

Optoelektronické systémy

Prvky

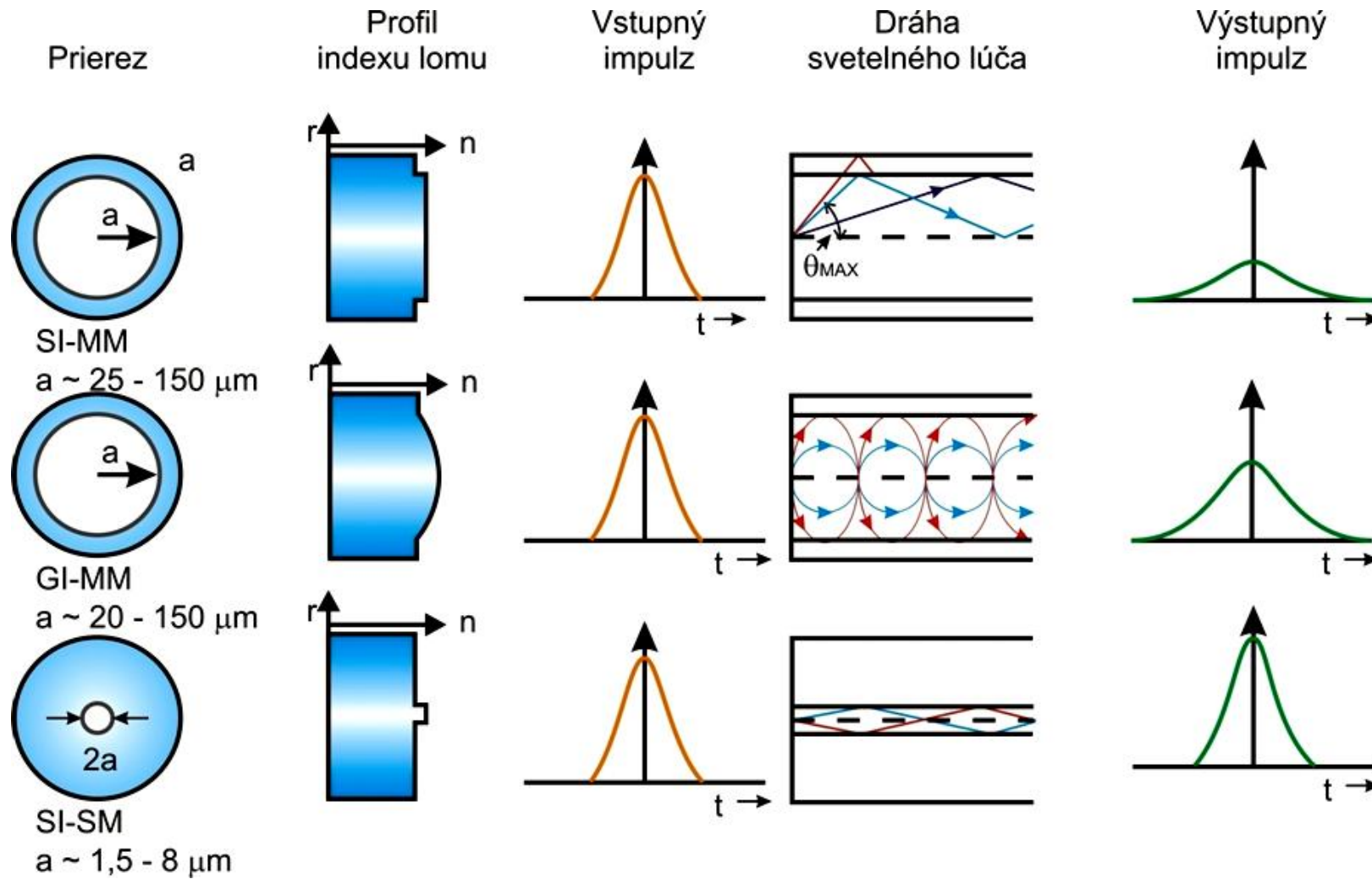
Prof. RNDr. Ing. Ján Turán, DrSc., KEMT FEI TU Košice

Optické vlákna a káble

Telekomunikačné optické vlákna:

- .. Mnohovidové vlákna so skokovitým (stupňovitým) profilom indexu lomu, tzv. **stupňovité optické vlákna (SI-MM - Step Index MultiMode)**
- .. Mnohovidové vlákna so spojitým (gradientným) profilom indexu lomu, tzv. **gradientné optické vlákna (GI-MM - Graded Index MultiMode)**
- .. Jednovidové vlákna so skokovitým (stupňovitým) profilom indexu lomu, tzv. **stupňovité optické vlákna (SI-SM - Step Index SingleMode)**

Najčastejšie používané telekomunikačné optické vlákna



Najjednoduchší typ optického vlákna – tvorené
jadrom a plášťom

Mechanizmus šírenia svetla v OV –
totálny odraz na rozhraní **jadro – plášť**

Šírenie elektromagnetických vln – pozdĺž vlákna
v tvare **vidov** (konfigurácie elektromagnetického
poľa)

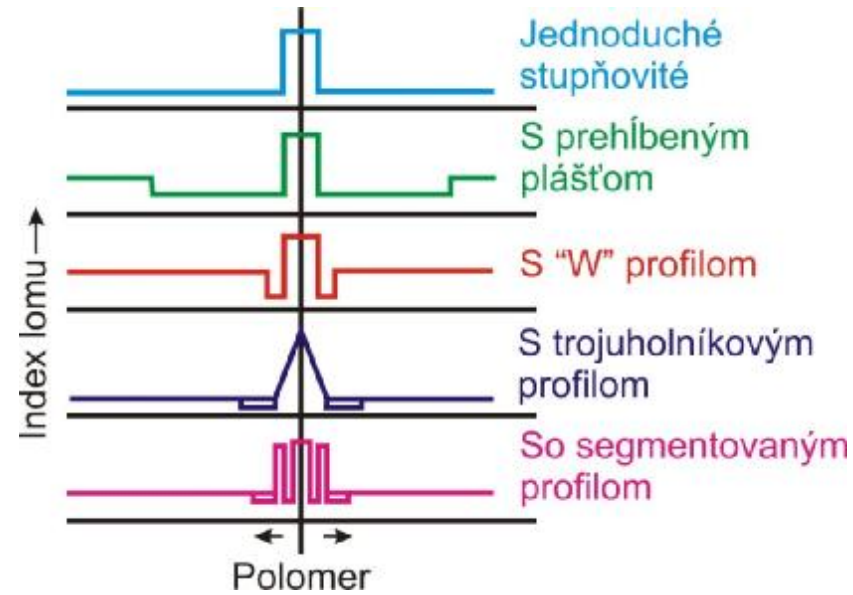
· **Riešenie pomocou Maxwellových rovníc**

