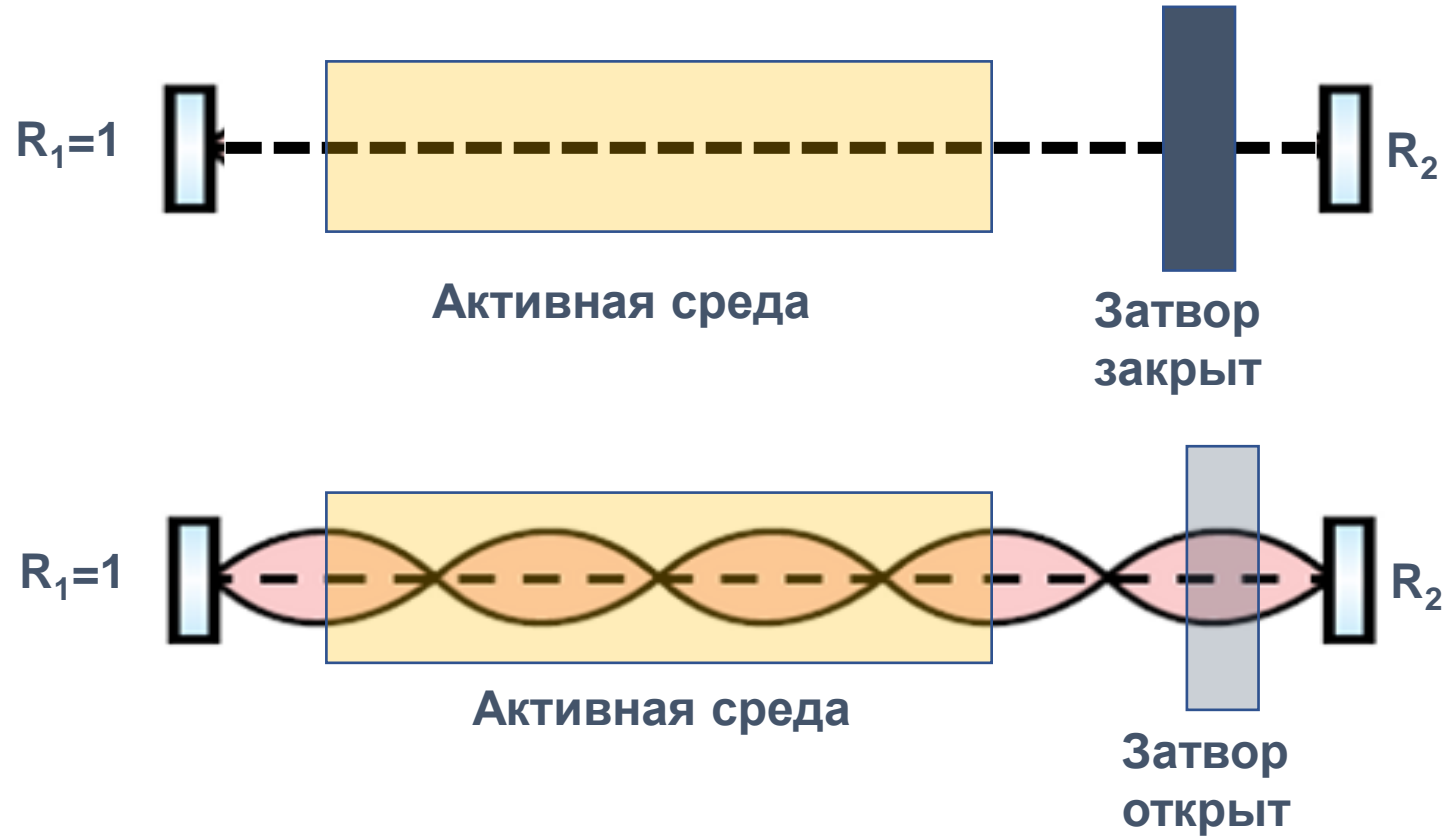
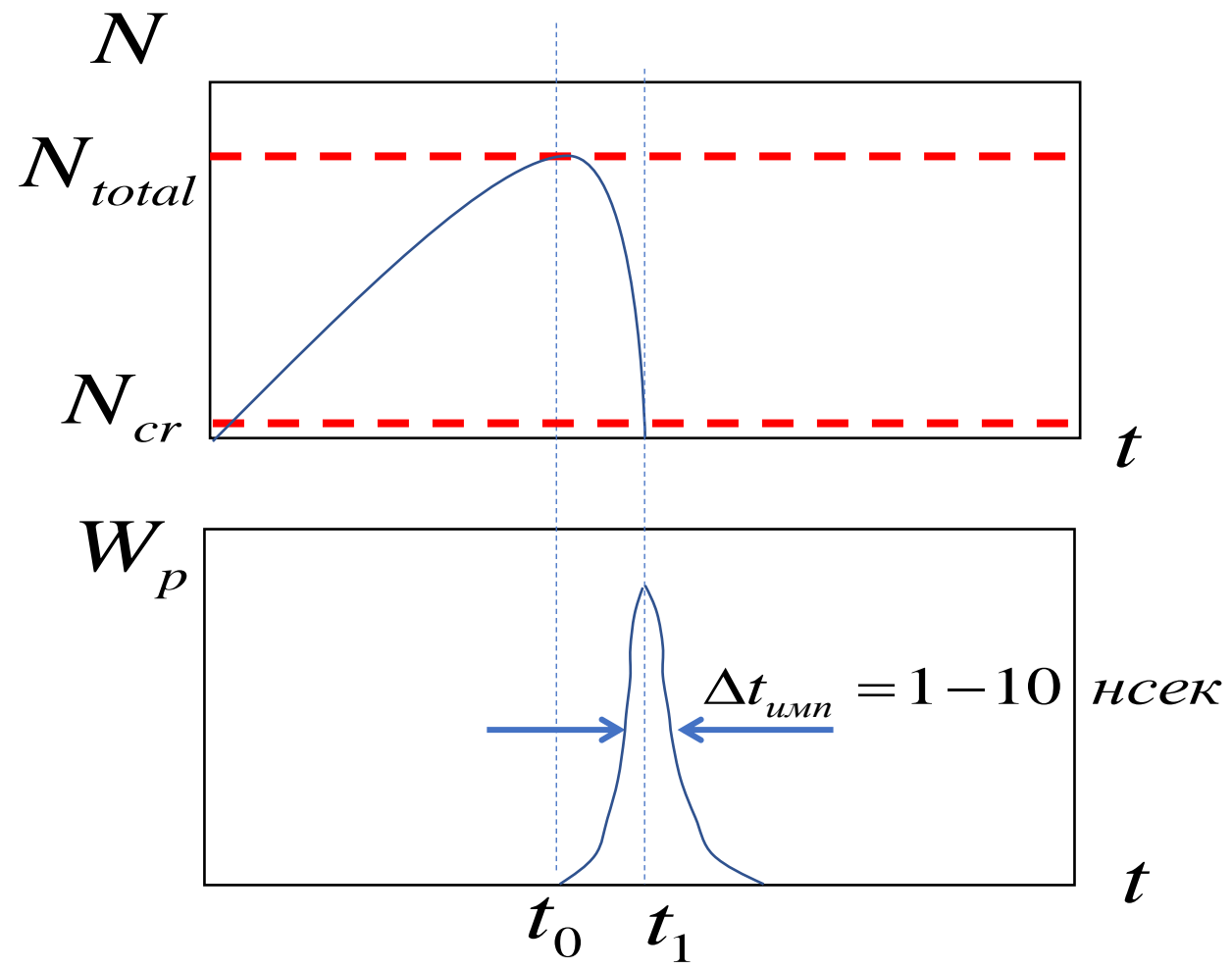


Лекция №2.  
Лазеры ультракоротких импульсов. Терагерцовые источники.

