

## Динамика ППЛ

---

---

---

---

---

---

---

---

## Задержка включения ППЛ

---

---

---

---

---

---

---

---

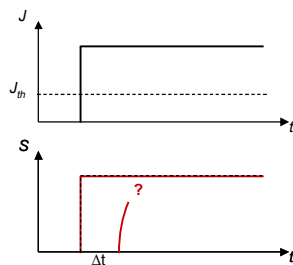
### Задержка включения

$$\begin{cases} \frac{dS}{dt} = \Gamma A(n - n_r) S + \Gamma \beta \frac{n}{\tau_s} \frac{S}{\tau_p} \\ \frac{dn}{dt} = \frac{J}{ed} - \frac{n}{\tau_s} - A(n - n_r) S \end{cases}$$

$$n(t) = \frac{J \tau_s}{ed} \left( 1 - e^{-t/\tau_s} \right)$$

$$n(\Delta t) = n_{th}$$

$$\Delta t = \tau_s \ln \left( \frac{J}{J - J_{th}} \right) \approx \tau_s \frac{J_{th}}{J}$$




---

---

---

---

---

---

---

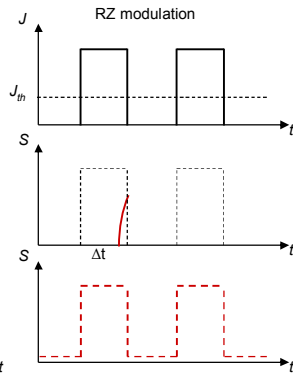
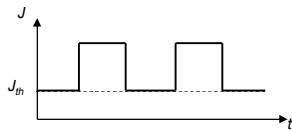
---

## Задержка включения

$$\Delta t = \tau_s \ln\left(\frac{J}{J - J_{th}}\right) \approx \tau_s \frac{J_{th}}{J}$$

If  $J = 2J_{th}$ ,  $\tau_s = 1$  ns:  $\Delta t = 0.7$  ns

Non-return-to-zero (NRZ) modulation




---

---

---

---

---

---

---

---

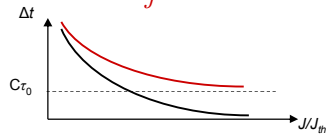
## Задержка включения лазеров на основе квантовых точек

Non-QD laser diode:

$$\Delta t = \tau_s \ln\left(\frac{J}{J - J_{th}}\right) \approx \tau_s \frac{J_{th}}{J}$$

QD LD:

$$\Delta t \approx \tau_s \frac{J_{th}}{J} + C\tau_p$$




---

---

---

---

---

---

---

---

## Амплитудно-частотная характеристика ППЛ

---

---

---

---

---

---

---

---

### Малосигнальный анализ скоростных уравнений

$$\begin{aligned} \frac{dn}{dt} &= \frac{J}{ed} - \frac{n}{\tau_s} - \frac{c}{N_{eff}} g(n) S & J(t) &= J_0 + \delta J(t), \quad J_0 \gg \delta J(t) \\ \frac{dS}{dt} &= \Gamma \frac{c}{N_{eff}} g(n) S - \frac{S}{\tau_p} + \Gamma \beta \frac{n}{\tau_s} & S(t) &= S_0 + \delta S(t), \quad S_0 \gg \delta S(t) \\ \delta \dot{n} &= \frac{\delta J}{ed} - \frac{\delta n}{\tau_s} - \frac{c}{N_{eff}} (g_0 \delta S + g' S_0 \delta n) & n(t) &= n_0 + \delta n(t), \quad n_0 \gg \delta n(t) \\ \delta \dot{S} &= \Gamma \frac{c}{N_{eff}} (g_0 \delta S + g' S_0 \delta n) - \frac{\delta S}{\tau_p} + \Gamma \beta \frac{\delta n}{\tau_s} \end{aligned}$$

$$\begin{cases} \Gamma \frac{c}{N_{eff}} g(n) S + \Gamma \beta \frac{n}{\tau_s} - \frac{S}{\tau_p} = 0 \\ \frac{J}{ed} - \frac{n}{\tau_s} - \frac{c}{N_{eff}} g(n) S = 0 \end{cases}$$