Lúčová teória šírenia svetla
– **geometrická optika**

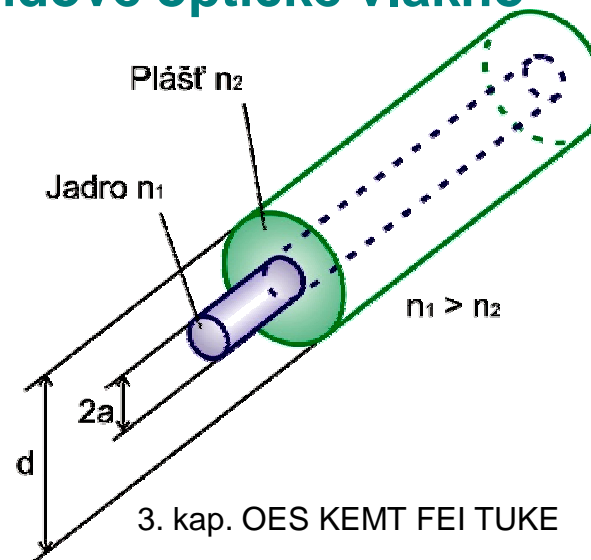
Vlnová teória

– využíva **riešenie Maxwellových rovníc**

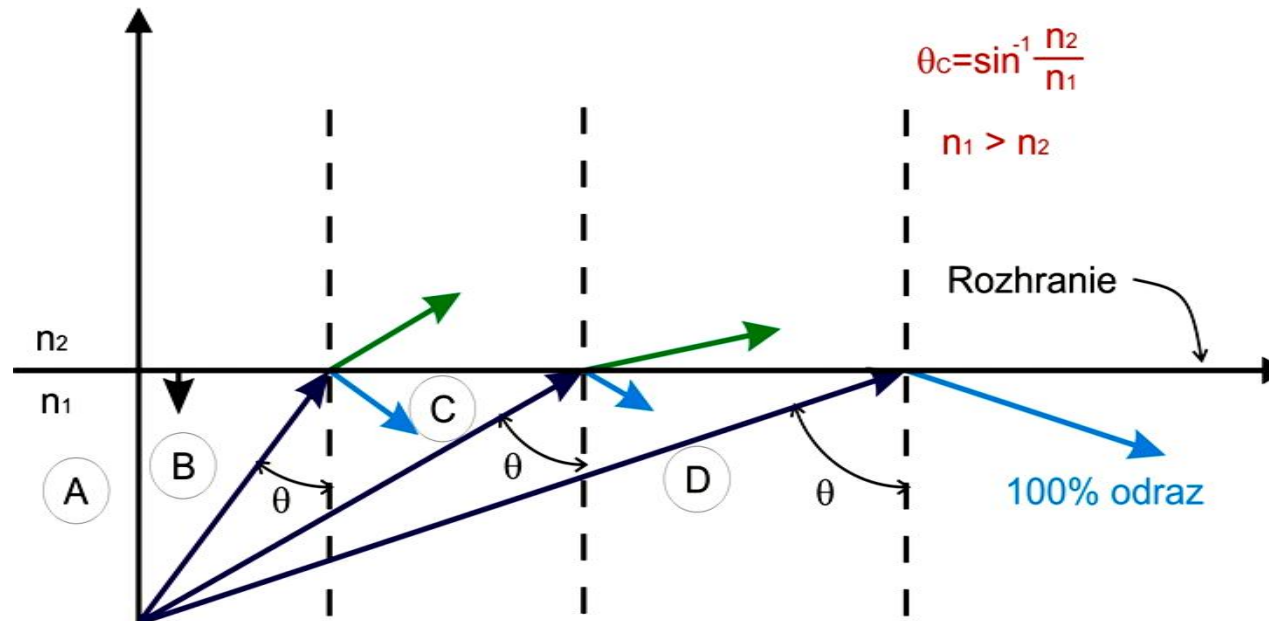
Profily indexu lomu jednovídných optických vláken



Stupňovité mnohovidové optické vlákno



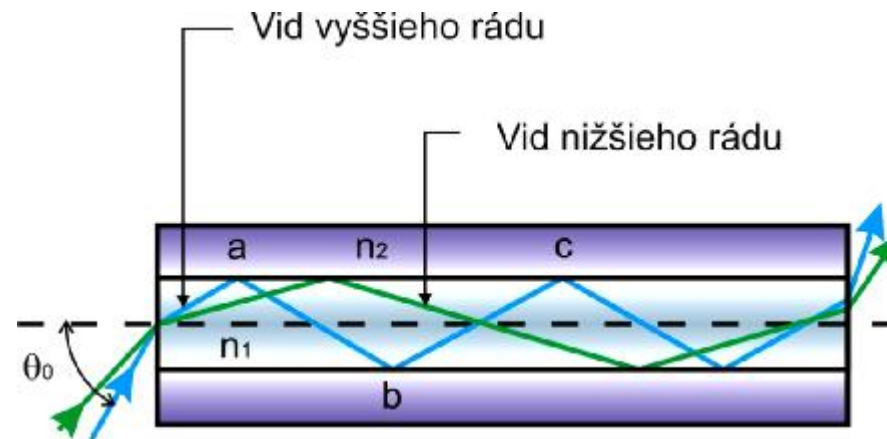
Úplný odraz na rozhraní jadro – plášť



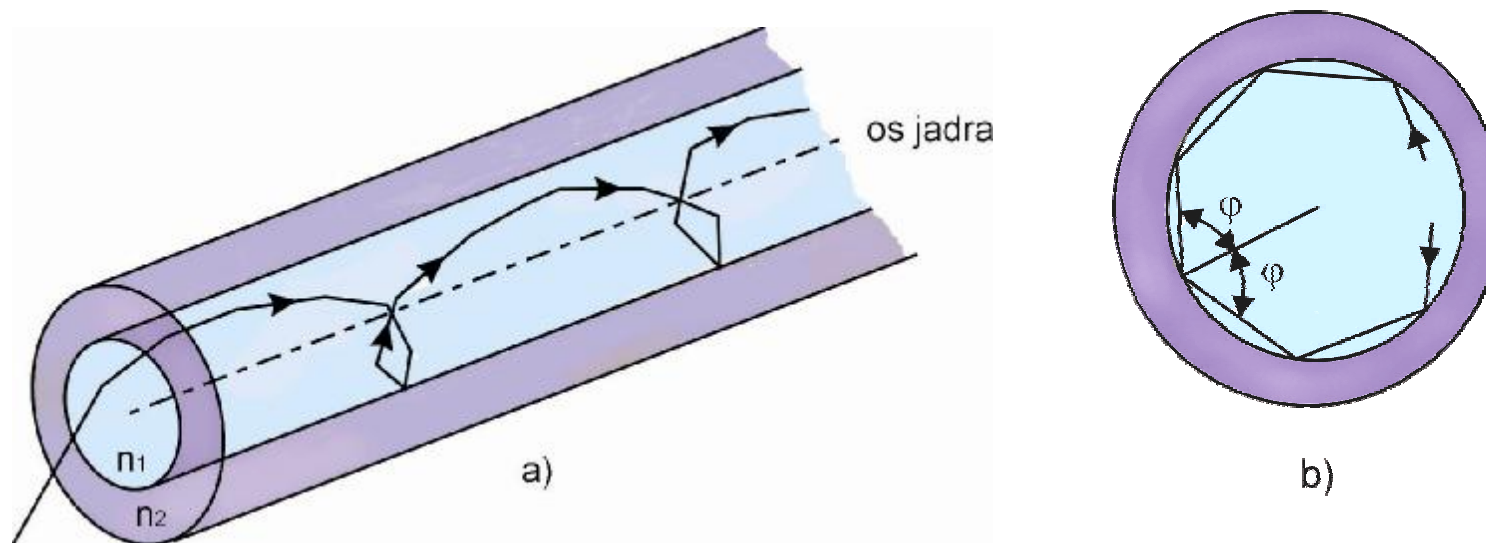
Lúče v SI – MM OV

- **Meridionálne lúče**, ktoré sa šíria v rovinách prechádzajúcich cez os vlákna
- **Šikmé (kosé) lúče**, ktoré neprechádzajú cez os vlákna a šíria sa po špirálovej dráhe