I. Импульсные лазеры

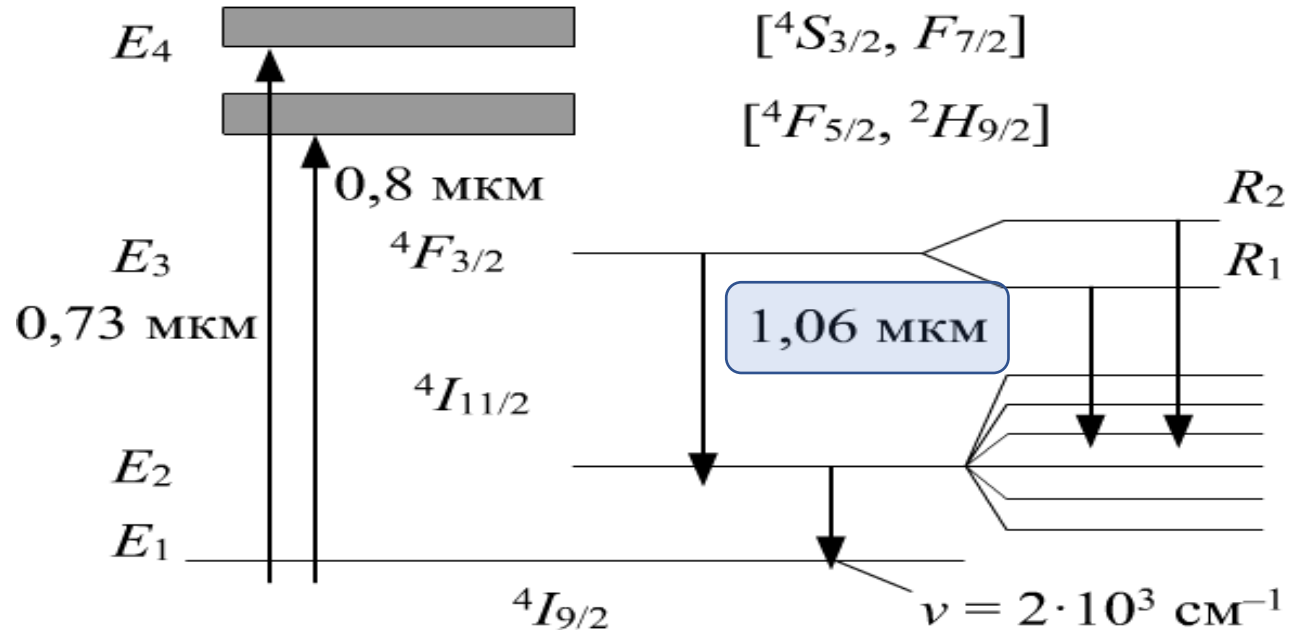
I.1 Наносекундные лазеры => модуляция добротности





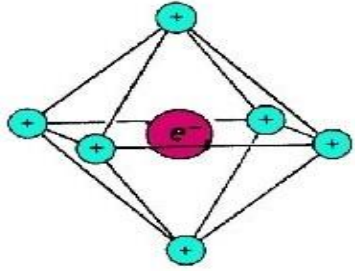
$t_0$  – время начала открытия затвора

# Импульсный YAG:Nd<sup>3+</sup> лазер

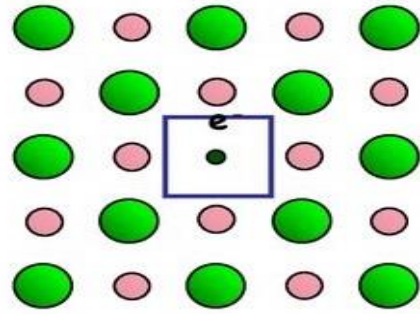


$\lambda=1.064 \text{ мкм}$   
 $P_{\text{пик}}=1 \text{ МВт}$   
 $\Delta T=10 \text{ нсек}$

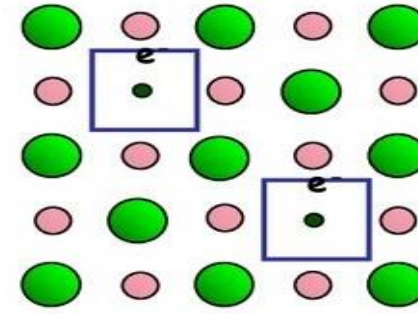
# Перестраиваемые импульсные лазеры на F-центрах



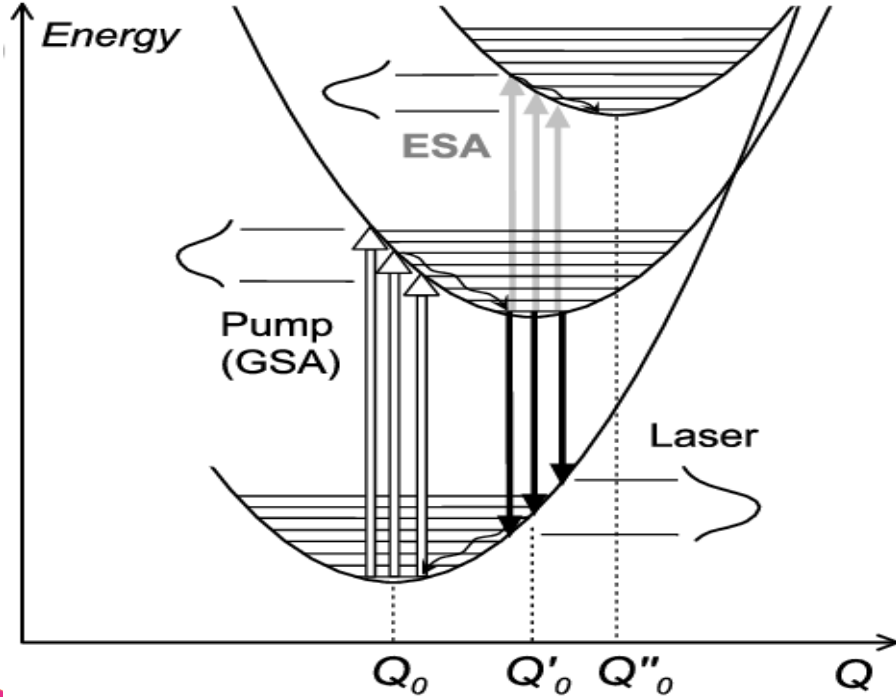
NaCl:F, KCl:F, LiF:F<sup>2-</sup>



F-center



M-center



$\lambda_1 = 1.064 \text{ мкм}$

$\lambda_2 = 1.08 - 1.22 \text{ мкм}$

YAG:Nd<sup>3+</sup>

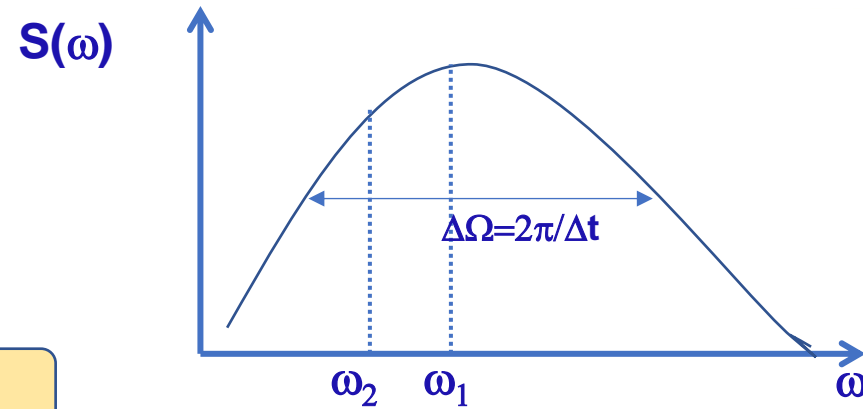
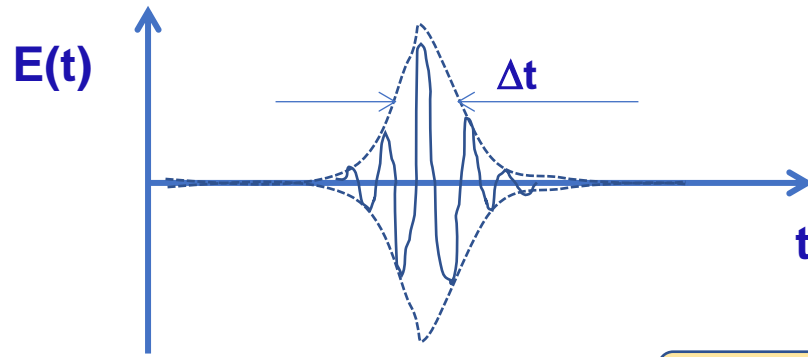
Схема Литмана

