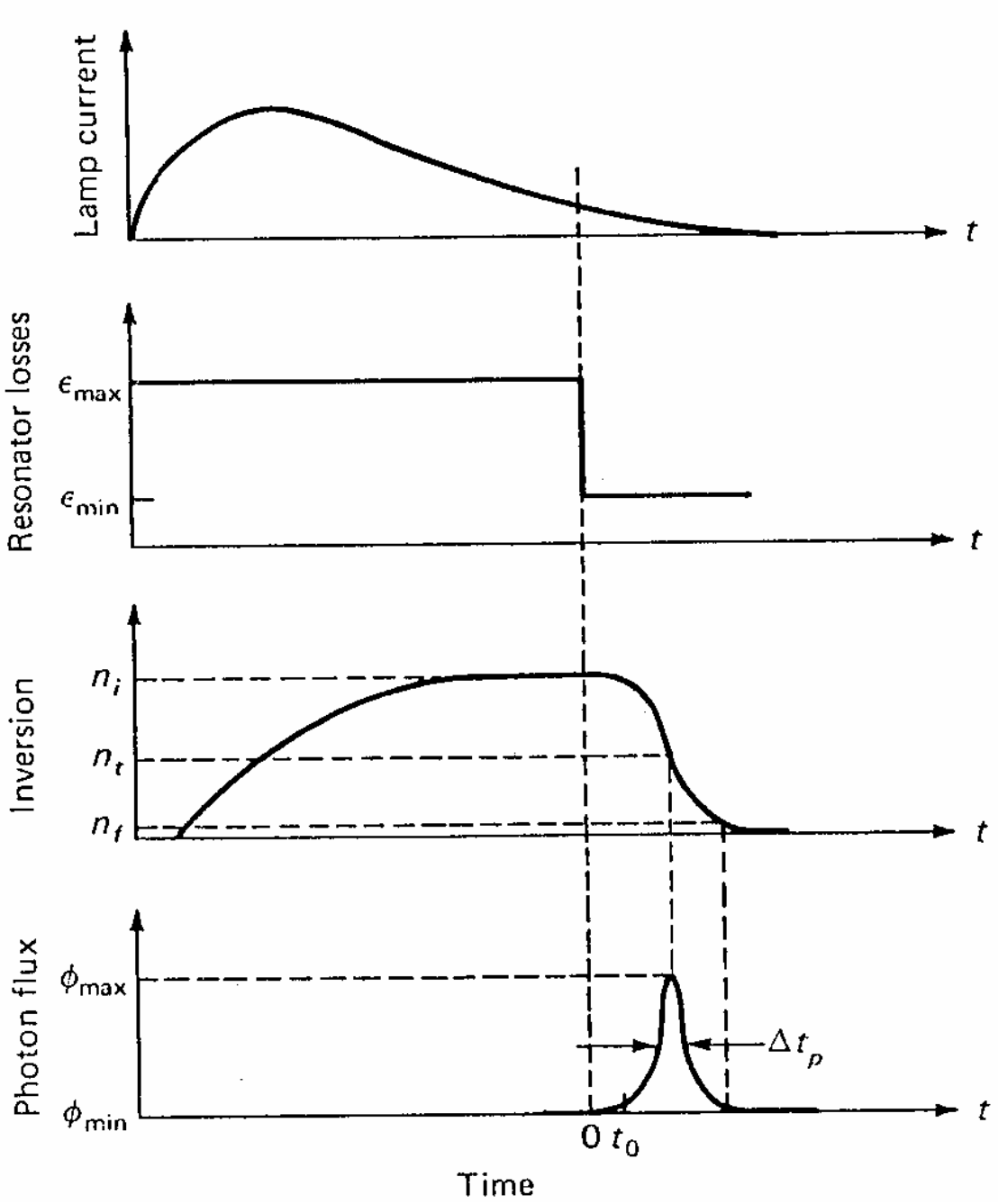
Generace impulsů Q-spínáním

- modulace faktoru kvality laserového rezonátoru (zpravidla modulací ztrát rezonátoru)
- opakovací frekvence pulsů je dána opakovací frekvencí modulace
- energie uskladněná v aktivním prostředí se vyzáří během krátkého okamžiku