Šírenie meridionálnych lúčov



Špirálová dráha šikmých lúčov v SI – MM vlákne (a) a jej priečna projekcia (b)



Akceptačný uhol

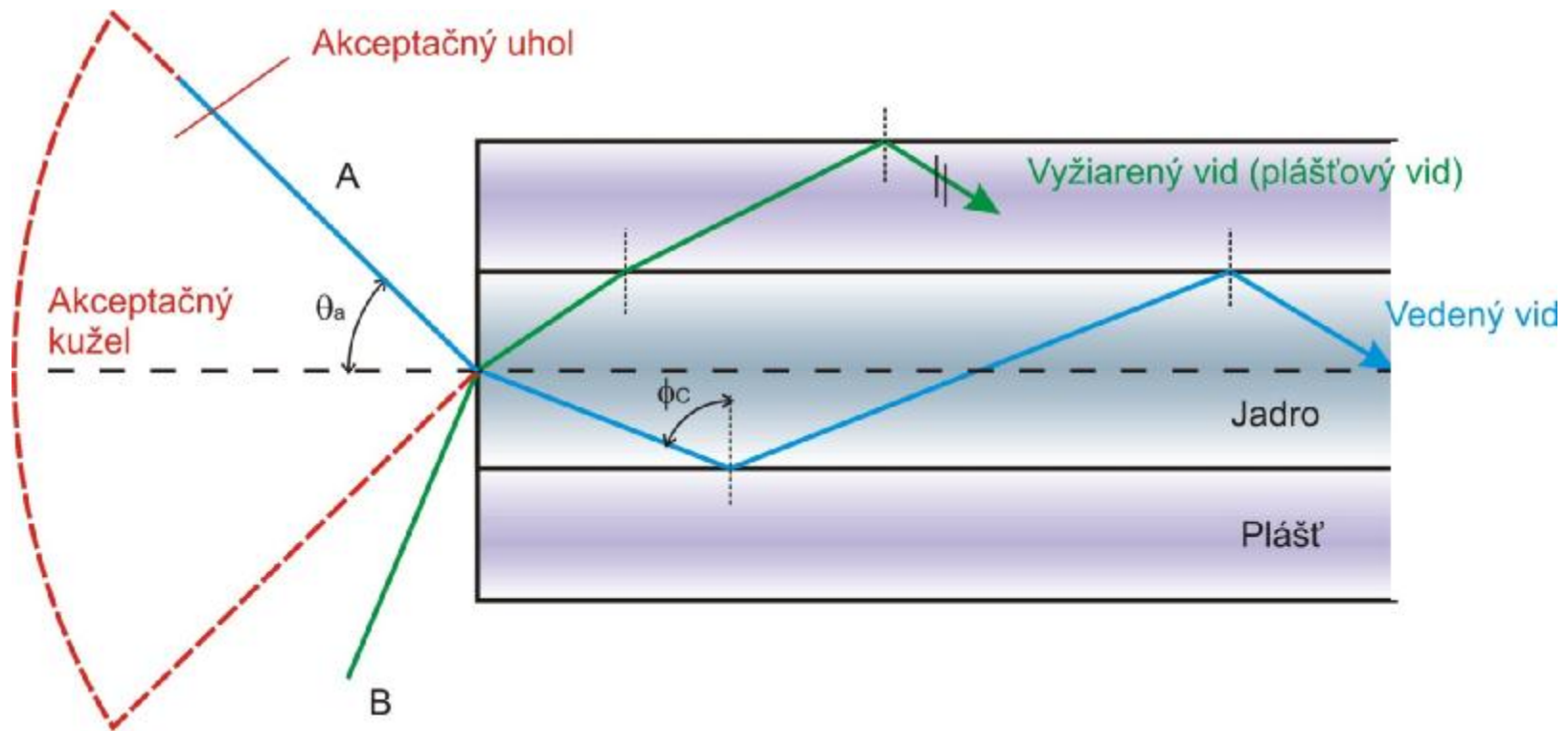
$$n n_0 \sin q_a = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

Akceptačný kužel

Vidy

- .. **Vedené** – šíria sa pozdĺž vlákna
- .. **Radiačné** – vyžiarené na krátkom úseku optického vlákna
- .. **Plášťové** – pri splnení podmienky totálneho odrazu na rozhraní plášť – obal

Akceptačný kužel optického vlákna



Numerická (číselná) apertúra (NA)

$$n NA = n_0 \sin q_a = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

Relatívny rozdiel indexu lomu jadra a plášťa

$$n \Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2} \cong \frac{n_1 - n_2}{n_1} \text{ pre } \Delta \ll 1$$

$$n NA \cong n_1 \sqrt{2\Delta}$$

Riešením Maxwellových rovníc podobne ako pri riešení dielektrického valcového vlnovodu dostaneme **TE_{ml}, TM_{ml}, HE_{ml}, EH_{ml} vidy**

Slabovedúce štruktúry – lineárne polarizované (LP) vidy

Mnohovidové OV – šírenie konečného počtu vedených vidov

Počet vedených vidov závisí od parametrov OV a normovanej frekvencie v

Kritická normovaná frekvencia v_c

– hodnota, pod ktorou sa vid nešíri

Vidový objem M_s pre SI – MM OV

$$n M_s \cong \frac{v^2}{2}$$

Vzájomná väzba vidov – prelínanie optického výkonu z jedného vidu do druhého

Výhoda šírenia jedného vidu v OV – odstráni sa disperzia signálu

Vidová konverzia – vzájomná väzba vidov v dôsledku neprispôsobenia vstupu alebo nedokonalosti (porúch) OV