Фурье-неограниченные импульсы -> бигармоническая накачка!

$$\omega_1 - \omega_2 = \Omega_{\text{exit}}$$

## 1.2 Фемтосекундные лазеры => синхронизация мод

Фурье-ограниченные импульсы -> **одноимпульсная накачка!**



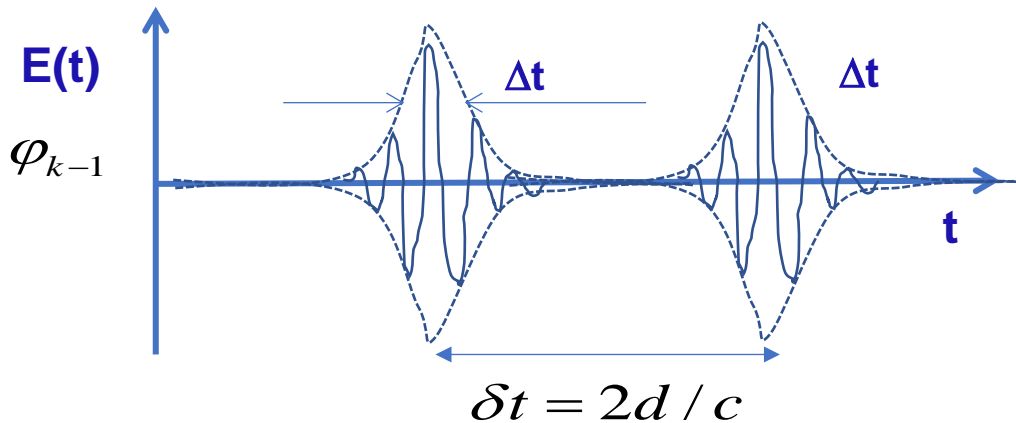
$$\omega_1 - \omega_2 = \Omega_{\text{exit}}$$

$$\delta\omega = 2\pi c / d, \quad N_{\text{mod}} = \Delta\Omega / \delta\omega$$

$$E = \sum_{l=-N}^N E_0 \exp[i(\omega_0 + l\delta\omega) + l\alpha] \cdot e^{i\omega t}, \quad \alpha = \varphi_k - \varphi_{k-1}$$

$$E = (2N + 1)^2 \frac{\sin c\left(\frac{\delta\omega t + \alpha}{2} (2N + 1)\right)}{\sin c\left(\frac{\delta\omega t + \alpha}{2}\right)} e^{i\omega t}$$

$$\Delta t = \frac{2\pi}{(2N + 1)\Delta\omega} = \frac{2\pi}{\Delta\Omega}$$



## Математическое описание импульса

*Спектрально – ограниченные импульсы  $\Delta t \Delta \omega = K$*

*Гауссов временной профиль*

$$E(t) = E_0 \exp\left[i\omega_0 t - \Gamma t^2 / 2\right] + \text{к.с.}, \quad \Gamma = 1 / \Delta t^2$$

$$E(\omega) = E_0 \exp\left(-\frac{(\omega - \omega_0)^2}{2\Gamma}\right)$$

$$\Delta t \Delta \omega = 0.441$$

---

*Гиперболический секанс, солитон*

$$E(t) = E_0 \operatorname{sech}^2(t / \Delta t) \exp[i\omega_0 t] + \text{к.с.}$$

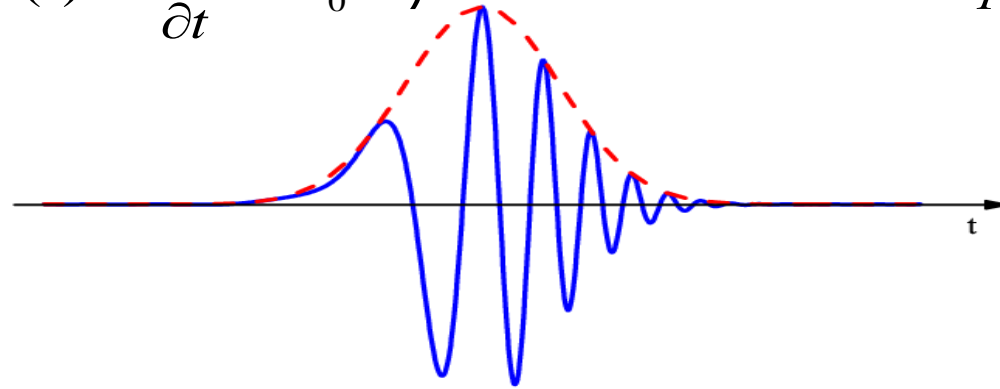
$$\Delta t \Delta \omega = 0.315$$

## Частота не обязательно постоянна! => chirпированные импульсы

$$E(t) = E_0 \exp\left[-\Gamma t^2 / 2 + i(\omega_0 t + \beta t^2 / 2)\right] + \text{к.с.},$$

$$\Phi = \omega_0 t + \beta t^2 / 2$$

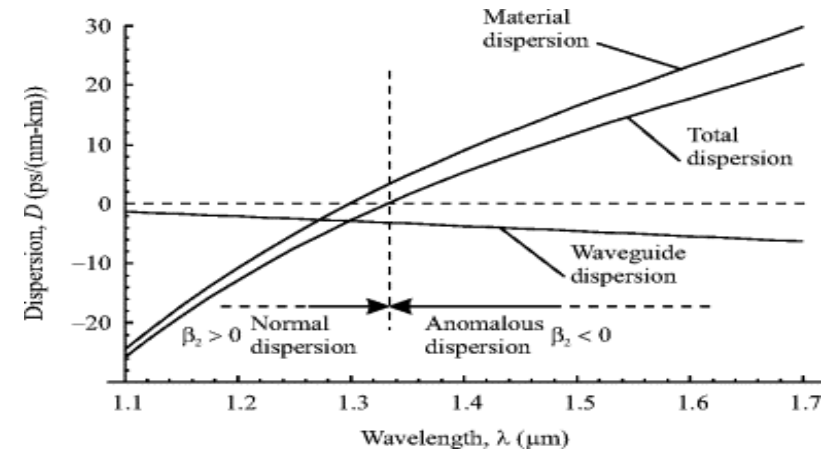
$$\tilde{\omega}(t) = \frac{\partial \Phi}{\partial t} = \omega_0 + \beta t \Rightarrow \text{возможна компрессия!}$$



## Дисперсия среды и ее роль в распространении импульса

$$k(\omega) = \frac{\omega}{c} n(\omega) = k_0 + \omega \left. \frac{\partial k}{\partial \omega} \right|_{\omega_0} + \frac{1}{2} \omega^2 \left. \frac{\partial^2 k}{\partial \omega^2} \right|_{\omega_0} + \dots$$

$$V_{gp} = \frac{V_\phi}{1 + \frac{\omega}{n} \frac{\partial n}{\partial \omega}}, \quad \text{ДГС} = \frac{\partial^2 n}{\partial \omega^2} = \frac{\partial (1/V_{gp})}{\partial \omega}$$

