



OPTOELEKTRONIKA

ZDROJE SVETLA

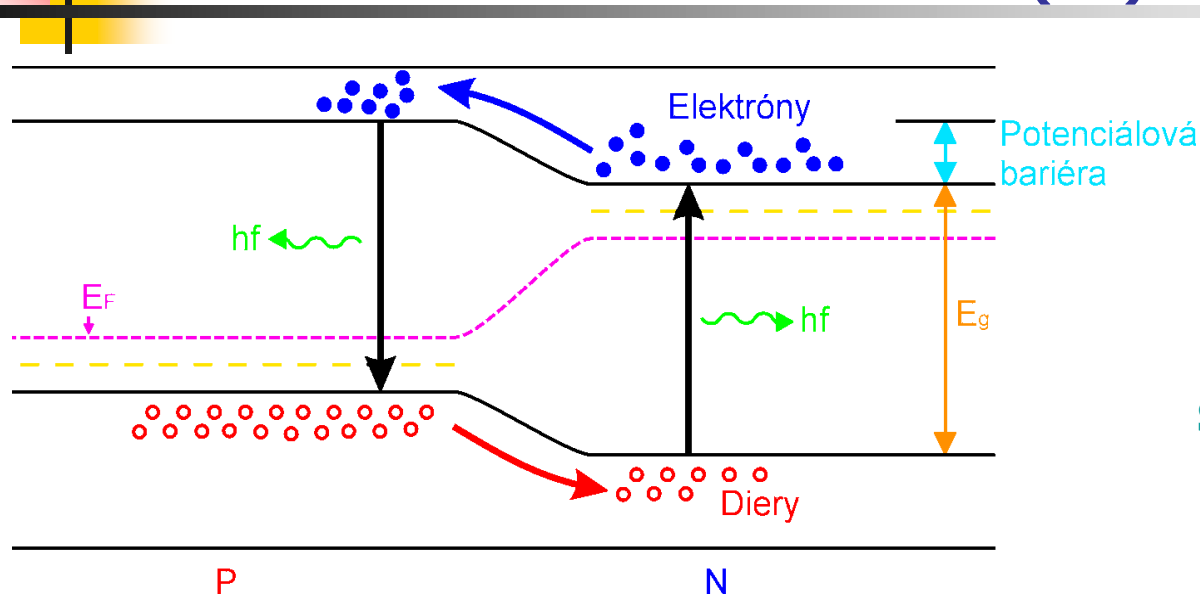
Dr.h.c. Prof.RNDr.Ing. Ján TURÁN, DrSc.

Department of Electronics and Multimedia Communications
Faculty of Electrical Engineering and Informatics
University of Technology Košice, Letná 9, 042 00 Košice,
Slovakia

Tel. ++ 421 55 602 29 43, E-mail: jan.turan@tuke.sk

5.2 GENERÁCIA ŽIARENIA V LASEROCH

5.2.1 POLOVODIČOVÉ LASERY (LD)



Obr. 5.10
Spontánna emisia fotónov
na priechode PN.

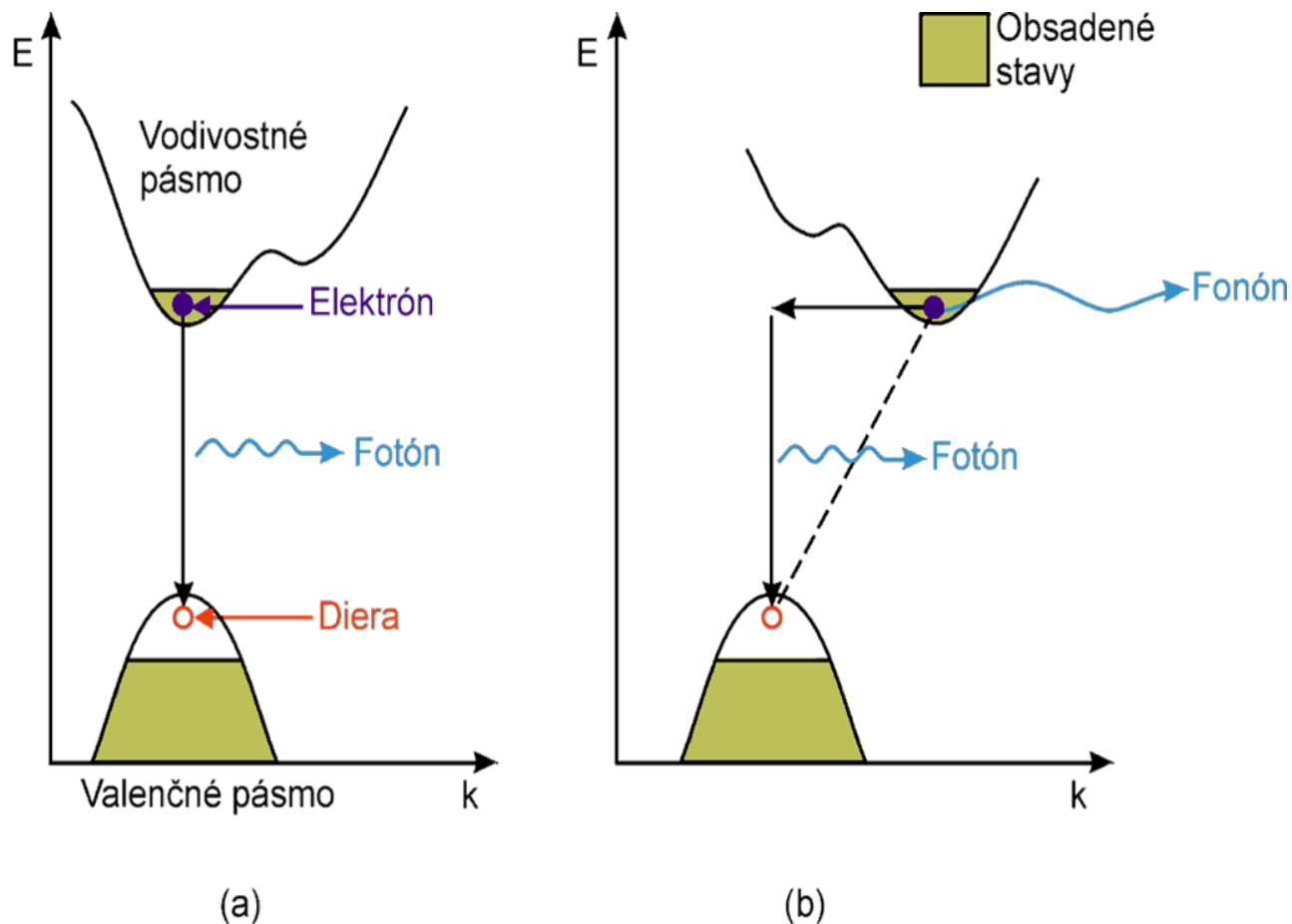
- Navrhnutá **Basovom** v roku 1958
- Prvý polovodičový laser zhotovený r. 1962
- **Spontánna emisia žiarenia** vzniká ak

$$E_g \approx h\nu$$

- **Priamy polovodič** – (**GaAs**)
- **Nepriamy polovodič** – **fonón** – (**Ge, Si**)

5.2 GENERÁCIA ŽIARENIA V LASEROCH

5.2.1 POLOVODIČOVÉ LASERY (LD)



Obr. 5.11

Závislosť energie E od vlnového čísla k pre: priame(a) a nepriame(b) polovodiče.