Šírenie len dominantného vidu LP_{01}

$$n \quad 0 < v = k n_1 a \sqrt{2\Delta} < v_c^{LP_{11}} \cong 2,405$$

Celkové tlmenie

$$n \ a_T (dB) = 10 \log \frac{P_i}{P_o}$$

P_i – vstupný, P_o – výstupný optický výkon

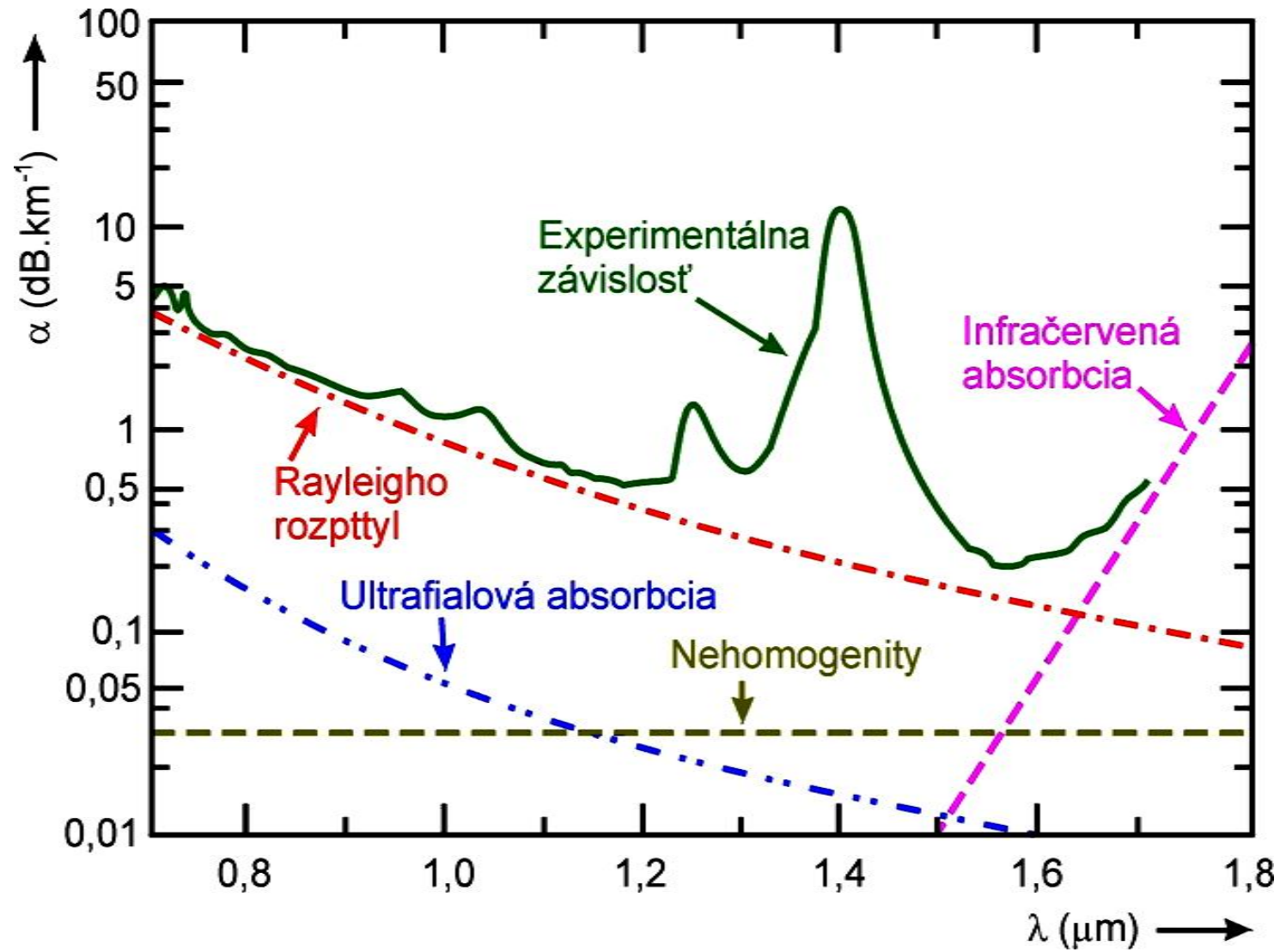
$$n \ a_{dB} = \frac{10}{L} \log \frac{P_i}{P_o} = \frac{a_T}{L}$$

L – dĺžka OV

Tlmenie OV

- .. **Materiálové absorpčné straty**
- .. **Lineárny a nelineárny rozptyl**
- .. **Ohybové straty**

Tlmenie OV na báze SiO₂



Krivka spektrálneho tlmenia

$$\alpha(\lambda) = C_1 / \lambda^4 + C_2 + A(\lambda)$$

C_1 a C_2 – konštanty, $A(\lambda)$ – funkcia vlnovej dĺžky

$$C_1 = 0,6 - 0,8 \mu\text{m}^4\text{dB/km}$$

- q Prvý člen výrazu vyjadruje **Rayleighove** rozptylové straty
- q Druhý člen straty spôsobené nepravidelnosťou štruktúry **OV** – **mikroohyby**
- q Tretí člen straty na nečistotách

Disperzia – spôsobuje poruchu číslicového aj analógového prenosu

Zložky disperzie

- .. Vidová disperzia
- .. Materiálová disperzia
- .. Vlnodovová disperzia
- .. Profilová disperzia

Chromatická disperzia OV – materiálová a vlnodovová disperzia v jednovidových optických vláknach

Miera disperzie **OV**: **ns.km⁻¹**

Kvalita optického vlákna

- **Súčin šírky pásma a dĺžky optického vlákna**

$$B_{\text{opt}} \cdot L$$

- **20 MHz km pre SI-MM**
- **1 GHz km pre GI-MM**
- **100 GHz km pre SI-SM**

Typické parametre telekomunikačných OV

n SI-MM OV

.. Geometrická štruktúra

- n Priemer jadra: 40 až 400 μm
- n Priemer plášťa: 125 až 500 μm
- n Priemer ochranného obalu: 250 až 1000 μm
- n Numerická apertúra: 0,16 až 0,5, 0,2 pre **OV** 50/125 μm , 0,275 pre **OV** 62,5/125 μm

.. Vlastnosti

- n Tlmenie: 5 až 10 dB.km⁻¹
- n Kvalita **OV**: 50 MHz.km

.. Aplikácie: krátke vzdialenosti, obmedzená šírka pásma, nízka cena

Typické parametre telekomunikačných OV

n GI-MM OV

.. Geometrická štruktúra

- n Priemer jadra: 30 až 60 μm , normalizovaná hodnota 50 μm pre telekomunikačné aplikácie
- n Priemer plášťa: 100 až 150 μm , normalizovaná hodnota 125 μm pre telekomunikačné aplikácie
- n Priemer ochranného obalu: 250 až 1000 μm
- n Numerická apertúra: 0,2 až 0,3

.. Vlastnosti

- n Tlmenie: 0,8 až 5 dB.km^{-1}
- n Kvalita **OV**: 0,15 až 2 GHz.km

- .. **Aplikácie**: stredné vzdialenosti, stredná šírka pásma, použitie mnohovidových nekoherentných (**LED**), aj koherentných (**LD**) zdrojov svetla

Typické parametre telekomunikačných OV

n SI-SM OV

.. Geometrická štruktúra

- n Priemer jadra: 3 až 10 μm
- n Priemer plášťa: 50 až 125 μm
- n Priemer obalu: 250 až 1000 μm
- n Numerická apertúra: 0,08 až 0,15 obyčajne $\approx 0,10$