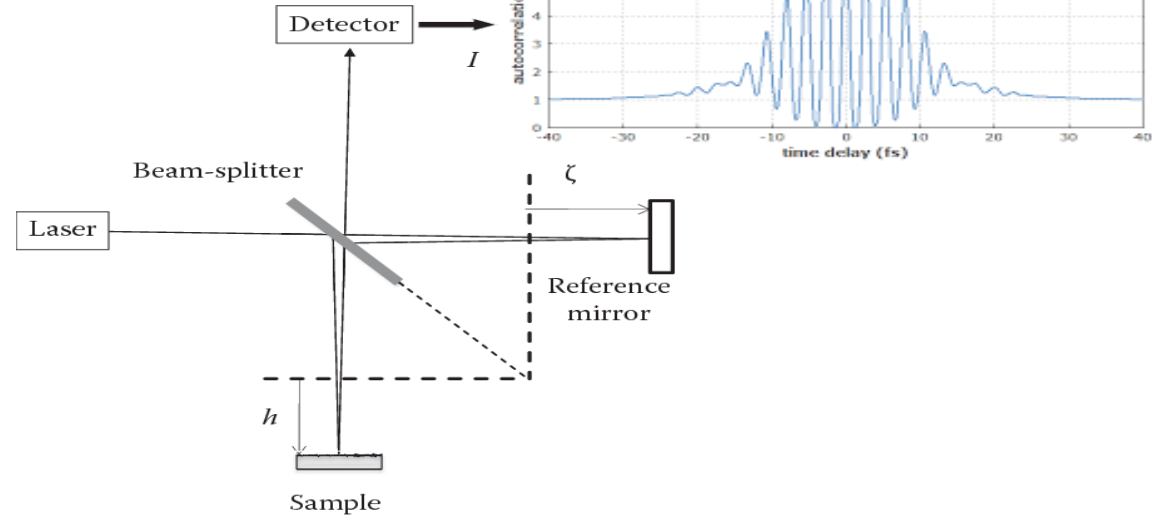


# Измерение длительности импульсов. Корреляционные методы

## 1. Корр. ф-ция 1го порядка

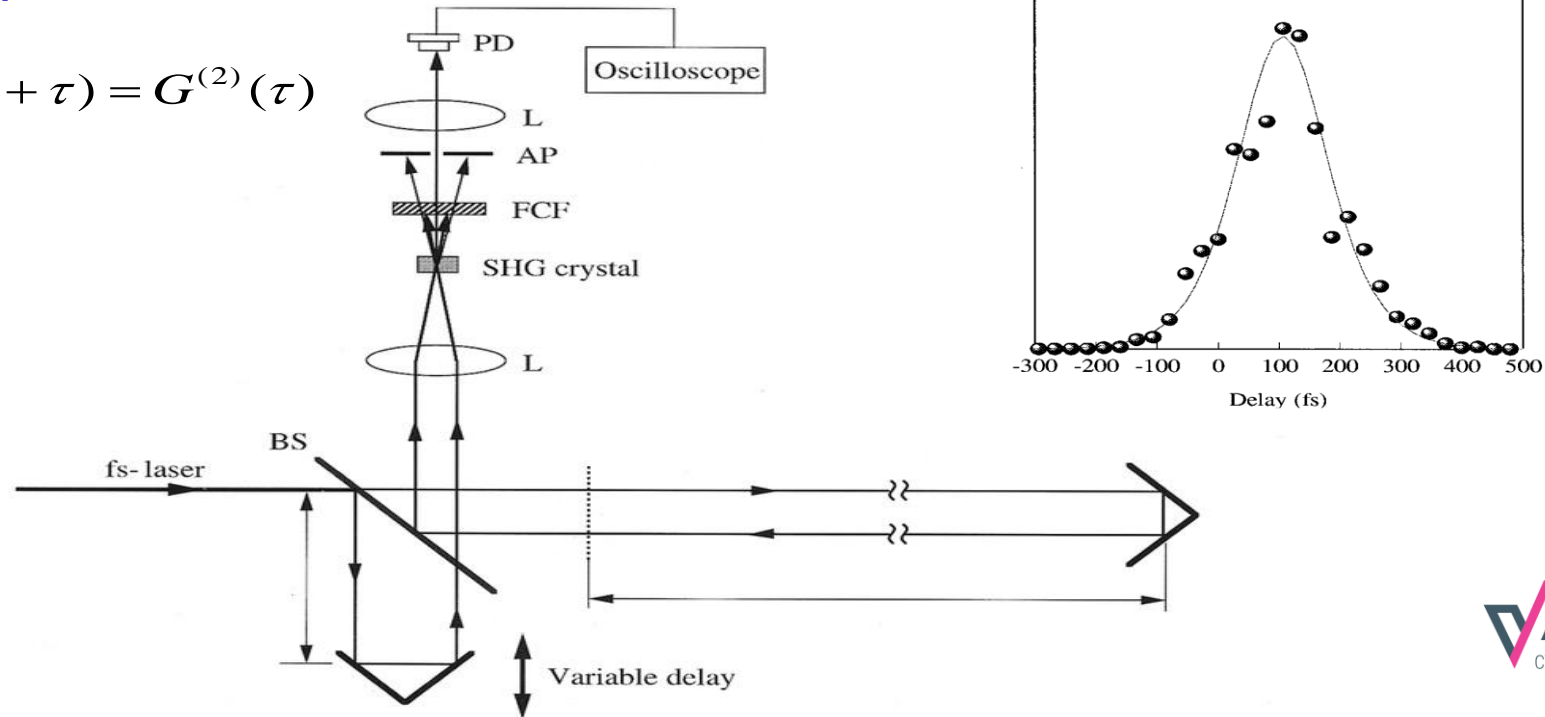
$$G^{(1)}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} E_{Las}(t) E_{Las}(t + \tau) dt$$

$$I(\tau) = |E_{Las}(t) + E_{Las}(t + \tau)|^2$$



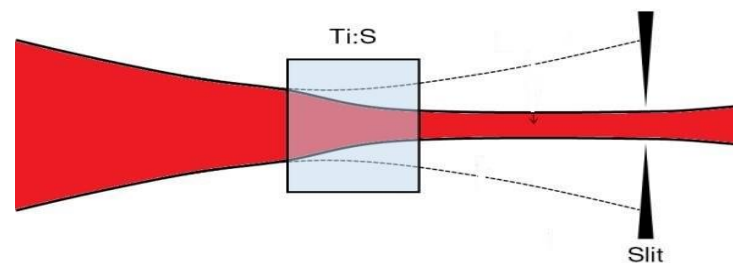
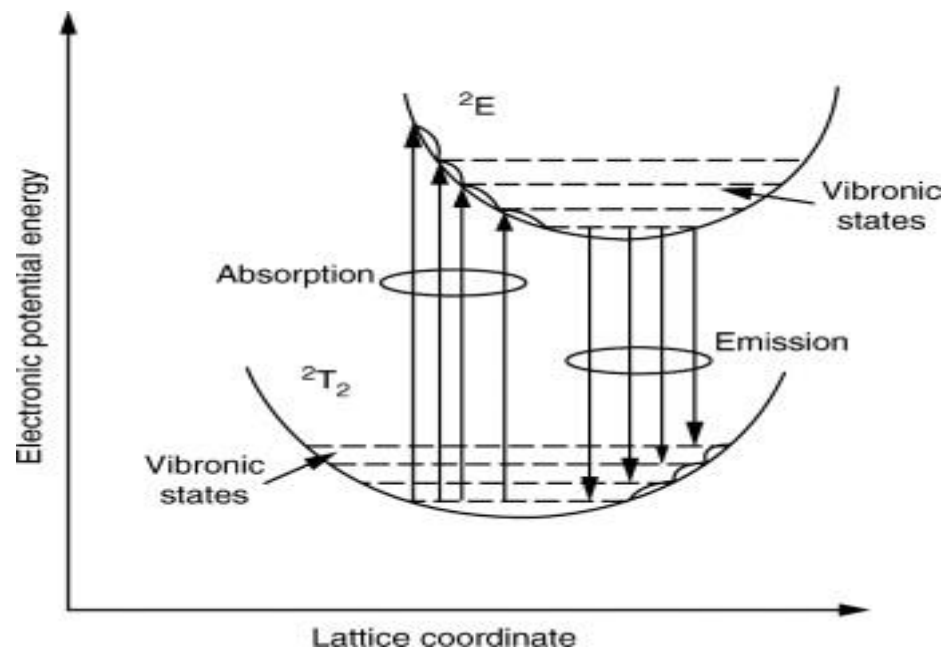
## 2. Корр. ф-ция 2го порядка