---

---

---

---

---

---

---

---

### Малосигнальный анализ скоростных уравнений

$$\begin{aligned} \delta \dot{n} &= \frac{\delta J}{ed} - \frac{\delta n}{\tau_s} - \frac{c}{N_{eff}} (g_0 \delta S + g' S_0 \delta n) & \delta J(t) &= j \exp(i\omega t) \\ \delta \dot{S} &= \Gamma \frac{c}{N_{eff}} (g_0 \delta S + g' S_0 \delta n) - \frac{\delta S}{\tau_p} + \Gamma \beta \frac{\delta n}{\tau_s} & \delta n(t) &= a(\omega) \exp(i\omega t) \\ & & \delta S(t) &= b(\omega) \exp(i\omega t) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \left( i\omega + \frac{1}{\tau_s} + \frac{c}{N_{eff}} g' S_0 \right) a + \frac{c}{N_{eff}} g_0 b &= \frac{j}{ed} \\ - \left( \Gamma \frac{c}{N_{eff}} g' S_0 + \Gamma \frac{\beta}{\tau_s} \right) a + \left( i\omega + \frac{1}{\tau_p} - \Gamma \frac{c}{N_{eff}} g_0 \right) b &= 0 \end{aligned}$$

$$\gamma = \frac{1}{\tau_s} + A S_0, \quad A \equiv \frac{c}{N_{eff}} g', \quad \Delta = \frac{1}{\tau_p} - \Gamma \frac{c}{N_{eff}} g_0, \quad \omega_0^2 = \frac{A S_0}{\tau_p}$$

---

---

---

---

---

---

---

---

### Частотный ответ фотонов

$$\begin{aligned} \left( i\omega + \frac{1}{\tau_s} + \frac{c}{N_{eff}} g' S_0 \right) a + \frac{c}{N_{eff}} g_0 b &= \frac{j}{ed} \\ - \left( \Gamma \frac{c}{N_{eff}} g' S_0 + \Gamma \frac{\beta}{\tau_s} \right) a + \left( i\omega + \frac{1}{\tau_p} - \Gamma \frac{c}{N_{eff}} g_0 \right) b &= 0 \end{aligned}$$

$$b(\omega) \approx \frac{\Gamma j \tau_p}{ed} \frac{\omega_0^2}{\omega_0^2 - \omega^2 + \gamma i \omega} = \frac{j}{ed} B(\omega) \exp(i\phi_B(\omega))$$

$$B(\omega) = \frac{\omega_0^2}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \gamma^2 \omega^2}}, \quad \phi_B(\omega) = \arctg\left(-\frac{\gamma \omega}{\omega_0^2 - \omega^2}\right)$$

$$\gamma = \frac{1}{\tau_s} + A S_0, \quad A \equiv \frac{c}{N_{eff}} g', \quad \Delta = \frac{1}{\tau_p} - \Gamma \frac{c}{N_{eff}} g_0, \quad \omega_0^2 = \frac{A S_0}{\tau_p}$$

---

---

---

---

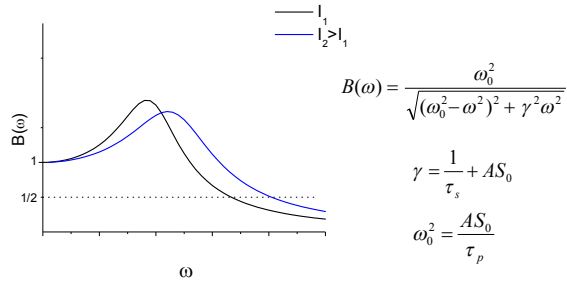
---

---

---

---

### АЧХ фотонов




---

---

---

---

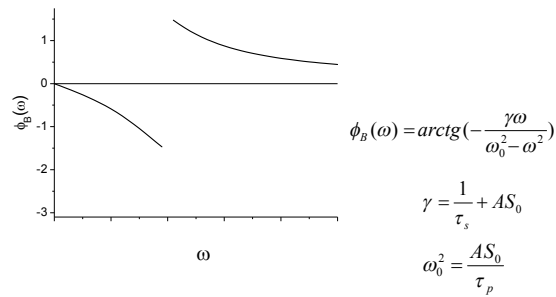
---

---

---

---

### ФЧХ фотонов




---

---

---

---

---

---

---

---

### Частотный ответ носителей заряда

$$\left(i\omega + \frac{1}{\tau_s} + \frac{c}{N_{\text{eff}}} g' S_0\right) a + \frac{c}{N_{\text{eff}}} g_0 b = \frac{j}{ed}$$

$$-\left(\Gamma \frac{c}{N_{\text{eff}}} g' S_0 + \Gamma \frac{\beta}{\tau_s}\right) a + \left(i\omega + \frac{1}{\tau_p} - \Gamma \frac{c}{N_{\text{eff}}} g_0\right) b = 0$$

$$a(\omega) \approx \frac{j}{ed} \frac{-i\omega}{\omega_0^2 - \omega^2 + \gamma i\omega} = \frac{j}{ed} A(\omega) \exp(i\phi_A(\omega))$$

$$A(\omega) = \frac{\omega}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \gamma^2 \omega^2}} \quad \phi_A(\omega) = \text{arctg}\left(-\frac{\gamma\omega}{\omega_0^2 - \omega^2}\right) - \frac{\pi}{2}$$