.. Vlastnosti

- n Tlmenie: 0,30 až 0,35 dB.km⁻¹ pri $\lambda=1,310 \mu\text{m}$
0,20 až 0,25 dB.km⁻¹ pri $\lambda=1,550 \mu\text{m}$
- n Kvalita **OV**: 500 MHz.km (pri $\lambda=0,85 \mu\text{m}$ max. ≈ 40 GHz.km
pri $\lambda=1,55 \mu\text{m}$ max. ≈ 100 GHz.km)

.. Aplikácie: veľmi veľké vzdialenosti, veľmi veľká šírka pásma, jednovidové lasery

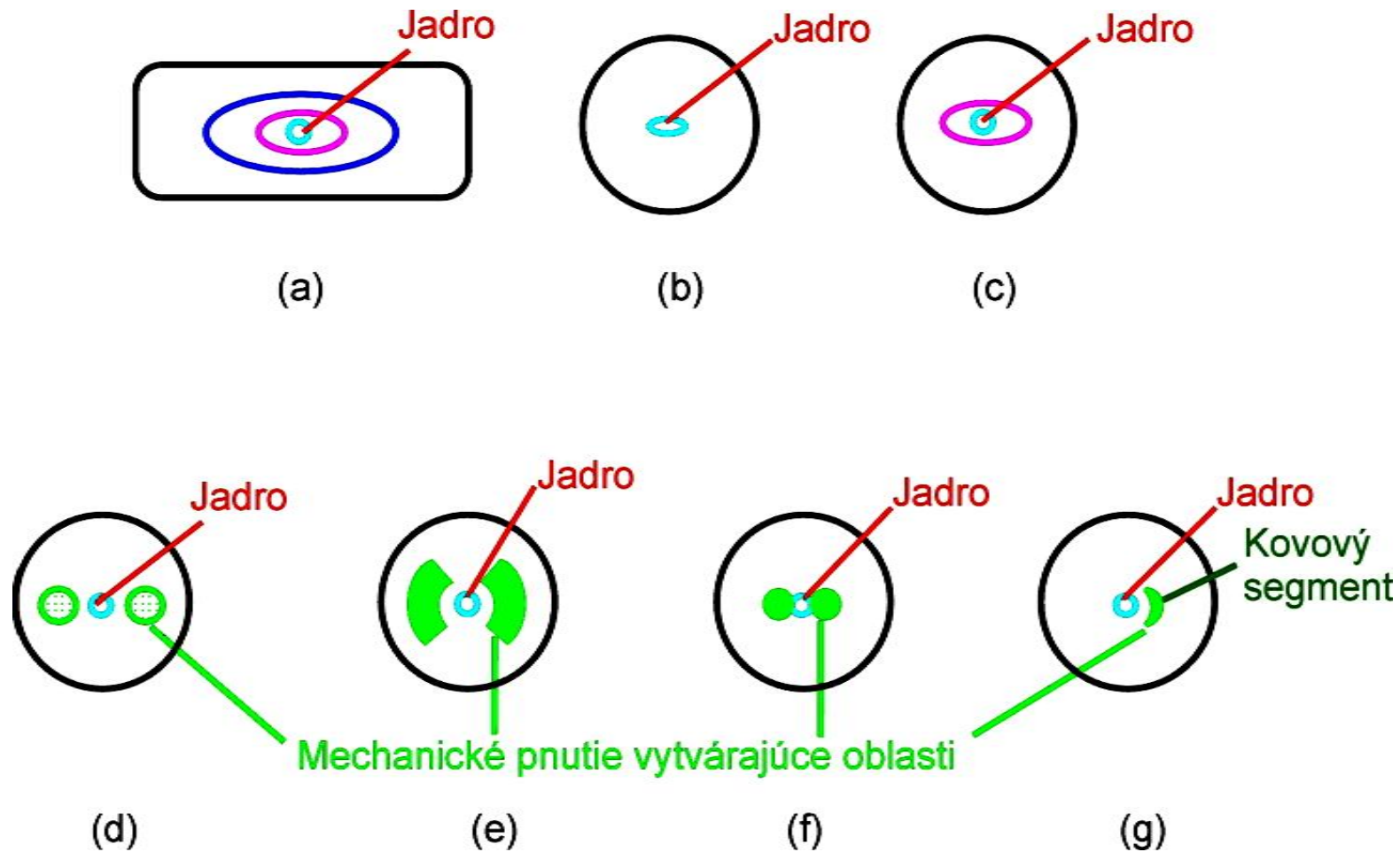
Ortogonalne polarizované vidy: HE_{11}^x a HE_{11}^y – rôzne konštanty šírenia β_x a β_y

Konštantu vidového dvojlomu OV

$$n B_F = \frac{b_x - b_y}{(2p / l)}$$

Polarizačne citlivé vlákna – OV s veľkým dvojlomom

Štruktúra polarizáciu zachovávajúcich OV: (a) eliptický plášť, (b) eliptické jadro, (c) eliptický plášť, (d) PANDA, (e) Motýlik, (f) tunel, (g) kovový segment



OV vyrobené z iných materiálov

- .. Celoplastové **OV– POF (Plastic Optical Fiber)**
- .. Polymér – plášť – kremík **OV– PCS (Polymer Clad Silica)**

n Použité materiály

- .. **Jadro:** Polymetylmetakrylát (**PMMA** – Perspex) a Polystyrén (**PS**)
- .. **Plášť:** Fluorokarbónový polymér – silikónový polykarbonát (**PC**)

n Výhodné vlastnosti POF

- .. Veľmi lacné
- .. Ľahko sa spájajú
- .. Ľahko sa s nimi pracuje
- .. Veľký priemer 0,5 – 1 mm
- .. Veľká numerická apertúra 0,54
- .. Relatívne veľké tlmenie a disperzia
- .. Menia svoje vlastnosti s teplotou a horný teplotný limit

PMMA-D₂ vlákno – vlákno s jadrom **PMMA**, kde vymeníme vodík H za deutérium

Typické parametre PCS

n Geometrická štruktúra

.. Priemer jadra:	Stupňovité	100 až 500 μm
..	Gradientné	50 až 100 μm
.. Priemer plášťa:	Stupňovité	300 až 800 μm
..	Gradientné	125 až 150 μm
.. Priemer obalu:	Stupňovité	500 až 1000 μm
..	Gradientné	250 až 1000 μm
.. Numerická apertúra:	Stupňovité	0,2 až 0,6
..	Gradientné	0,2 až 0,6

n Vlastnosti

.. Tlmenie:	Stupňovité	5 až 50 dB.km ⁻¹
..	Gradientné	4 až 15 dB.km ⁻¹
.. Kvalita OV :	Stupňovité	5 až 25 MHz.km
..	Gradientné	200 až 400 MHz.km

n **Aplikácie:** krátke vzdialenosti, malá šírka pásma, nízka cena, jednoduché ukončenie **OV**

Typické parametre POF

n Geometrická štruktúra

- .. Priemer jadra: 200 až 900 μm
- .. Priemer plášťa: 500 až 1000 μm
- .. Numerická apertúra: 0,5 až 0,6
- .. **POF** určené na osvetľovanie majú priemer od 4 do 20 mm

n Vlastnosti

- .. Tlmenie: 150 až 220 dB.km^{-1} (pri $\lambda=0,65 \mu\text{m}$)
- .. Kvalita **OV**: nie je obyčajne uvádzaná, pretože prenos je na krátku vzdialenosť

n **Aplikácie**: krátke vzdialenosti, veľmi nízka cena, jednoduché a lacné ukončenie

Špeciálne aplikácie

- Chemické senzory – **OV s kvapalinovým jadrom** – **LLG (Liquid Light Guides)**
- Priemery jadra (2, 3, 4 a 5 mm)
- Jadro môže byť vyplnené aj plynom

Zväzky OV

- Vytvorené z hrubších **OV** s priemerom od 0,125 do 1,3 mm
- Veľká **NA**
- Aplikácie v osvetľovacej technike, v medicíne ako **endoskopy**, na prenos dát a pod.