5.2 GENERÁCIA ŽIARENIA V LASEROCH

5.2.1 POLOVODIČOVÉ LASERY (LD)

- **Rekombinačný koeficient** B_τ súvisí so žiarivým časom života nosičov τ_r

$$\tau_r = \frac{1}{B_\tau (n + p)}$$

- Vnútoraná kvantová účinnosť
- **Rekombinačné procesy:** – Žiarivé
– Nežiarivé
- **Inverzia populácie hladín**

$$E_{F_c} - E_{F_v} > h\nu > E_g$$

kde E_{F_c} a E_{F_v} – Fermiho kvázihladiny; E_g – šírka zakázaného pásma

- Najvhodnejšie budenie – **injekcia nosičov**
- **Budiace napätie**

$$U > \frac{E_c - E_v}{e} = V_d$$

5.2 GENERÁCIA ŽIARENIA V LASEROCH

5.2.1 POLOVODIČOVÉ LASERY (LD)

- **Zaviesť kladnú spätnú väzbu – Fabry – Perotov rezonátor**
 γ – **Koeficient zosilnenia**. Potom **prahový zisk**

$$\gamma_{th} = \alpha + \frac{1}{2L} \ln \frac{1}{R_1 R_2}$$

- **Prúdová hustota**

$$J = \frac{J_{nom} d}{\eta} \quad J_{th} = \frac{J_0 d}{\eta} + \frac{J_0 d}{\eta \Gamma \gamma} \left[\alpha + \frac{1}{L} \ln \left(\frac{1}{R} \right) \right]$$

Príklad : $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ laserová dióda s $d = 0,05 \mu\text{m}$, $x = 0,3$, $\Gamma = 0,08$ a $\eta = 1$.

Potom $J_{th} = 825 \text{ A / cm}^2$ pri izbovej teplote

Ak zväčšíme $x = 0,6$ a $\Gamma = 0,11$ potom J_{th} poklesne na 661 A / cm^2

Pre $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{AsyP}_{1-y}$ laser : $d = 0,2 \mu\text{m}$, $J_0 = 2400 \text{ A / cm}^2 \mu\text{m}$ a

$\gamma_0 / J_0 = 0,057 \text{ cm}\mu\text{m / A}$ je $J_{th} = 1,5 \cdot 10^3 \text{ A / cm}^2$

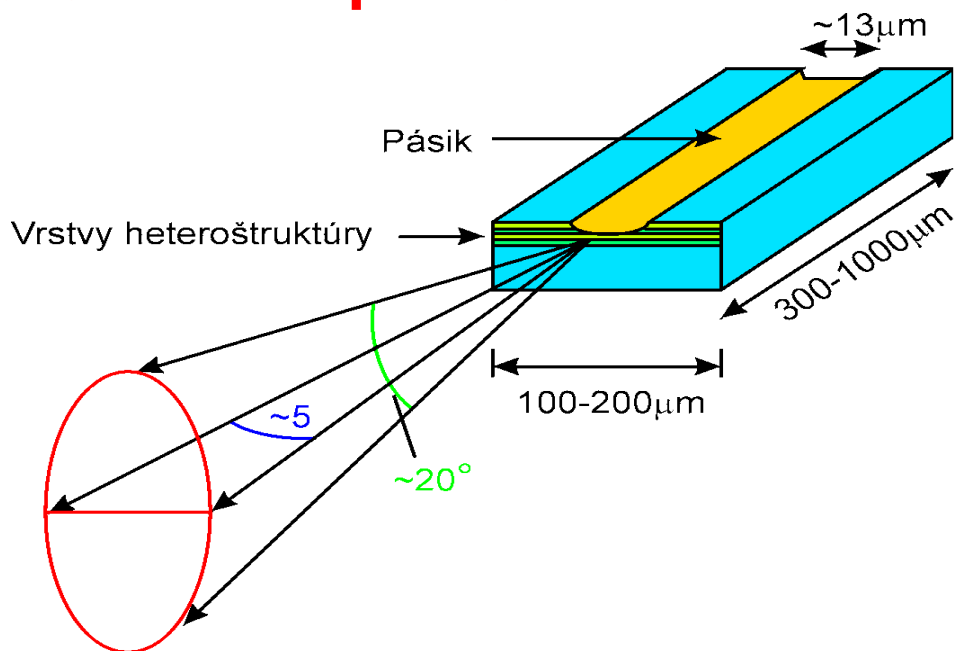
5.2 GENERÁCIA ŽIARENIA V LASEROCH

5.2.1 POLOVODIČOVÉ LASERY (LD)

Rôzne typy polovodičových laserov na báze GaAs:

- Lasery s jednoduchým priechodom PN
- Lasery s heterogénnym priechodom PN
- Lasery s dvojitým heteropriechodom
- Lasery s rozšíreným optickým vlnovodom

Zdokonalenie – pásiková štruktúra



Obr. 5.12
Základná konštrukcia lasera s
pásikovou štruktúrou.

5.2 GENERÁCIA ŽIARENIA V LASEROCH

5.2.1 POLOVODIČOVÉ LASERY (LD)

- **Diferenciálna externá kvantová účinnosť**

$$\eta_D = \frac{\frac{dP_0}{dI}}{\frac{h\nu}{e}} = \frac{e dP_0}{h\nu dI} \cong \frac{dP_0}{E_g dI}$$

η_D od 40 do 60 %

- **Vnútorňá kvantová účinnosť**

$$\eta_i = \frac{\text{počet fotónov vytvorených v rezonátore}}{\text{počet injektovaných elektrónov}}$$

$$\eta_D = \eta_i \left[\frac{1}{1 + \frac{\alpha L}{\ln \frac{1}{R}}} \right]$$

5.2 GENERÁCIA ŽIARENIA V LASEROCH

5.2.1 POLOVODIČOVÉ LASERY (LD)

- **Celková kvantová účinnosť'** (tzv.vonkajšia kvantová účinnosť')

$$\eta_T = \frac{\text{celkový počet vystupujúcich fotónov}}{\text{celkový počet injektovaných elektrónov}} =$$
$$= \frac{\frac{P_0}{h\nu}}{\frac{I}{e}} = \frac{e P_0}{h\nu I} \cong \frac{P_0}{E_g I} \quad \eta_T \cong \eta_D \left[1 - \frac{I_{th}}{I} \right]$$