$$I_{SHG}(\tau) \propto \int I_{Las}(t) I_{Las}(t + \tau) = G^{(2)}(\tau)$$



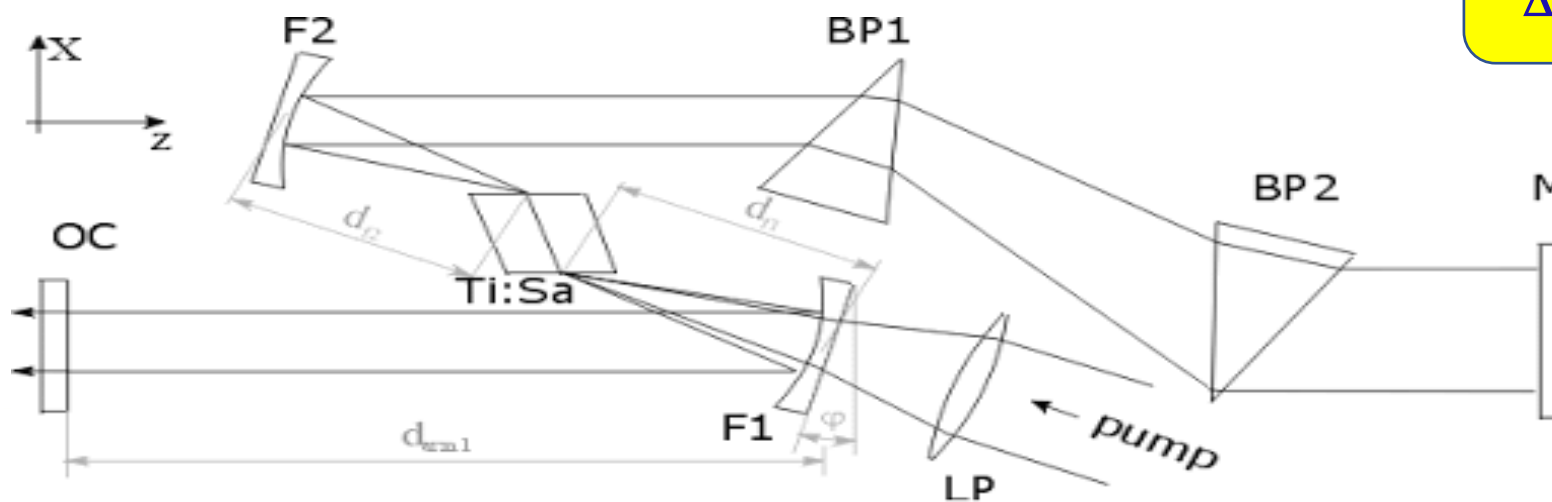


# Титан-сапфировый лазер (Ti<sup>3+</sup>:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)



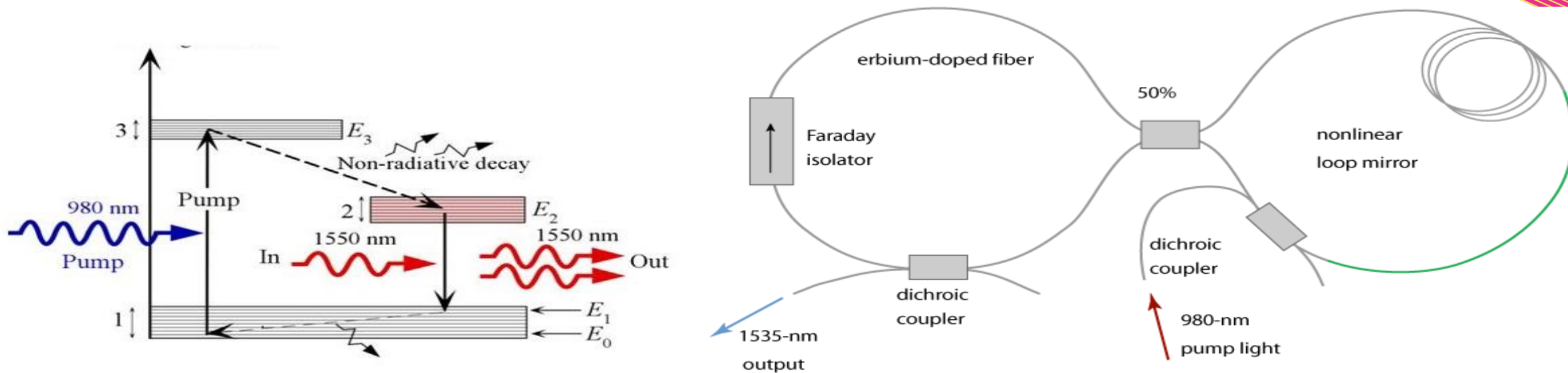
Керровская линза

$\lambda=0.78$  мкм  
 $\Delta T=100$  фсек



Z-конфигурация резонатора

# Волоконные лазеры (Er<sup>3+</sup> - fiber)



$$\varphi \propto \frac{2\pi}{\lambda} n_2 I(t) L$$

**Нелинейный поворот  
поляризации**

## II. Усиление У.К.И.

### Принцип построения М.О.Р.А. = Master Oscillator Powerful Amplifier

#### Требования к усиливающей среде:

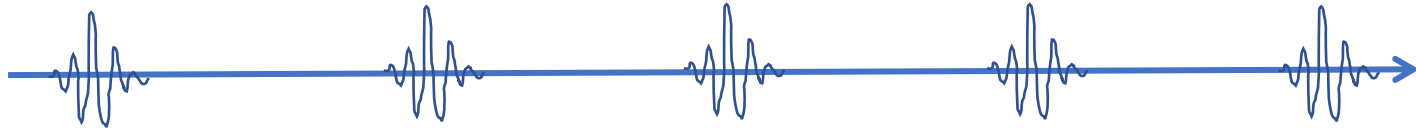
1. АС должна обладать широкой полосой усиления
2. Созрание длительности импульса
3. Отсутствие ограничивающего импульсы действия нелинейных эффектов
4. Частота следования импульсов и энергия связаны:  
 $f=1 \text{ МГц} \Rightarrow E=1 \text{ мкДж}$   
 $f=0.1 \text{ Гц} \Rightarrow E=10 \text{ Дж}$