Fotonické vlákna

- Mikroštruktúrne **zväzky kapilárnych vlákien** rôzneho usporiadania
- Malé tlmenie, prenos veľkých výkonov, veľká šírka pásma

Funkcie káblovania OV

- Ochrana OV
- Stabilizácia prenosových charakteristík OV
- Ťahová sila kábla
- Identifikácia a hromadné spojenie OV

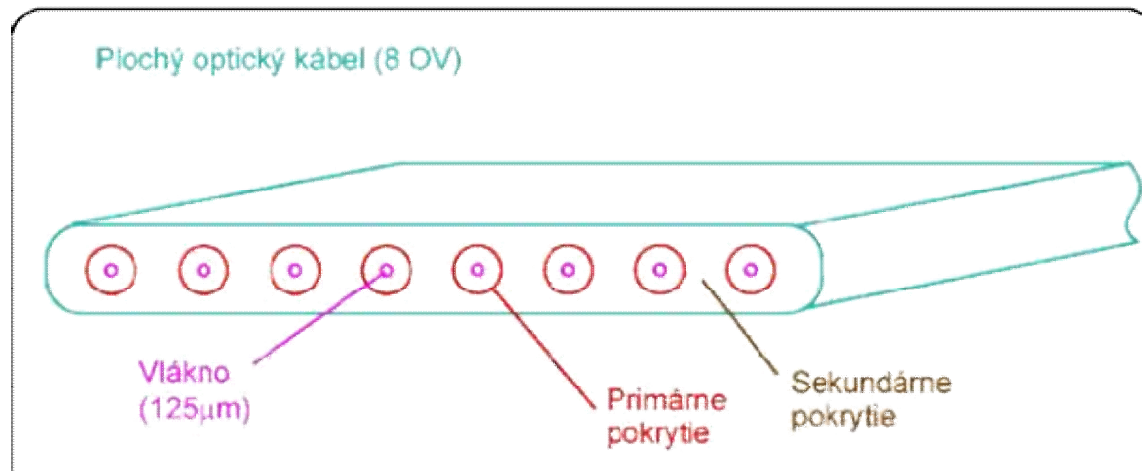
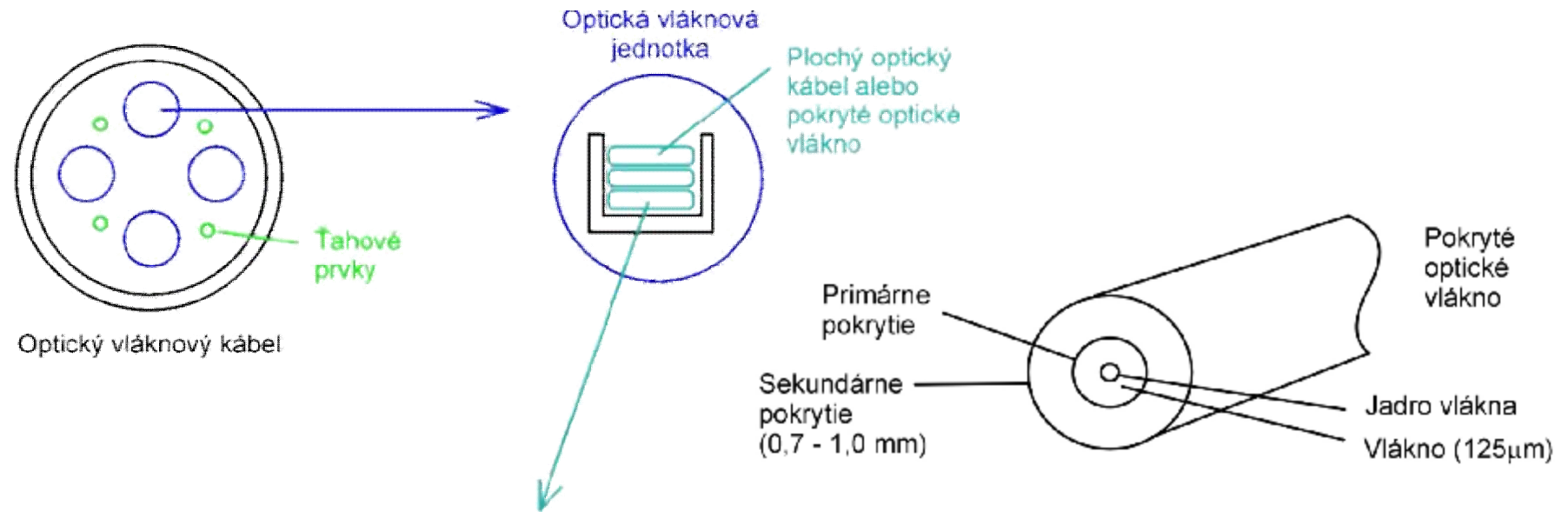
Optický kábel pozostáva z

- Optických vlákien
- Žíl s kovovými vodičmi
- Nosných a ťahových prvkov
- Výplňových a obalových vrstiev

Typy optických káblov

- Jednotlivé optické vlákna
- Ploché optické káble

Optické káble s optickou vláknovou jednotkou



Zdroje optického žiarenia

Zdroje (svetla) žiarenia

- .. **Širokopásmový** - žiarovky, výbojky a pod.
- .. **Úzkopásmový** - čiastočne monochromatický - **LED**
- .. **Monochromatický** - plynový, polovodičový, tuholátkový, farbivý či chemický **laser**

Vlastnosti zdrojov žiarenia

- .. **Geometrické** vlastnosti emitovaného svetla
- .. **Spektrálne** vlastnosti emitovaného svetla
- .. **Elektro-optické** prenosové charakteristiky
- .. **Vplyv okolitého prostredia**

Hlavné požiadavky optických vláknových komunikačných systémov (OVKS):

- Čo najväčšia účinnosť konverzie
- Malé rozmery a hmotnosť
- Jednoduchá modulovateľnosť
- Vysoká monochromatickosť
- Generácia svetla
- Čo najužšia smerová charakteristika
- Jednoduché naviazanie generovaného svetla
- Teplotná stabilita
- Vysoká spoľahlivosť
- Nízka cena