Malé budiace prúdy – η_T menšie ~ 15 až 25%

- **Vonkajšia výkonová účinnosť'**

$$\eta_{ep} = \frac{P_0}{P} \cdot 100 \% = \frac{P_0}{IV} \cdot 100 \%$$

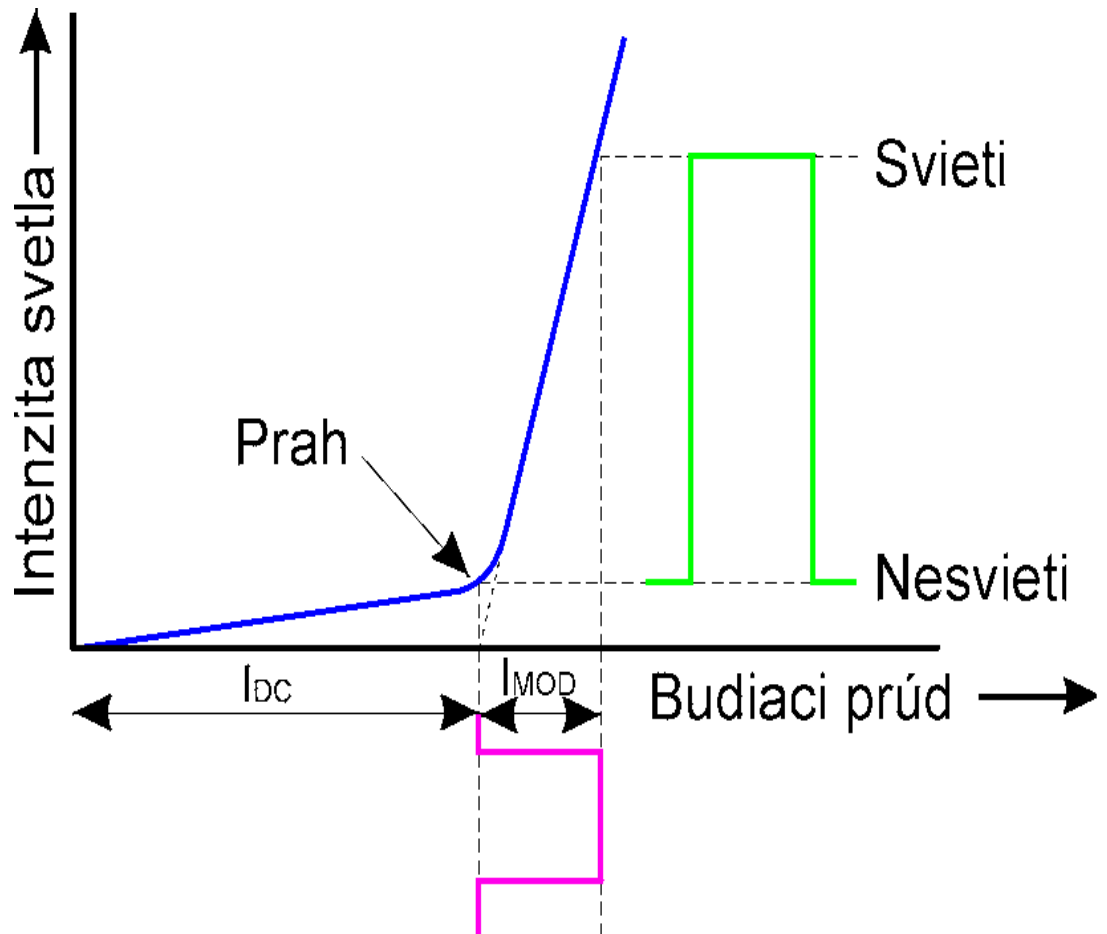
5.2 GENERÁCIA ŽIARENIA V LASEROCH

5.2.1 POLOVODIČOVÉ LASERY (LD)

Prahový prúd

$$J_{th}(T) \cong K \exp \left\{ \frac{T}{T_0} \right\}$$

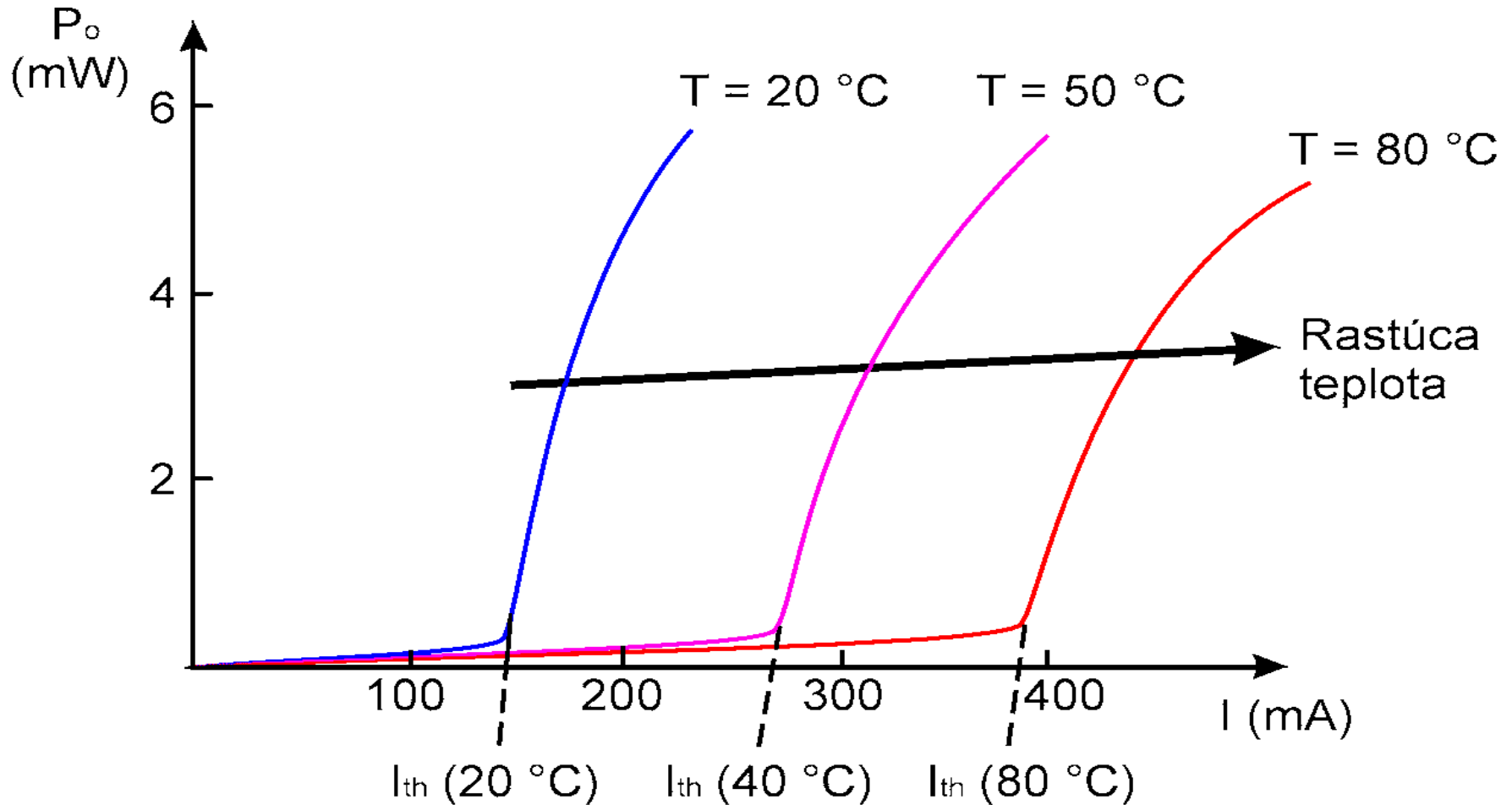
- **AlGaAs** – T_0 z intervalu od 95 do 160 K
- **InGaAsP** – T_0 z intervalu od 40 do 75 K



Obr. 5.13
Modulácia polovodičového lasera.

5.2 GENERÁCIA ŽIARENIA V LASEROCH

5.2.1 POLOVODIČOVÉ LASERY (LD)



Obr. 5.14 Závislosť prahového prúdu polovodičového lasera od teploty.