#### Усилители УКИ

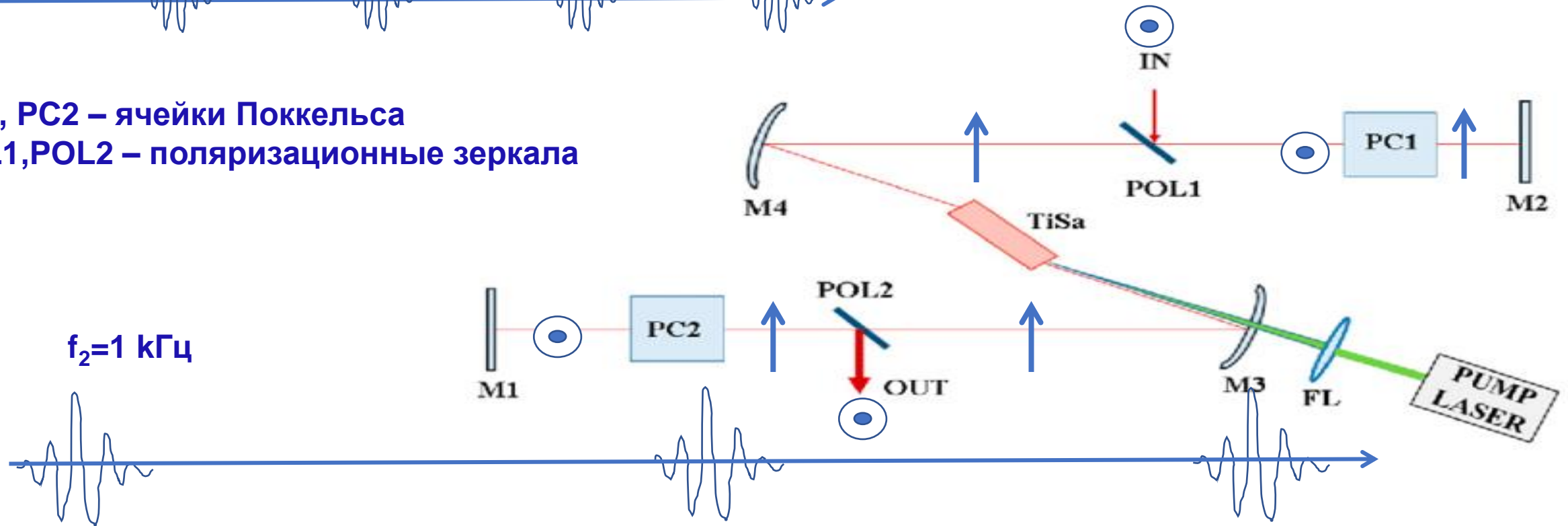
1. Регенеративный усилитель
2. Многопроходный усилитель
3. Параметрический усилитель
4. Усилитель чирпированных импульсов

# Регенеративный усилитель

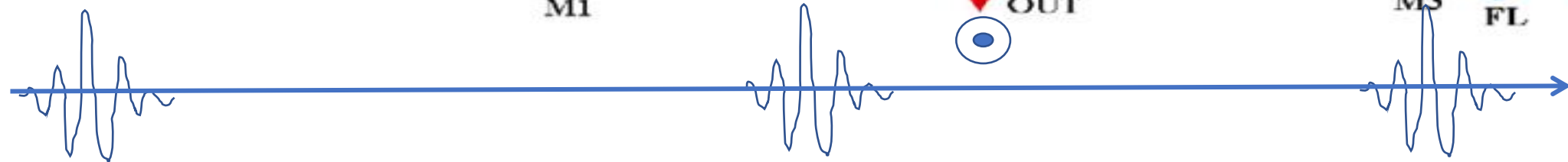
$f_1 = 100$  МГц



PC1, PC2 – ячейки Поккельса  
POL1, POL2 – поляризационные зеркала



$f_2 = 1$  кГц



1. Подаем лазерные импульсы на POL1
2. Подаем импульс «полуволнового» напряжения на PC1 =>
3. Лазерные импульсы усиливаются в резонаторе
4. После 10-20 проходов подаем импульс «полуволнового» напряжения на PC2 =>
5. Мощный импульс выходит через поляризатор PC2

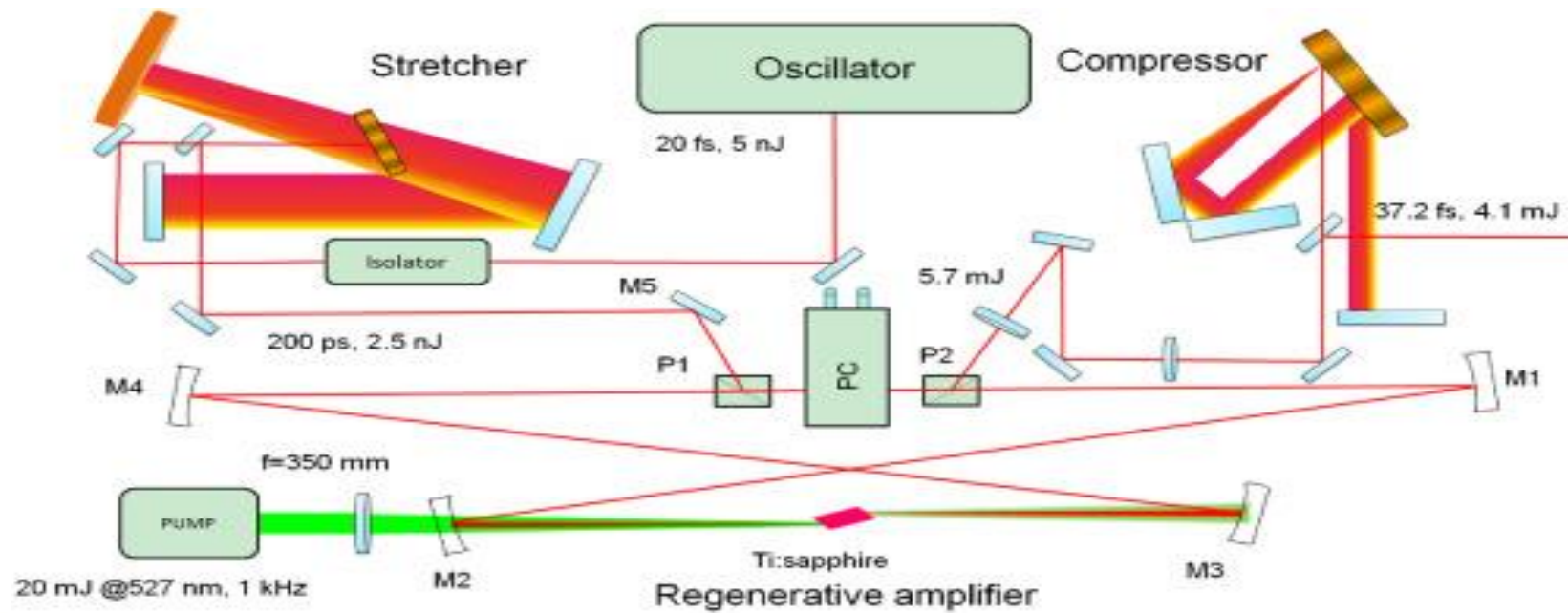
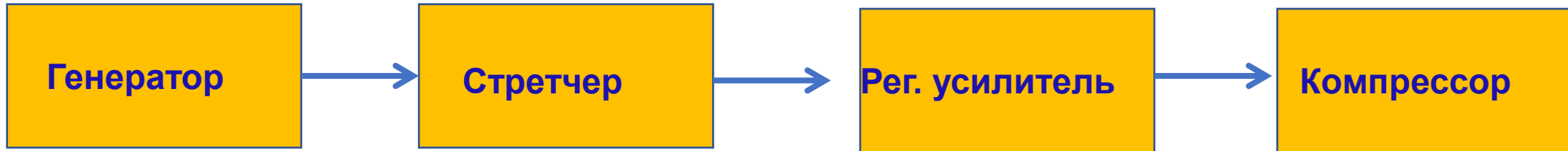
## Реальные лазерные системы еще сложнее!

$$\Delta t_1 = 100 \text{ фсек}$$

$$\Delta t_2 = 60 \text{ псек}$$

$$K \propto 10^5 - 10^6$$

$$\Delta t_3 = 10 \text{ фсек}$$



## Многопроходный усилитель



$R_1 < R_2$ , диаметр пучка уменьшается с каждым проходом!  
(поэтому растет ширина перетяжки)