Q-spínání: matematický popis

Čtyřhladinový model:

$$\dot{N} = w_p (N_{tot} - N) - c\sigma\Phi N - N/\tau$$
$$\dot{\Phi} = c\sigma N\Phi - \Phi/\tau_R(t,\Phi) + S$$

$$\tau_R(t) = 1/c\gamma(t,\Phi); \quad \gamma(t,\Phi) = \alpha(t,\Phi) - \frac{\ln R}{2L}$$

$\Rightarrow$ řeší se numericky

Přibližný popis

- změna ztrát je velmi rychlá oproti $\tau, w_p \Rightarrow \Phi = \Phi(N)$ (pole sleduje změny inverze, spontánní emisi a čerpání lze během vyzařování pulsu zanedbat)
- počáteční inverze: $N_{thr} < N_i << N_{tot}$

V nepřítomnosti pole (ztráty jsou vysoké):

$$N_i = w_p N_{tot} \frac{1}{f_{rep}} \left(1 - \frac{1}{2 f_{rep}}\right) - \frac{1}{2 f_{rep} \tau} \approx w_p \frac{N_{tot}}{f_{rep}}$$

Inverze roste přibližně lineárně, užitečné je velké τ a N_{tot}.

Po skokovém snížení γ:

$$\dot{N} = -c\sigma\Phi N$$
$$\dot{\Phi} = c\sigma N\Phi - \Phi/\tau_R$$

$$\frac{d\Phi}{dN} = \frac{\partial\Phi}{\partial t}\frac{\partial t}{\partial N} = \frac{c\sigma\Phi N - \Phi/\tau_R}{-c\sigma\Phi N} = \frac{N_{thr}}{N} - 1$$
$$\Phi(N) = N_{thr}\left(\frac{N_i}{N_{thr}} - \frac{N}{N_{thr}} - \ln\frac{N_i}{N}\right) + \underbrace{\Phi_i}_{malé}$$

Konečná inverze (když Φ opět klesne na hodnotu spontánní emise):

$$e^{\frac{N_i - N_f}{N_{thr}}} = \frac{N_i}{N_f}$$

pro silné čerpání $N_i >> N_f \Rightarrow N_f \approx N_i e^{-N_i/N_{thr}}$

neboli při silném čerpání se energie uskladněná v aktivním prostředí lépe využije.

Q-spínání: hlavní charakteristiky impulsu

Špičková koncentrace fotonů v rezonátoru nastává pro $N = N_{thr}$:

$$\Phi_P = N_{thr}\left[\left(\frac{N_i}{N_{thr}} - 1\right) - \ln\frac{N_i}{N_{thr}}\right]$$

Špičkový výstupní výkon:

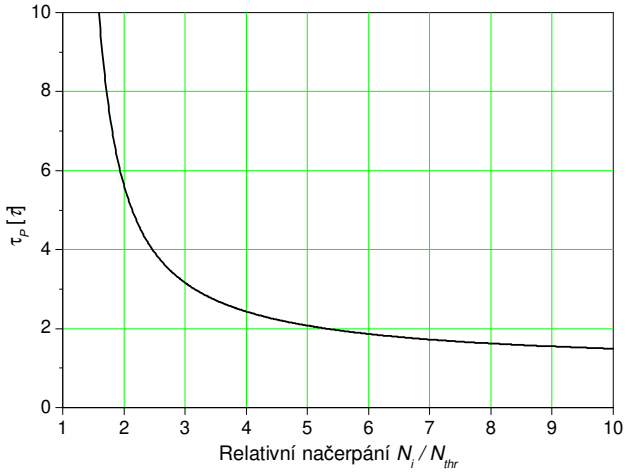
$$P_P = \hbar\omega V \Phi_P c \underbrace{\frac{-\ln R}{L_R}}_{\substack{\text{užitecné ztráty na} \\ \text{jednotku délky}}}$$