5.2 GENERÁCIA ŽIARENIA V LASEROCH

5.2.1 POLOVODIČOVÉ LASERY (LD)

- **Dynamické vlastnosti – rýchlostné rovnice**

$$\frac{dN}{dt} = \frac{I}{qV} - \frac{N}{\tau} - A(N - N_{th})P$$

$$\frac{dP}{dt} = A(N - N_{th})P\Gamma - \frac{P}{\tau_P}$$

- **Stacionárne riešenie**
- **Modulačná odozva**

$$p_1(\omega) = \frac{-(i_1/qV)AP_0\Gamma}{\omega^2 - j\omega/\tau - j\omega AP_0 - AP_0/\tau_P}$$

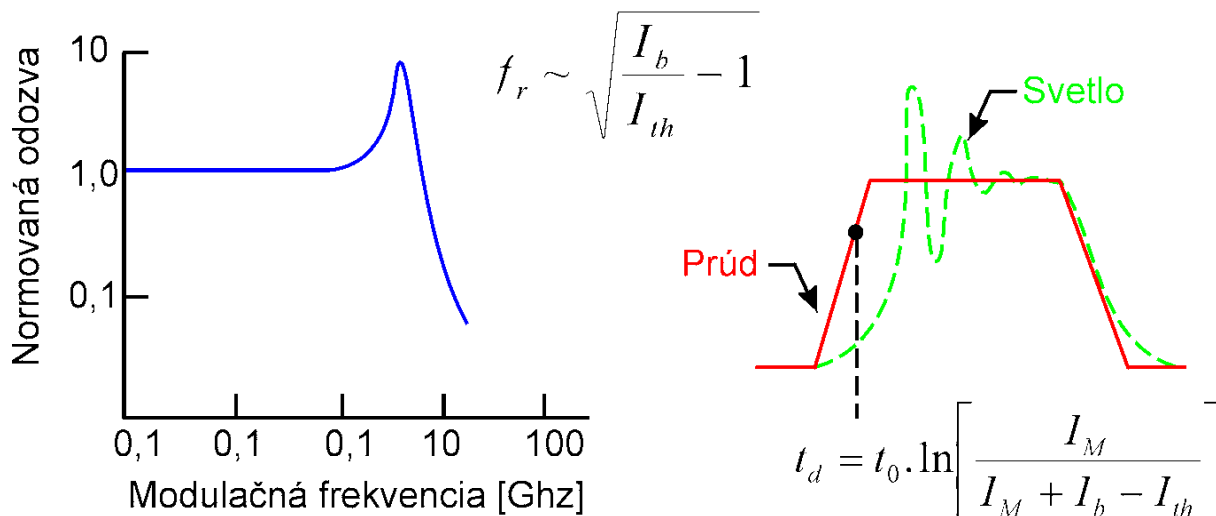
5.2 GENERÁCIA ŽIARENIA V LASEROCH

5.2.1 POLOVODIČOVÉ LASERY (LD)

- **Relaxačné kmity**
- **Oneskorenie zopnutia**
 $t_0 = 2$ až 5 ns, $t_d \cong 0,5$ ns

$$t_d = t_0 \ln \left(\frac{I_M}{I_M + I_B - I_{th}} \right)$$

- Redukcia t_d – **predbudenie lasera**
- Kontinuálny režim – **fluktuácie intenzity**



Obr. 5.15
Modulačná charakteristika
polovodičového lasera (a),
impulzná odozva (b).

5.2 GENERÁCIA ŽIARENIA V LASEROCH

5.2.1 POLOVODIČOVÉ LASERY (LD)

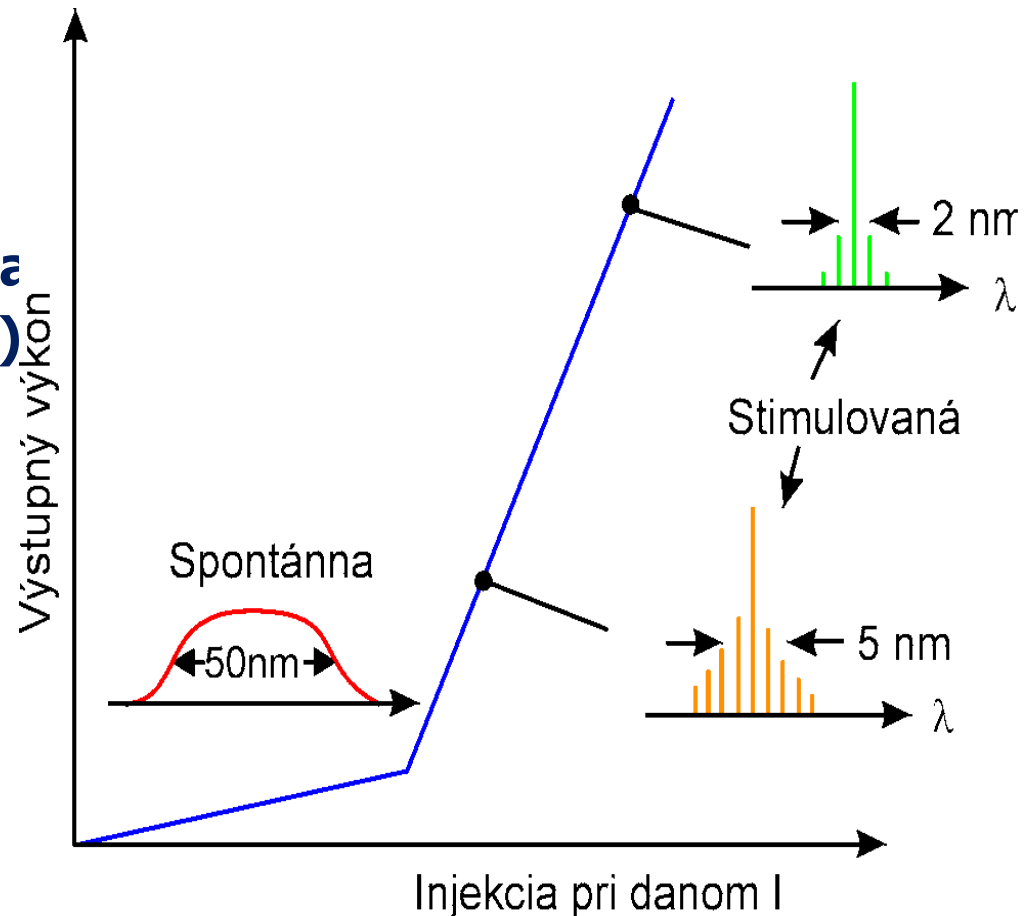
Šumové vlastnosti:

- Kvantový šum
- Nestabilita práce lasera
- Odraz svetla späť do lasera
- Rozdeľovací (distribučný) šum