---

---

---

---

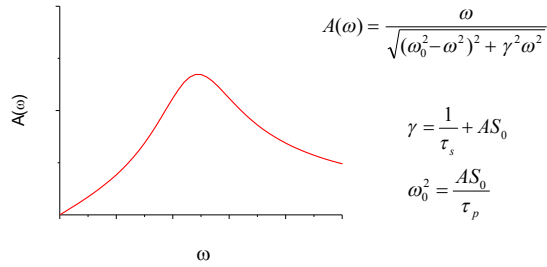
---

---

---

---

### АЧХ носителей заряда




---

---

---

---

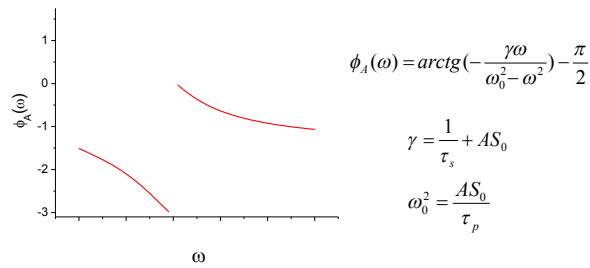
---

---

---

---

### ФЧХ носителей заряда




---

---

---

---

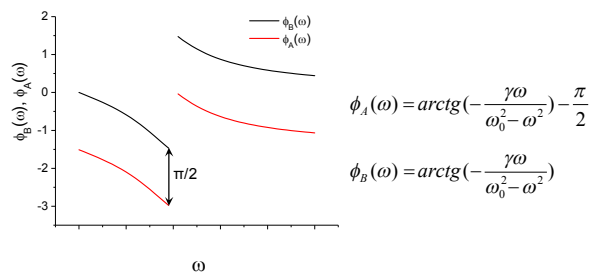
---

---

---

---

### ФЧХ фотонов и носителей заряда



Из наличия сдвига  $\pi/2$  следует возможность перекачки энергии между фотонами и носителями заряда, т.е. наличие релаксационных колебаний при включении лазера. Аналогии: «звон» электрических цепей и колебания маятника (ср. энергию фотонов и носителей с кинетической и потенциальной энергией).

---

---

---

---

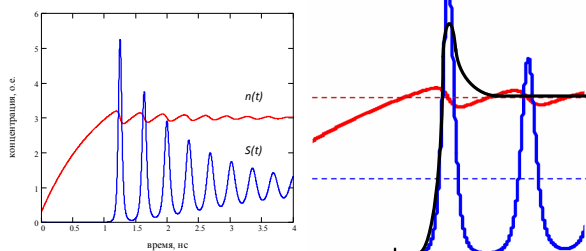
---

---

---

---

## Релаксационные колебания



В лазерах на основе квантовых точек нет релаксационных колебаний!

Типичные объяснения: 1) они слишком быстрые © 2) они слишком медленные

©

---

---

---

---

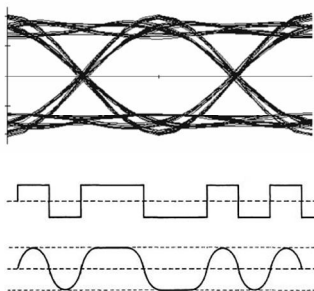
---

---

---

---

## Глаз-диаграмма (eye diagram)



---

---

---

---

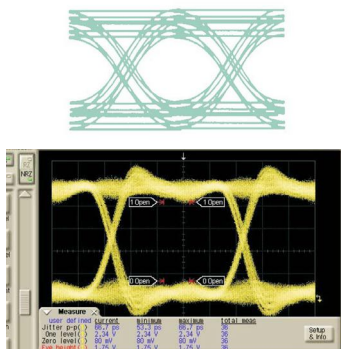
---

---

---

---

## Глаз-диаграмма (eye diagram)



---

---

---

---

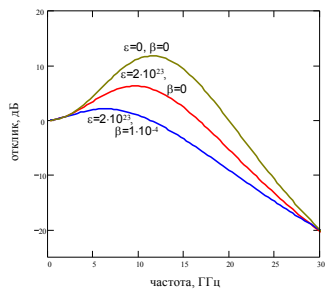
---

---

---

---

## Насыщение усиления (gain clamping)



$$\omega_p \approx \sqrt{\frac{AS_0}{\tau_p} (1 - \epsilon S_0)}$$

$$\omega_p^{\max} \approx \sqrt{\frac{A}{4\epsilon\tau_p}}$$

---

---

---

---

---

---

---

---

## Что необходимо запомнить о динамике ППЛ:

- Принцип NRZ обеспечивает мульти-ГГц частоты прямой модуляции
- Лазеры на основе квантовых точек имеют неисчезающую задержку включения
- Предельная частота модуляции может быть увеличена за счет повышения накачки
- НО: При повышении накачки необходимо учитывать насыщение усиления
- Насыщение усиления выше в лазерах на основе квантовых точек

---

---

---

---

---

---

---

---