Energie v impulsu:

$$E_P = \hbar\omega \underbrace{V\left(N_i - N_f\right)}_{\substack{\text{pocet vyzá rených} \\ \text{fotonů}}} \underbrace{\frac{-\ln R/L_R}{\alpha - \ln R/L_R}}_{\text{celkové ztráty}}$$

Délka impulsu:

$$\tau_P = \frac{E_P}{P_P} = \frac{\frac{N_i}{N_{thr}}\left(1 - e^{-N_i/N_{thr}}\right)}{\left[\left(\frac{N_i}{N_{thr}} - 1\right) - \ln\frac{N_i}{N_{thr}}\right]}\tau_R$$



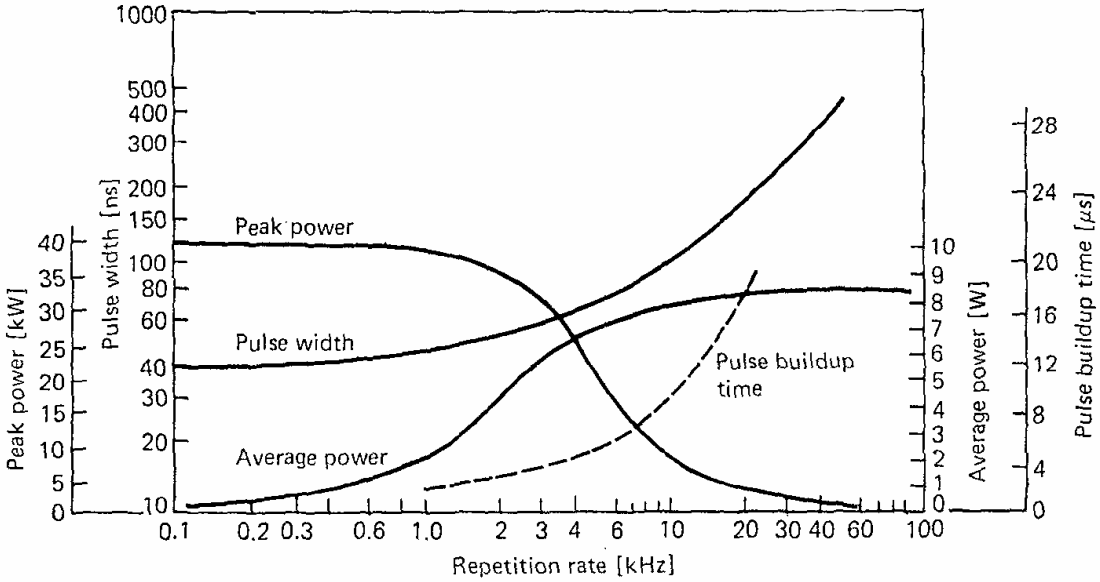
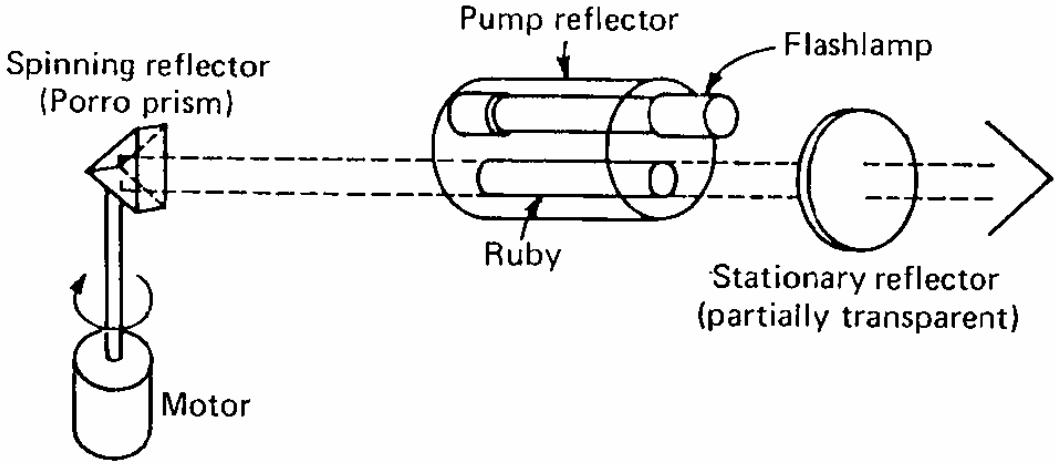