Spektrálna šírka pozdĺžnych vidov

$$\Delta \nu = \frac{K}{P_0 L}$$

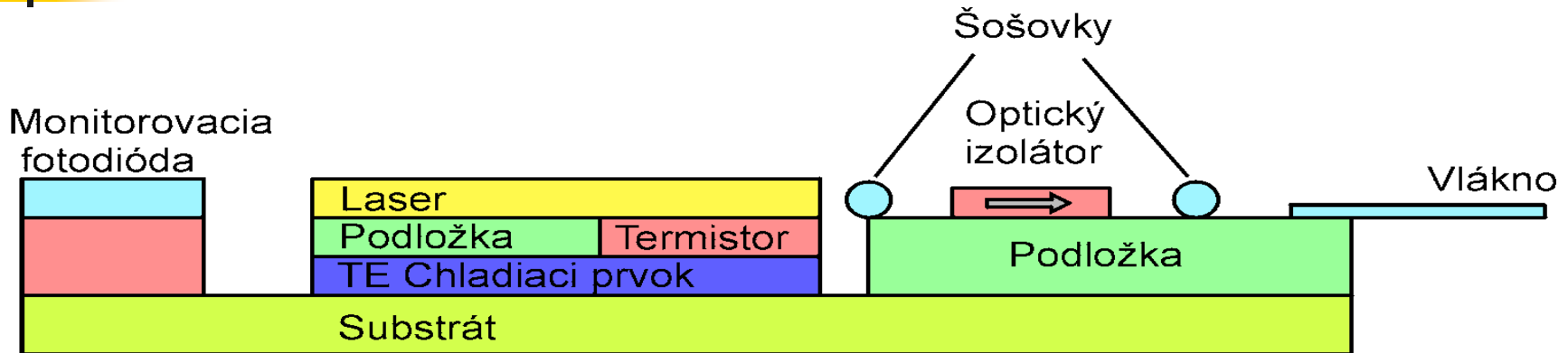
- Typické hodnoty $\Delta \nu$ pre $L = 250 \mu\text{m}$ a $P_0 = 5 \text{mW}$ sú od 10 MHz do 100 MHz



Obr. 5.16
Spektrum polovodičového lasera pri rôznom buzení.

5.2 GENERÁCIA ŽIARENIA V LASEROCH

5.2.1 POLOVODIČOVÉ LASERY (LD)



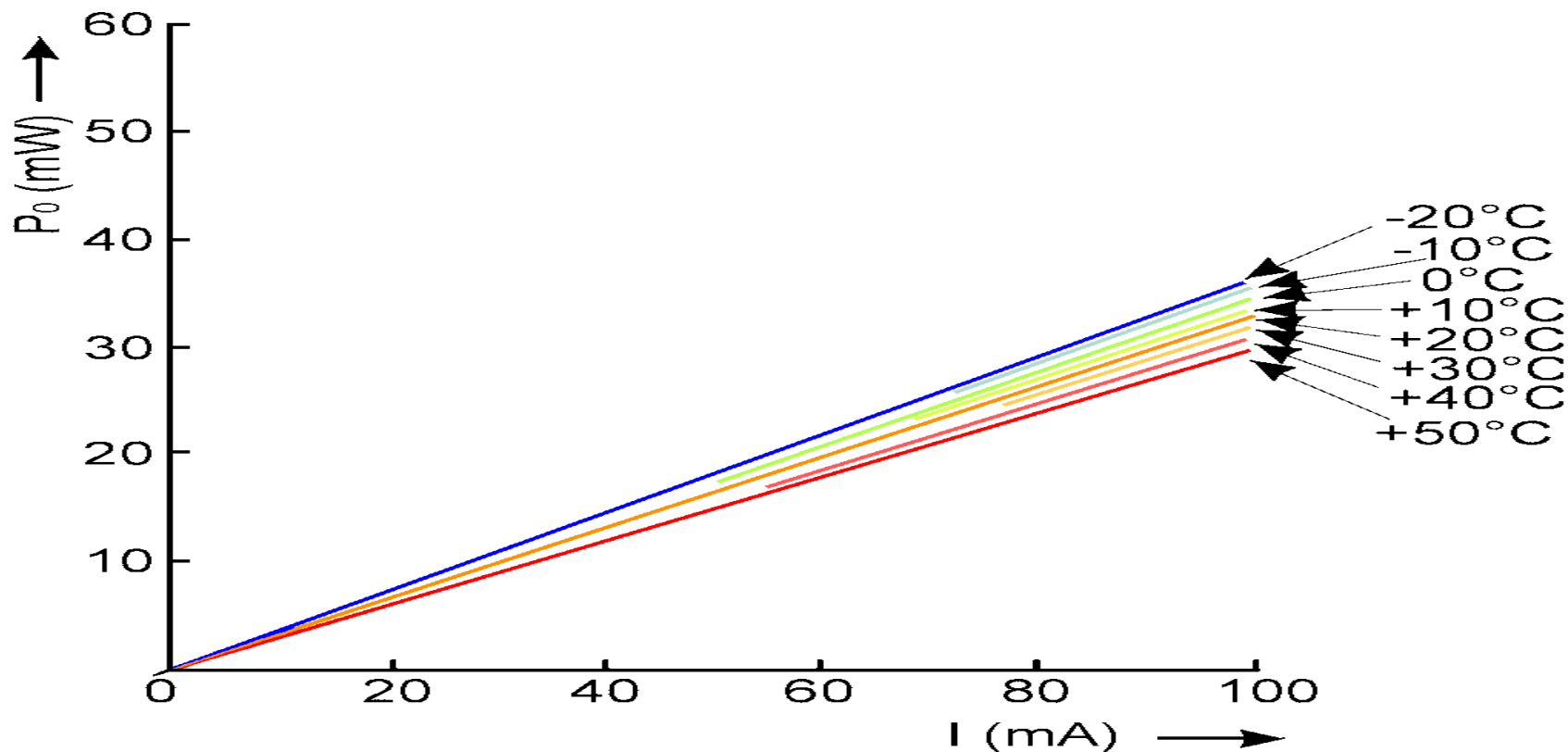
Obr. 5.17 Bloková schéma laserového modulu pre OVKS.

- **Jednofrekvenčný laser**
- **Jednovidový laser**
- **DFB (Distributed Feed Back)**
- **Deštrukcia**
- **Postupná degradácia**
- **Vznik tmavých čiar**
- **Spôsobu naviazania**
 - **pigtail**
- **Laserové moduly**

5 ZDROJE SVETLA

5.3 SVETLOEMITUJÚCE DIÓDY (LED)

Svetloemitující diódy (LED – Light Emission Diode)



Obr. 5.18
Výstupná charakteristika LED.

5 ZDROJE SVETLA

5.3 SVETLOEMITUJÚCE DIÓDY (LED)

Hlavné nevýhody:

- Naviazanie len malých optických výkonov ($\sim\mu\text{W}$)
- Malá šírka modulačného pásma (50MHz)
- Harmonické skreslenie signálu

Výhodné vlastnosti:

- Jednoduchšia výroba
 - Nižšia cena
 - Väčšia spoľahlivosť a životnosť
 - Menšia teplotná závislosť
 - Jednoduchšie budiace a modulačné obvody
 - Linearita výstupnej charakteristiky
-
- $\sim 0,85\mu\text{m}$ – **LED** na báze **GaAlAs**
 - $\sim 1,3\mu\text{m}$ – **LED** na báze **GaInAsP**