Týmto požiadavkám **najlepšie vyhovujú**: polovodičové lasery (**LD**), svetloemitujúce diódy (**LED**) a tuholátkové lasery **Nd:YAG**, resp. **Nd:sklo** čerpané pomocou **LED**

LED

Svetloemitujúce diódy (**LED – Light Emission Diode**)

nekoherentné zdroje svetla

n **Hlavné nevýhody**

- .. Malý optický výkon ($\sim\mu\text{W}$)
- .. Malá šírka modulačného pásma (50MHz)
- .. Harmonické skreslenie signálu

n **Výhody**

- .. Jednoduchšia výroba
- .. Nižšia cena
- .. Väčšia spoľahlivosť a životnosť
- .. Menšia teplotná závislosť
- .. Jednoduchšie budiace a modulačné obvody
- .. Linearita výstupnej charakteristiky

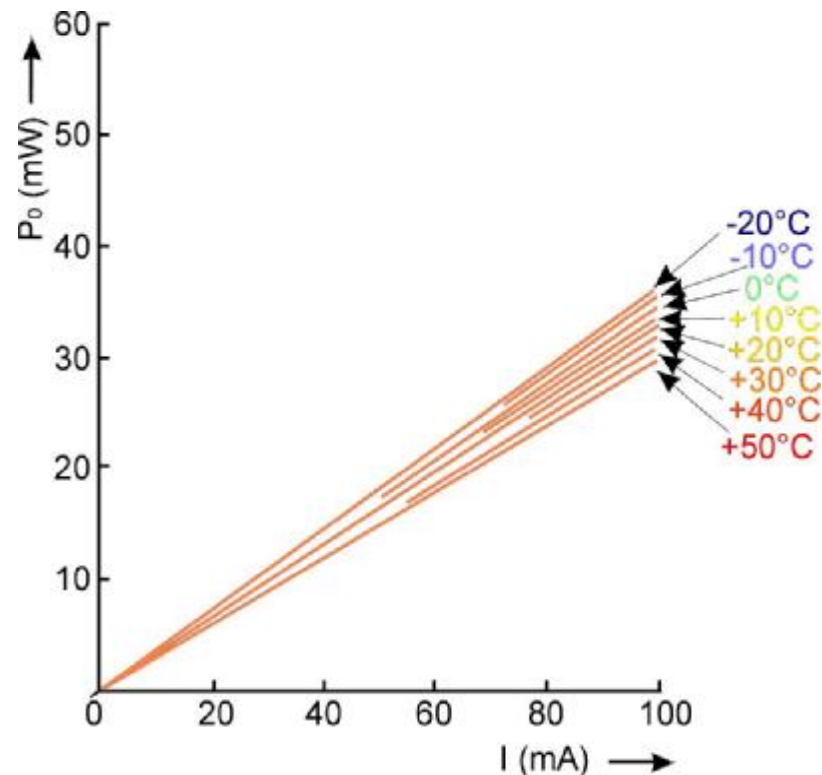
Intenzita vyžarovania v smere θ

Lambertova vyžarovacia charakteristika