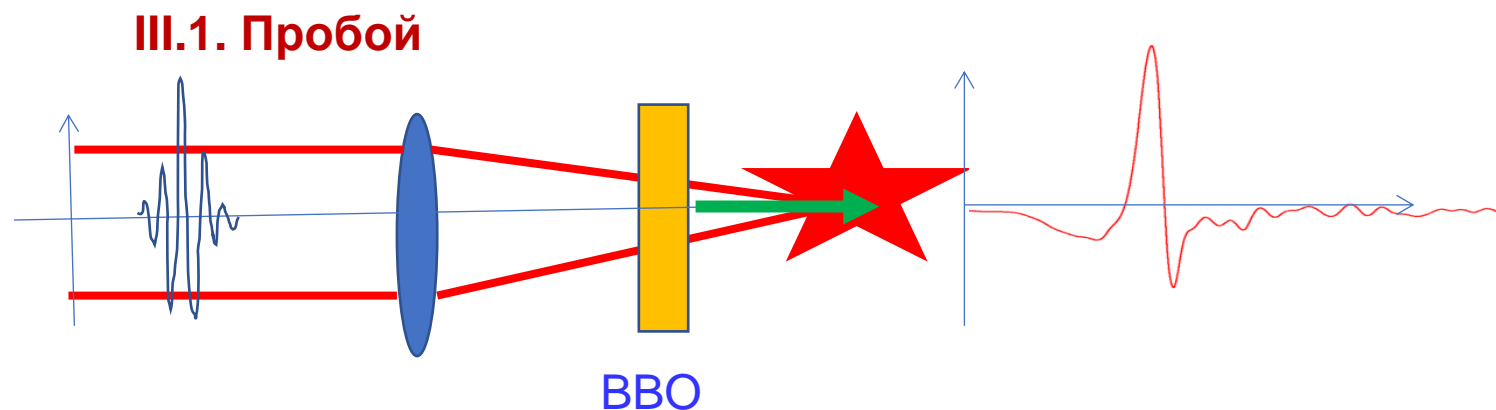
$N_{\text{проходов}} = 4-8$

$E = 50 \text{ мкДж}$



### III. Генерация импульсного терагерцового излучения

1. Пробой атмосферного воздуха
2. Оптическое выпрямление
3. Фотопроводящие антенны

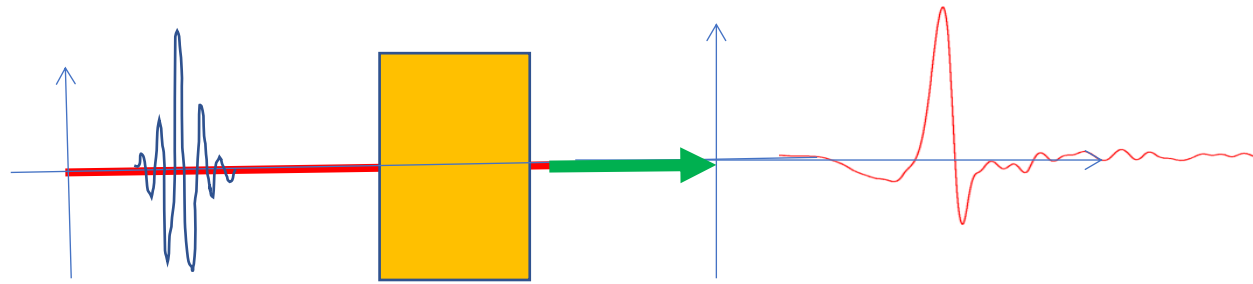


$$E(\Omega_{THz}) \propto P(\Omega_{THz}) = \chi^{(3)}(\Omega_{THz}) E(2\omega + \Omega_{THz}) E^*(\omega) E^*(\omega)$$

$$\Omega_{THz} = 2\omega + \Omega_{THz} - \omega - \omega$$

$$E \propto 100 \text{ кВ} / \text{см}!!!$$

## III.2. Оптическое выпрямление



$$P^{(2)}(t) = \chi^{(2)}(t) : E(t)E^*(t)$$

*пренебрегая запаздыванием и нелокальностью отклика*

$$E(t) = \int_0^{\infty} E(\omega)e^{-i\omega t} + \text{к.с.}$$

$$P^{(2)}(t) = \chi^{(2)} \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} E(\omega_1)E^*(\omega_2)e^{-i(\omega_1-\omega_2)t} d\omega_1 d\omega_2 + \text{к.с.}$$

$$\text{В дальней зоне } E_{\text{THz}}(t) \propto \frac{\partial^2 P^{(2)}(t)}{\partial t^2}$$

*Условия синхронизма*

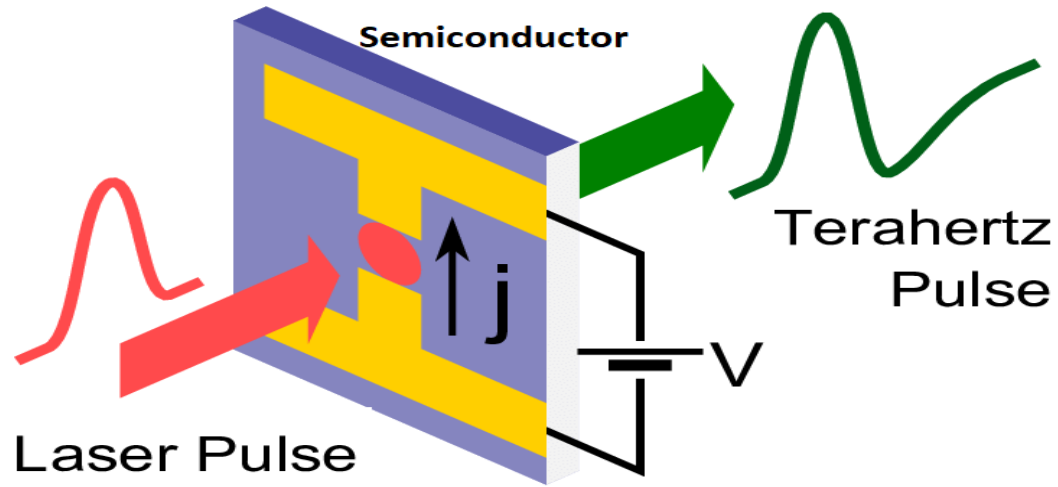
$$\omega_1 - \omega_2 = \Omega_{\text{THz}}$$

$$k_1 - k_2 = k_{\text{THz}}$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial k} = \frac{\Omega_{\text{THz}}}{k_{\text{THz}}} \Rightarrow V_{\text{opt}}^{\text{group}} = V_{\text{THz}}^{\text{phase}}$$



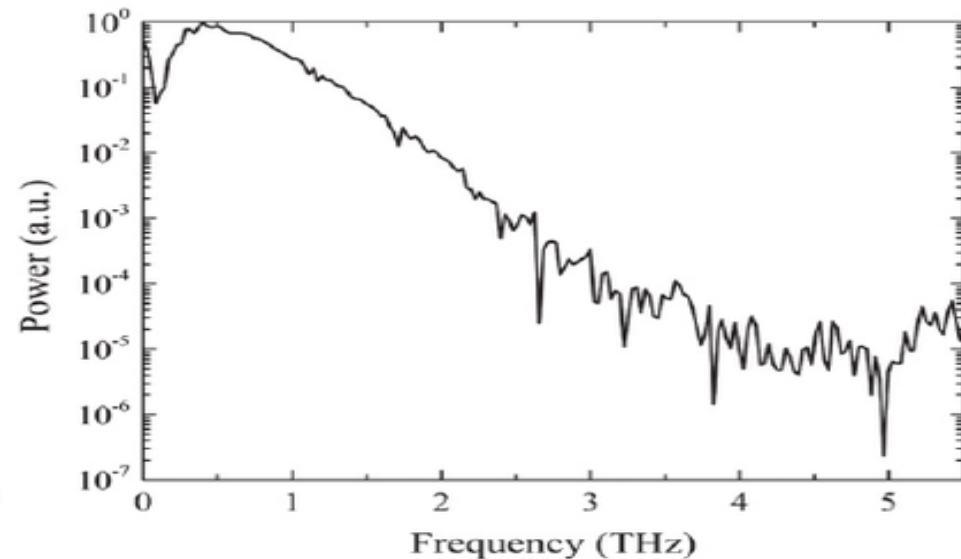
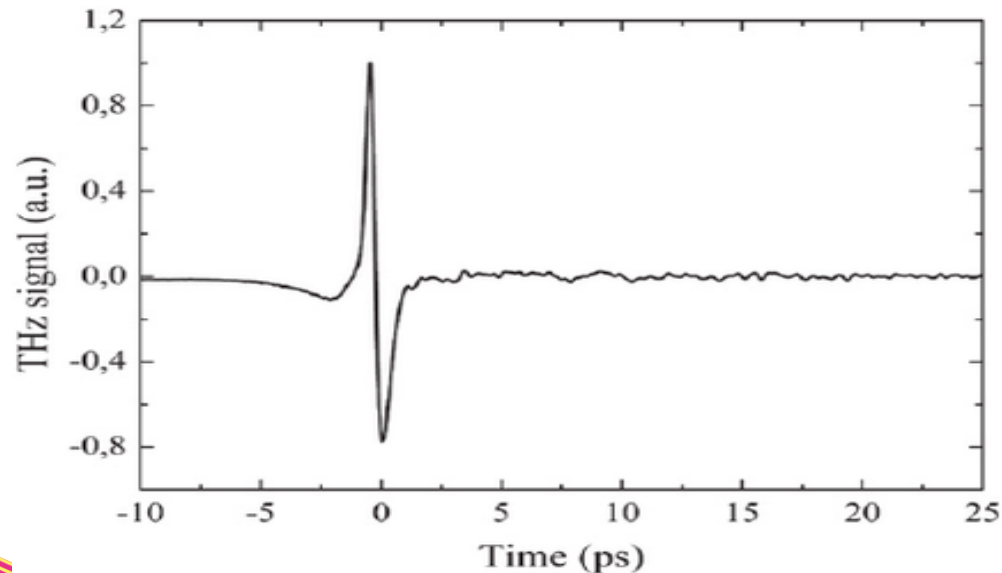
### III.3. Фотопроводящие антенны. Генерация.