5 ZDROJE SVETLA

5.3 SVETLOEMITUJÚCE DIÓDY (LED)

- **Lambertova geometria**
vyžarovania **LED**

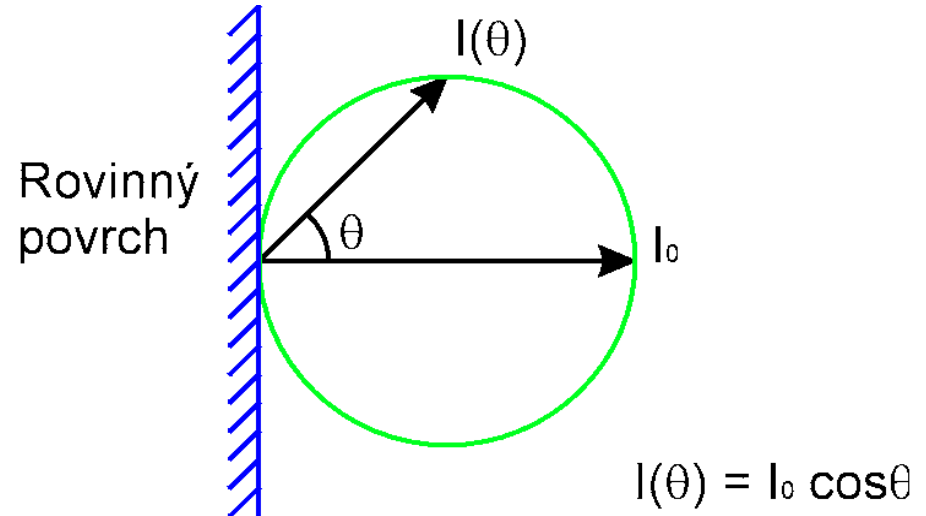
$$I(\theta) = I_0 \cos \theta$$

- **Vonkajšia výkonová účinnosť**

$$\eta_{ep} = \frac{P_0}{P} \cdot 100 \%$$

- **Emitovaný optický výkon**

$$P_0 = \frac{P_{\text{int}} F n_0^2}{4 n_{\text{LED}}^2}$$



Obr. 5.19
Lambertove rozdelenie intenzity
svetla (typické pre LED).

5 ZDROJE SVETLA

5.3 SVETLOEMITUJÚCE DIÓDY (LED)

- **Účinnosť naviazania**

$$\eta_c = \frac{\int_0^{\theta_a} I_0 \cos \theta \sin \theta d\theta}{\int_0^{\pi/2} I_0 \cos \theta \sin \theta d\theta} = \frac{\int_0^{\theta_a} I_0 \sin 2\theta d\theta}{\int_0^{\pi/2} I_0 \sin 2\theta d\theta} =$$
$$= \sin^2 \theta_a = (NA)^2$$

LED s využitím dvojitej heteroštruktúry:

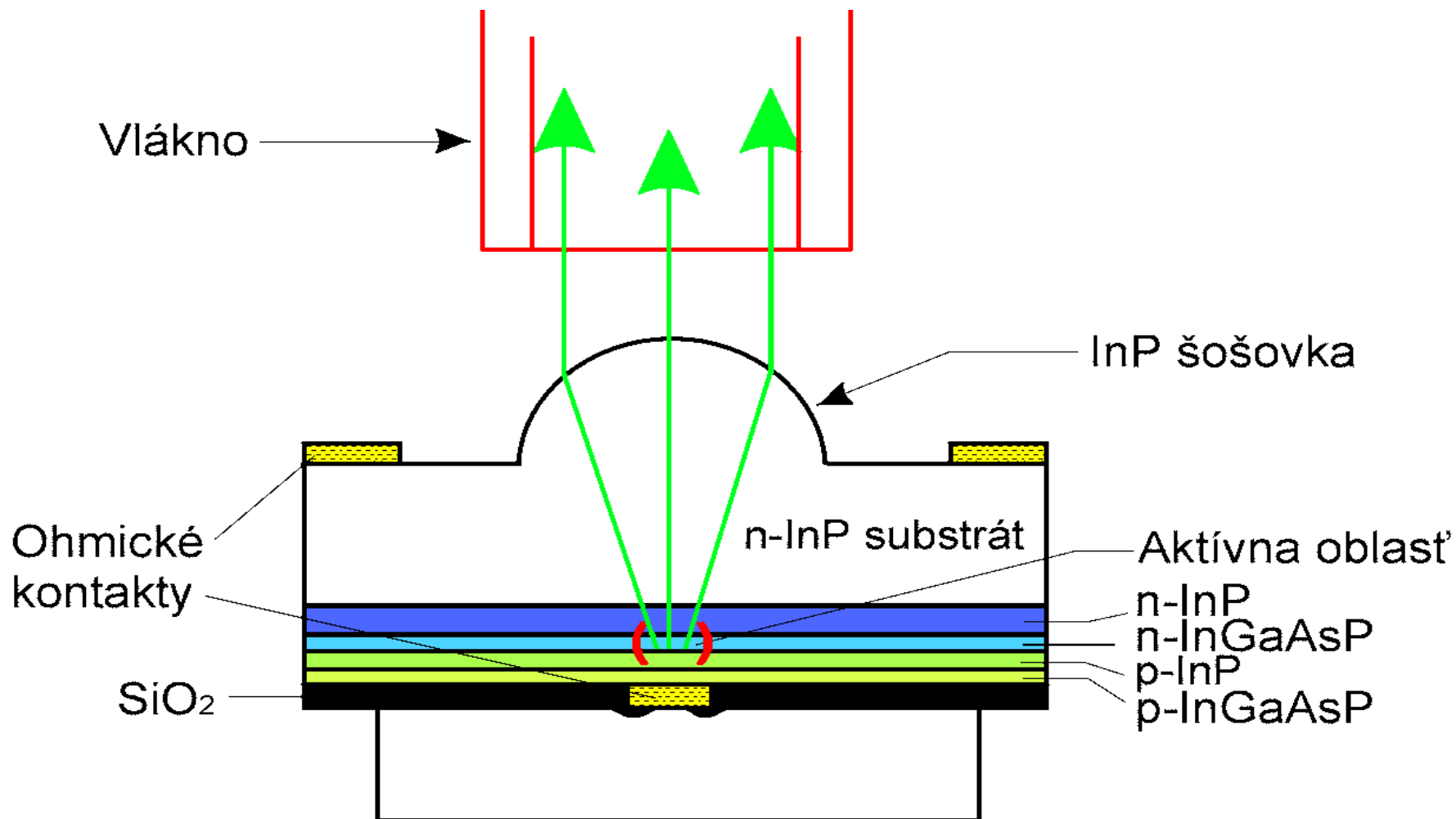
1. Povrchovo emitujúca dióda (Burrusova dióda)

- **Účinnosť naviazania** veľmi malá ~1 až 2%
- Pri použití integrovanej **mikrošošovky** (až 15%)
- **Celková účinnosť konverzie výkonu**

$$\eta_{pc} = \frac{P_{oc}}{P}$$

5 ZDROJE SVETLA

5.3 SVETLOEMITUJÚCE DIÓDY (LED)



Obr. 5.20 Burrusova dióda.