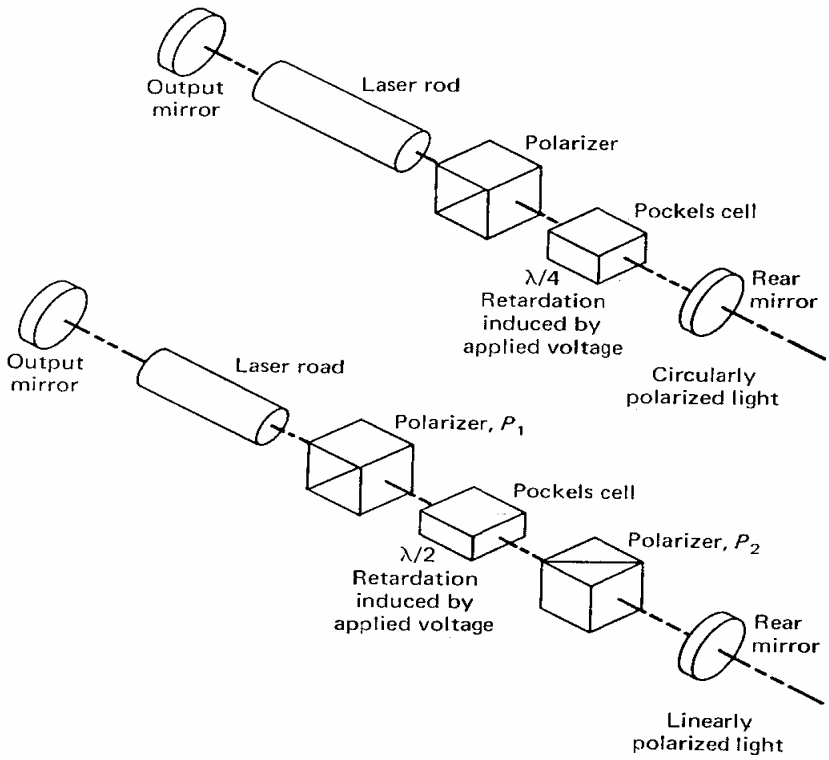
Fig. 8.8. Performance of a cw-pumped Nd : YAG laser system. The laser, containing a 7.5-cm by 0.5-cm rod doped with 0.8 % Nd, delivered 0.5 W at the TEM_{00} mode. Lamp input power was 5.5 kW. Plotted is the peak power, average power, pulse buildup time, and pulse width as a function of repetition rate

Q-spínání: techniky

- ***mechanické*** – rotující zrcadlo (používá se střechový hranol)
  - typicky desítky tisíc rpm
  - levné, jednoduché
  - velký šum, složitá údržba
  - dnes používané jen v IR oblasti (laser Er:sklo)

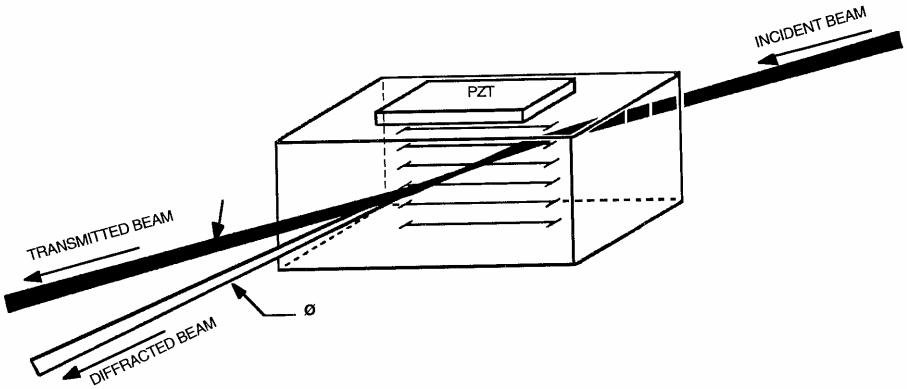


- ***elektrooptické*** (Pockelsův nebo Kerrův jev)
  - nejčastěji v $LiNbO_3$
  - relativně velké ztráty
  - vysoké spínací rychlosti
  - problém s opakovaným spínáním kV napětí