$$J(t) = N(t)eV = N(t)e\mu E_b, \quad E_b = U / d$$

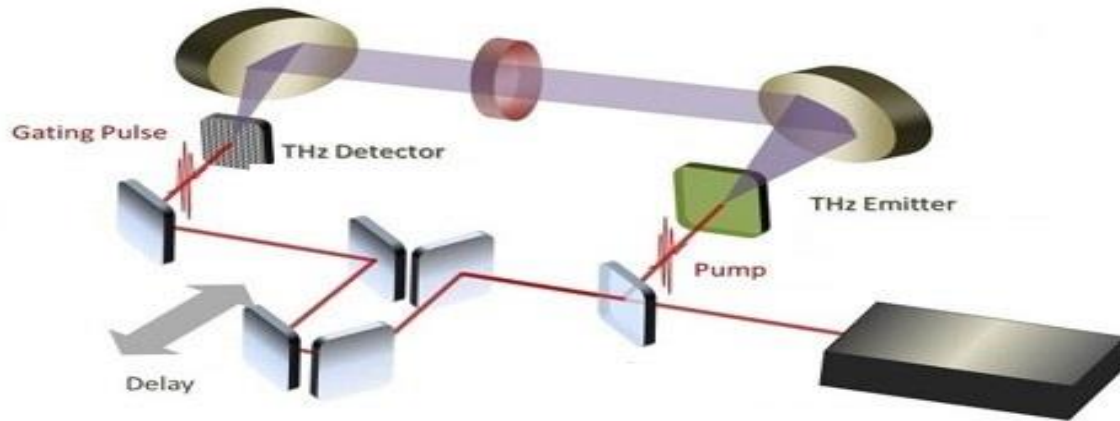
$$E_{THz}(t) \propto \frac{\partial^2 P^{(2)}}{\partial t^2} = \frac{\partial J}{\partial t} = e\mu E_b \frac{\partial N(t)}{\partial t}$$

$$\frac{dN(t)}{dt} = G(t) - \frac{N(t)}{\tau}$$



### III.3. Фотопроводящие антенны. Детектирование.

Точно так же... Триггером служит оптический импульс. Роль внешнего электростатического поля играет ТГц поле в зазоре! Детектируется фототок.

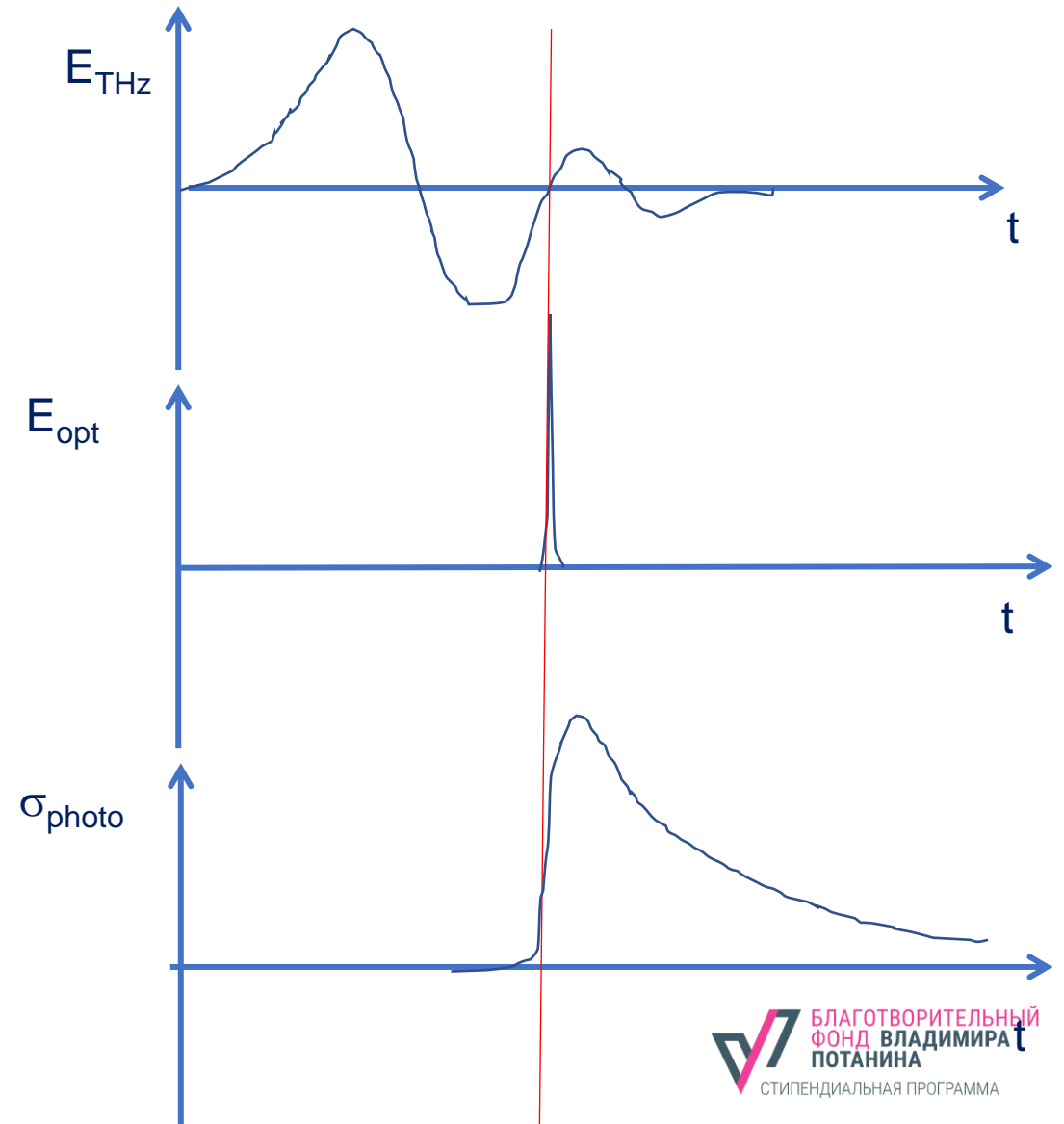


$$J(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \sigma(t-t') E_{THz}(t') dt'$$

*Теорема о свертке!*

$$J(\omega) = \sigma(\omega) E_{THz}(\omega)$$

*=> полоса детектирования  
ограничена фотопроводимостью  
(подвижностью)*



**Спасибо за внимание!**