2. Hranove emitujúca dióda

Pre **LED** – využitie linearizačného obvodu

- Modulačná šírka frekvenčného pásma
- Optická šírka frekvenčného pásma
- Gaussov tvar frekvenčnej charakteristiky

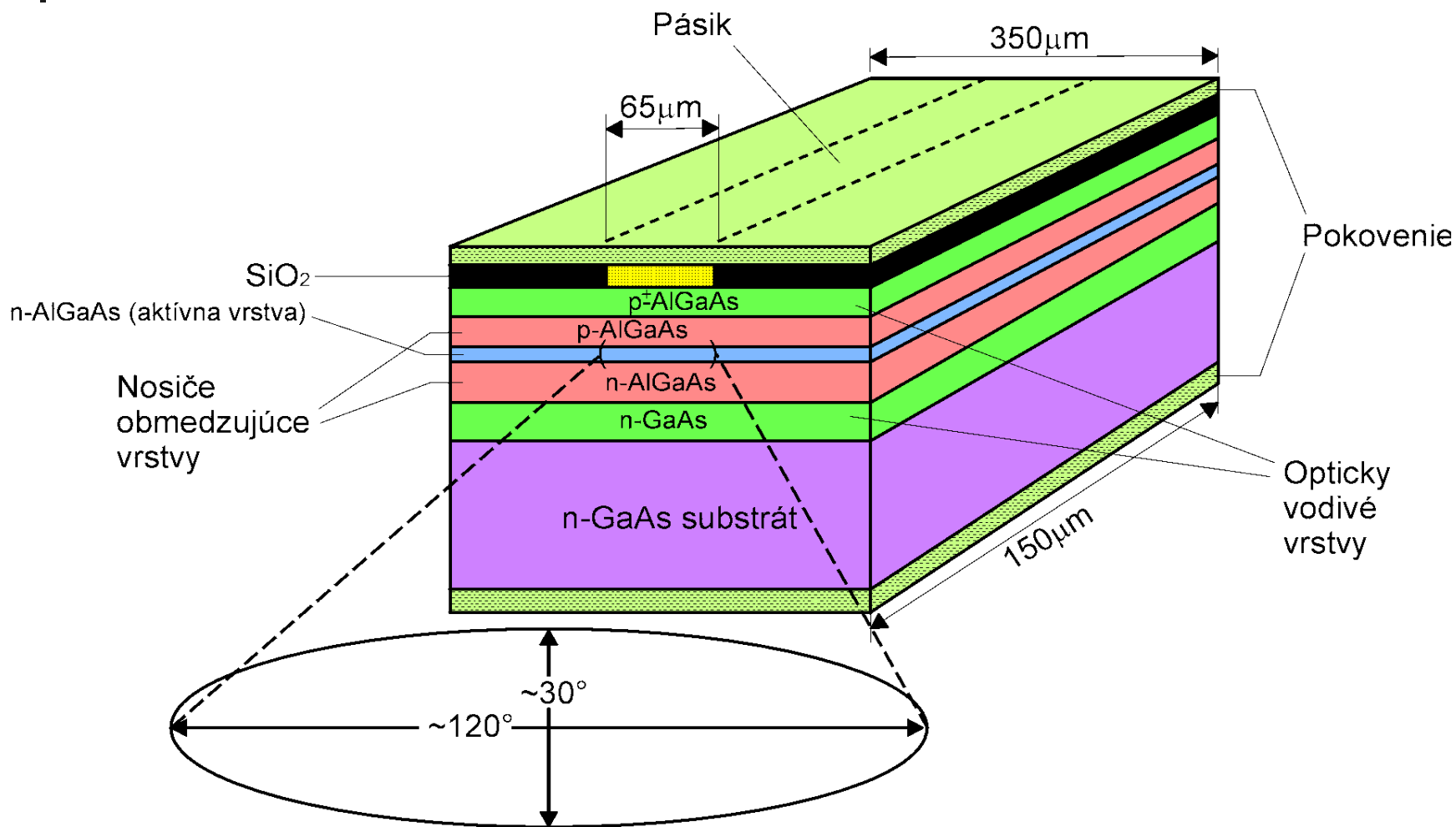
$$B_{opt} = \sqrt{2} B$$

Modulačná frekvenčná šírka pásma **LED** určená:

- Úrovňou dopovania aktívnej vrstvy
- Redukciou žiarivého času
- Parazitnou kapacitou

5 ZDROJE SVETLA

5.3 SVETLOEMITUJÚCE DIÓDY (LED)



Obr. 5.21 Štruktúra AlGaAs hranove emitujúcej LED.

5 ZDROJE SVETLA

5.3 SVETLOEMITUJÚCE DIÓDY (LED)

- **Výstupný optický výkon**

$$P_o(\omega) = \frac{P_{odc}}{\sqrt{1 + (\omega \tau_i)^2}}$$

- Rýchla degradácia
- Pomalá degradácia
- Pokles vyžarovaného optického výkonu

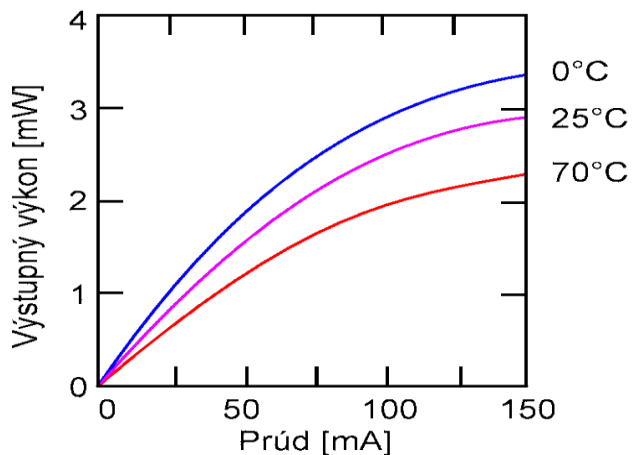
$$P_o(t) = P_o(0) \exp(-\beta_r t)$$

- **Rýchlosť degradácie**

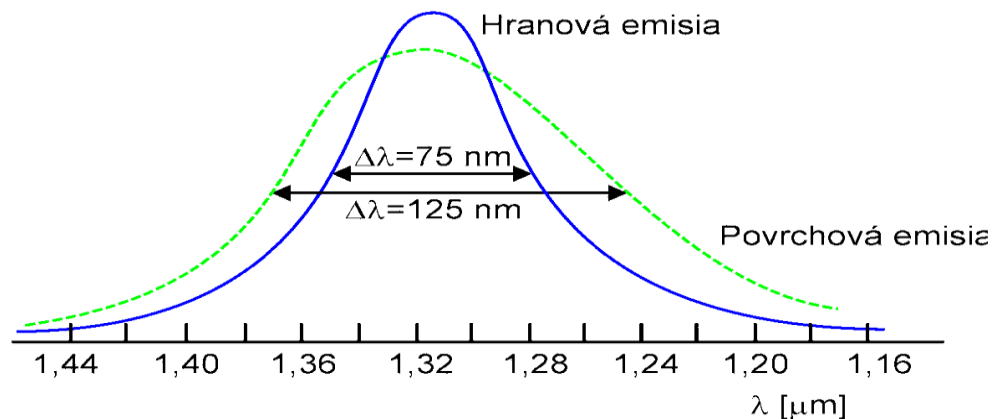
$$\beta_r = \beta_o \exp\left\{-\frac{E_a}{kT}\right\}$$

5 ZDROJE SVETLA

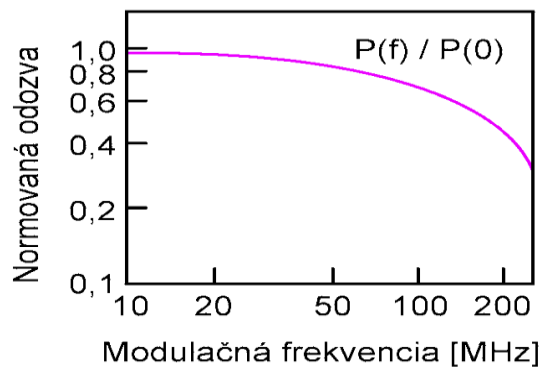
5.3 SVETLOEMITUJÚCE DIÓDY (LED)