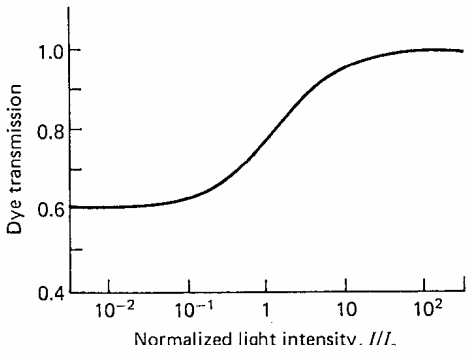


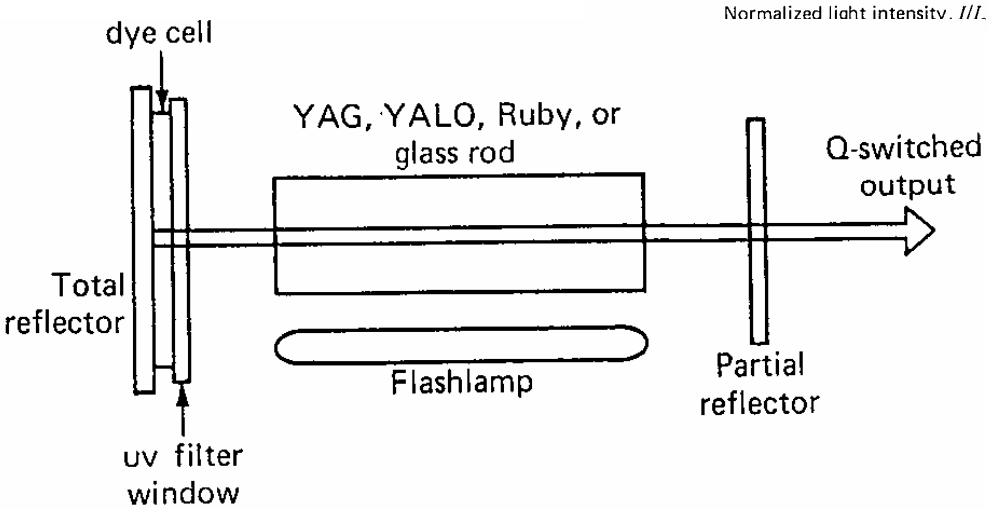
Q-spínání: techniky

- ***akustooptické*** (ultrazvuková vlna 20-50 MHz o vlnové délce Δ v krystalu o délce l)
  - Raman-Nathův režim: $l\lambda << \Delta^2$
  - Braggův režim: $l\lambda >> \Delta^2; \sin\Theta = \lambda/2\Delta; I = I_0 \sin^2(ql)$
  - $q \propto \sqrt{\frac{1}{\lambda^2 w} P_{ac}}$
  - materiály: křemen, TeO_2, $LiNbO_3$
  - malé ztráty
  - malé spínací rychlosti kvůli rychlosti zvuku (typ. 2 μm/ns)