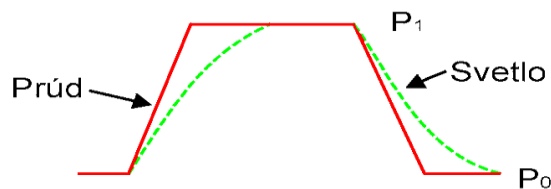
(a)



(b)



(c)

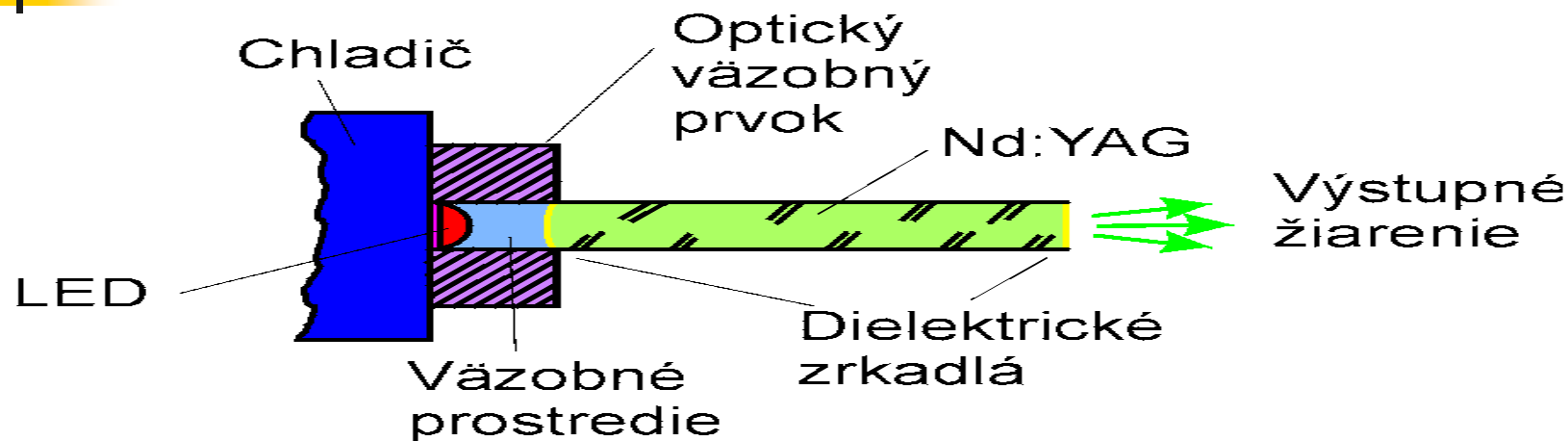


(d)

Obr. 5.22 Charakteristiky InGaAsP LED : (a) vyžarovaný optický výkon, (b) spektrálna krivka, (c) modulačná charakteristika, (d) impulzná odozva.

5 ZDROJE SVETLA

5.4 INÉ LASEROVÉ ZDROJE SVETLA



Obr. 5.23 Nd : YAG laser čerpaný LED (vláknová konštrukcia).

Laserový prechod: ${}^4F_{3/2} \rightleftharpoons {}^4I_{11/2}$, $\lambda = 1,064 \mu\text{m}$

Výhodné vlastnosti:

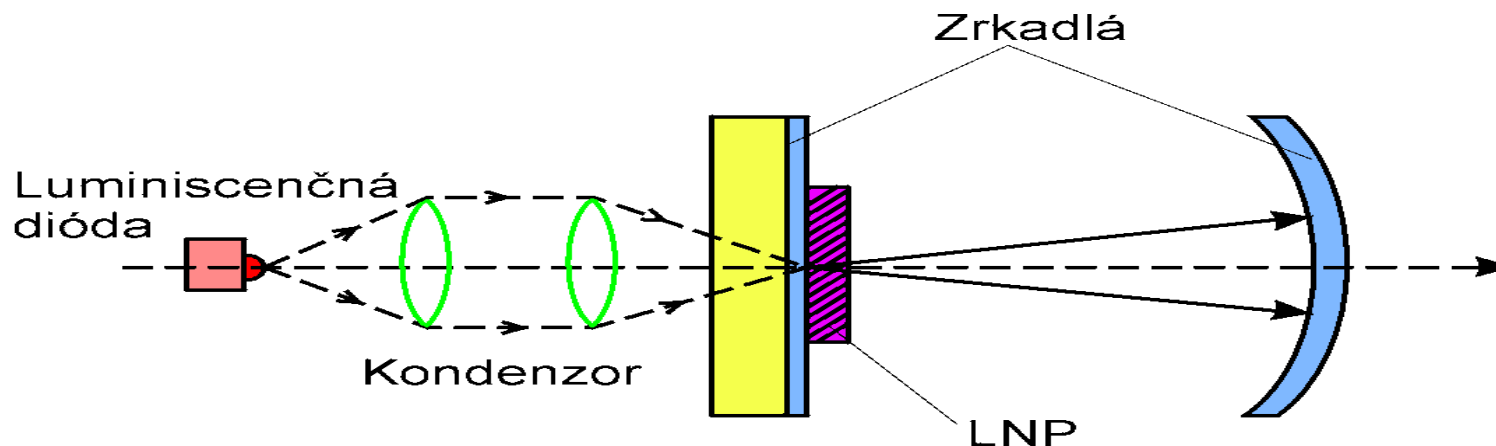
- Pracujú v jednovidovom režime
- Malá spektrálna šírka ($\leq 0,01 \text{ nm}$)
- Veľká životnosť
- Malé rozmery

Plynové lasery : **HeNe** laser ($\lambda=0,633 \mu\text{m}$ alebo $\lambda=1,15 \mu\text{m}$), **CO₂** laser ($\lambda=10,6 \mu\text{m}$) a **Ar-iónový** laser ($\lambda=0,516 \mu\text{m}$).

Chemické lasery na báze **HF**

5 ZDROJE SVETLA

5.4 INÉ LASEROVÉ ZDROJE SVETLA



Obr. 5.24 Konštrukcia $\text{LiNdP}_4\text{O}_{12}$ (LNP) lasera.

Nevýhodné vlastnosti:

- Opticky čerpaný **LED** alebo **LD**
- Dlhý čas fluorescencie ($\sim 10^{-4}$ s)
- Technológia výroby lasera nie je kompatibilná s konvenčnou technológiou výroby polovodičových integrovaných obvodov
- Optické čerpanie a externá modulácia

5 ZDROJE SVETLA

5.5 KLASICKÉ ZDROJE SVETLA

- **Absolútne čierne teleso**
- Zo **Stefanovho – Boltzmannovho** vyžarovacieho zákona, pri 2000 °C je celková hustota vyžiareného výkonu okolo 80 W cm^{-2}
- Ekvivalentná žiara $6 \text{ W cm}^{-2} \text{ sr}^{-1}$
- Užitočný (využitelný) jas $0,1 \text{ W cm}^{-2} \text{ sr}^{-1}$

- **Stefanov – Boltzmannov zákon** určuje vzrast celkovej žiary $\sim T^4$
- **Wienov distribučný zákon**
- **Wolframové žiarovky**
Halogénové žiarovky