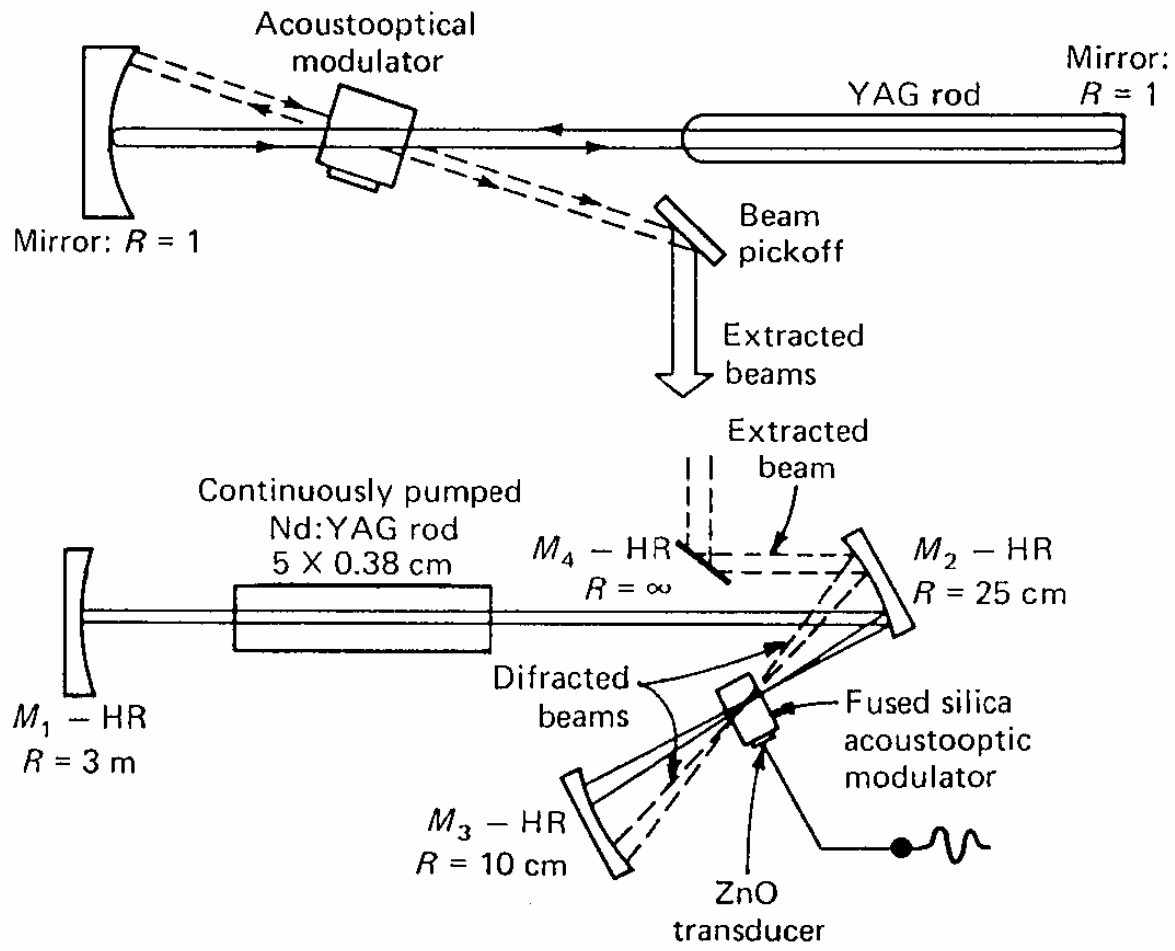


- ***pasivní – pomocí saturabilního absorbéru*** (zpravidla roztoky barviv, případně plastický materiál)
  - $\alpha(\Phi) = \frac{\alpha_0}{1 + \Phi/\Phi_s}$
  - velké ztráty, velký jitter, degradace barviv
  - trojhladinový systém velké σ, malé τ





Cavity-dumping

- pro dosažení krátkých pulsů
- Q-spínaný laser se 100% odraznými zrcadly
- v maximu pulsu se provede deflekce svazku modulátorem
- délka pulsu je řádu doby oběhu světla v rezonátoru (několik ns)

- zpravidla akustooptické modulátory (kvůli nízkým ztrátám a vysoké opakovací frekvenci)
  - silně fokusovaný svazek pro dosažení vysokých spínacích rychlostí
  - vysoká frekvence akustické vlny pro co nejvyšší účinnost difrakce do 1. řádu (200-500 MHz)