$$n \quad I(q) = I_0 \cos^m q$$

m je parameter zoštíhlenia charakteristiky

Výstupná charakteristika LED



Vonkajšia výkonová účinnosť

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

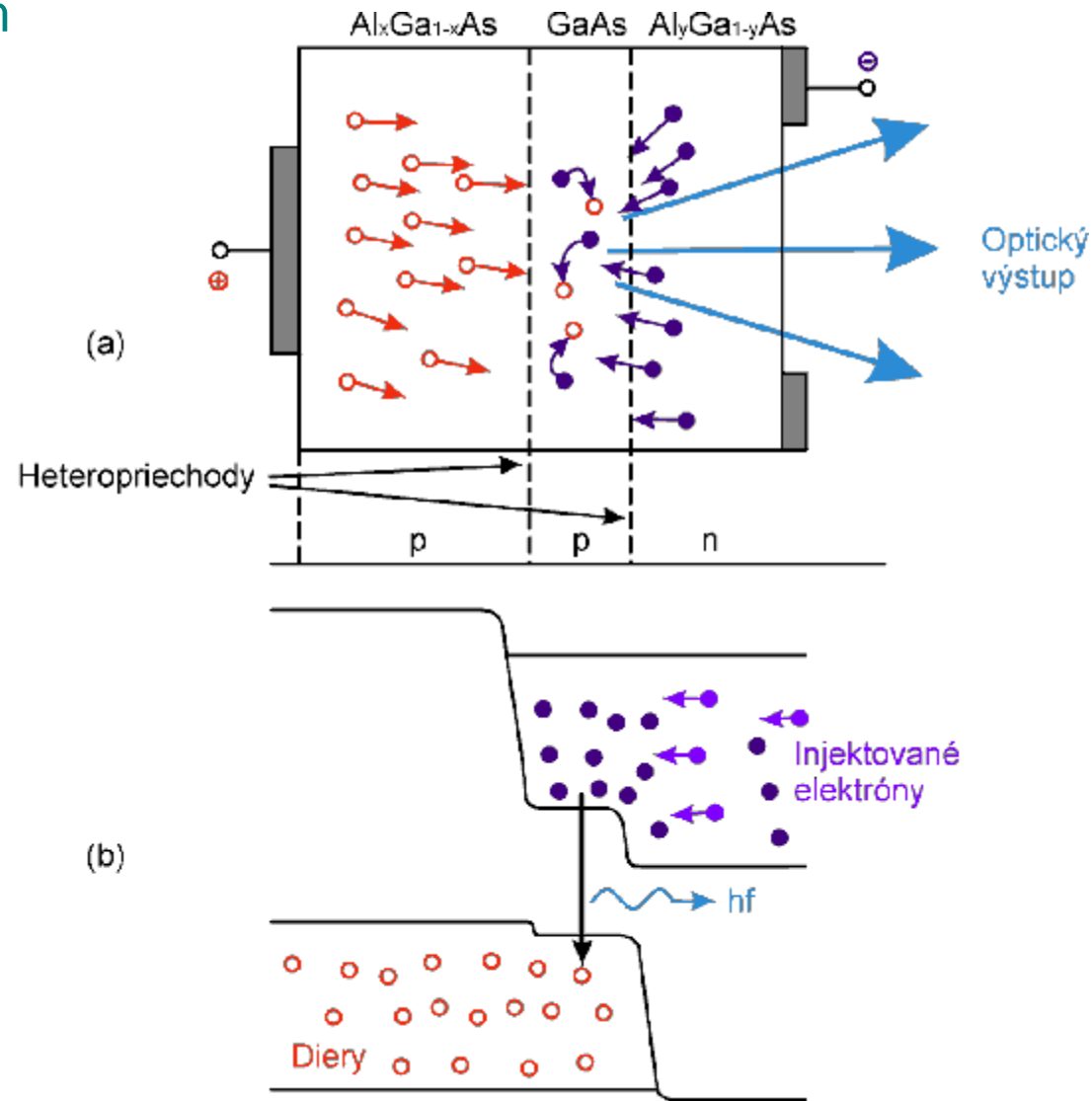
Emitovaný optický výkon

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

P_{int} – vnútorne generovaný optický výkon

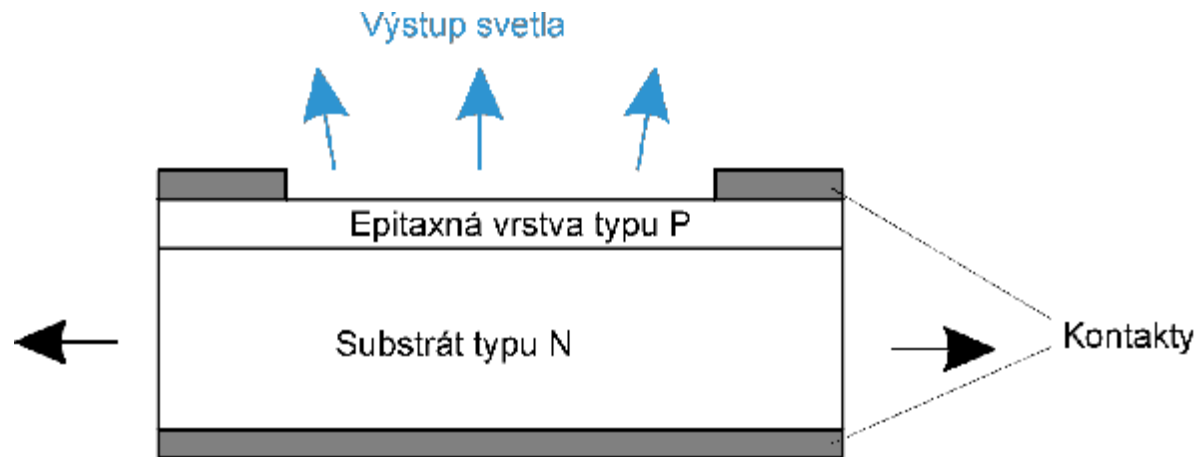
F – koeficient prechodu rozhrania

LED s dvojitou heteroštruktúrou : (a) štruktúra vrstiev; (b) energetický diagram

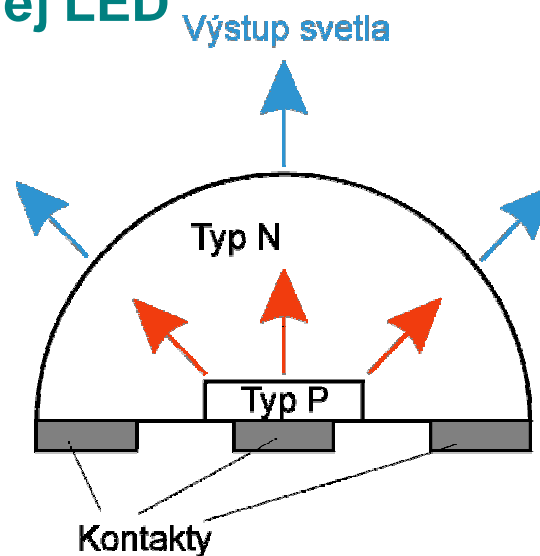


Povrchovo emitujúca dióda (Burrusova dióda)

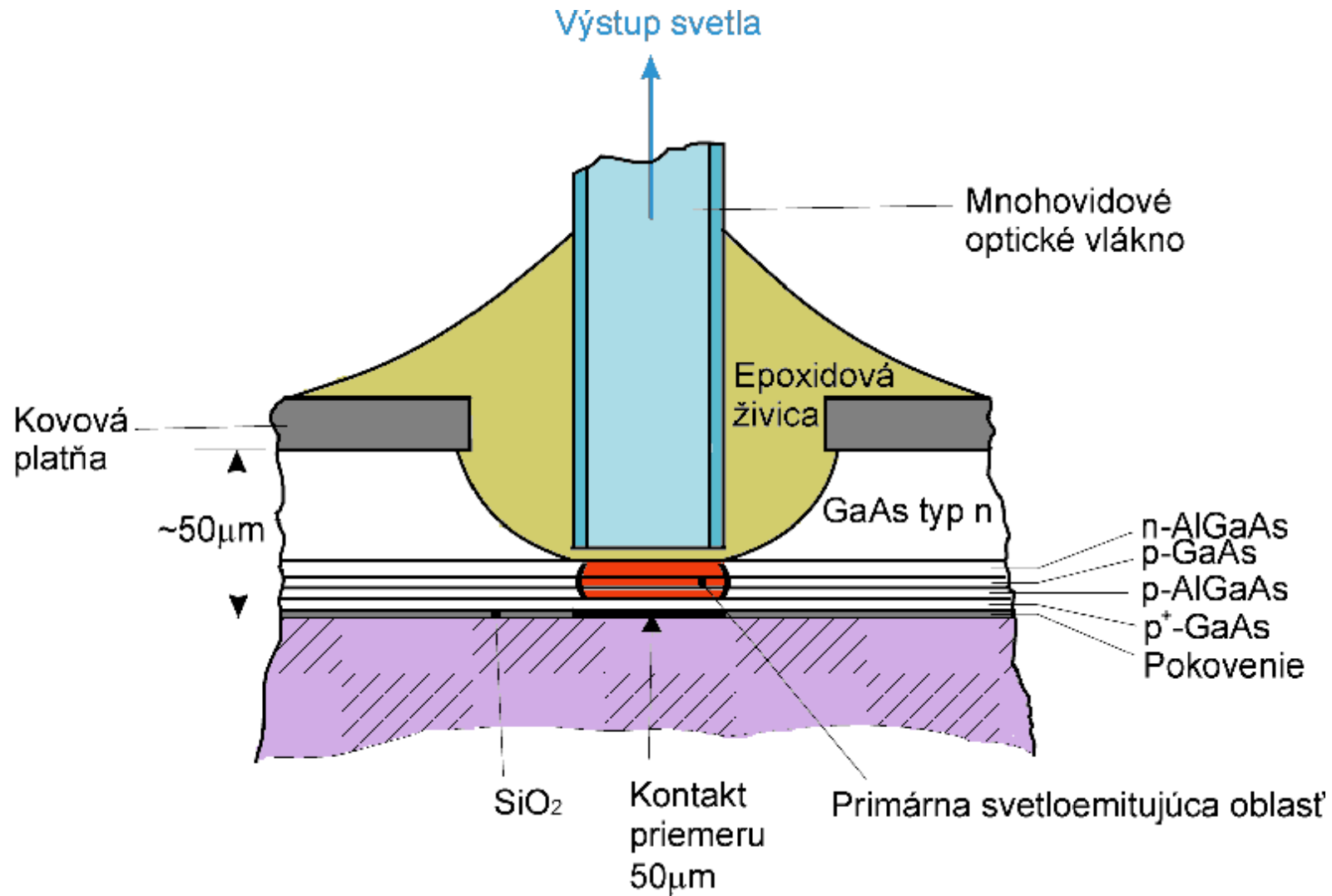
Štruktúra planárnej LED vyžarujúcej zo všetkých povrchov



Štruktúra signalizačnej LED

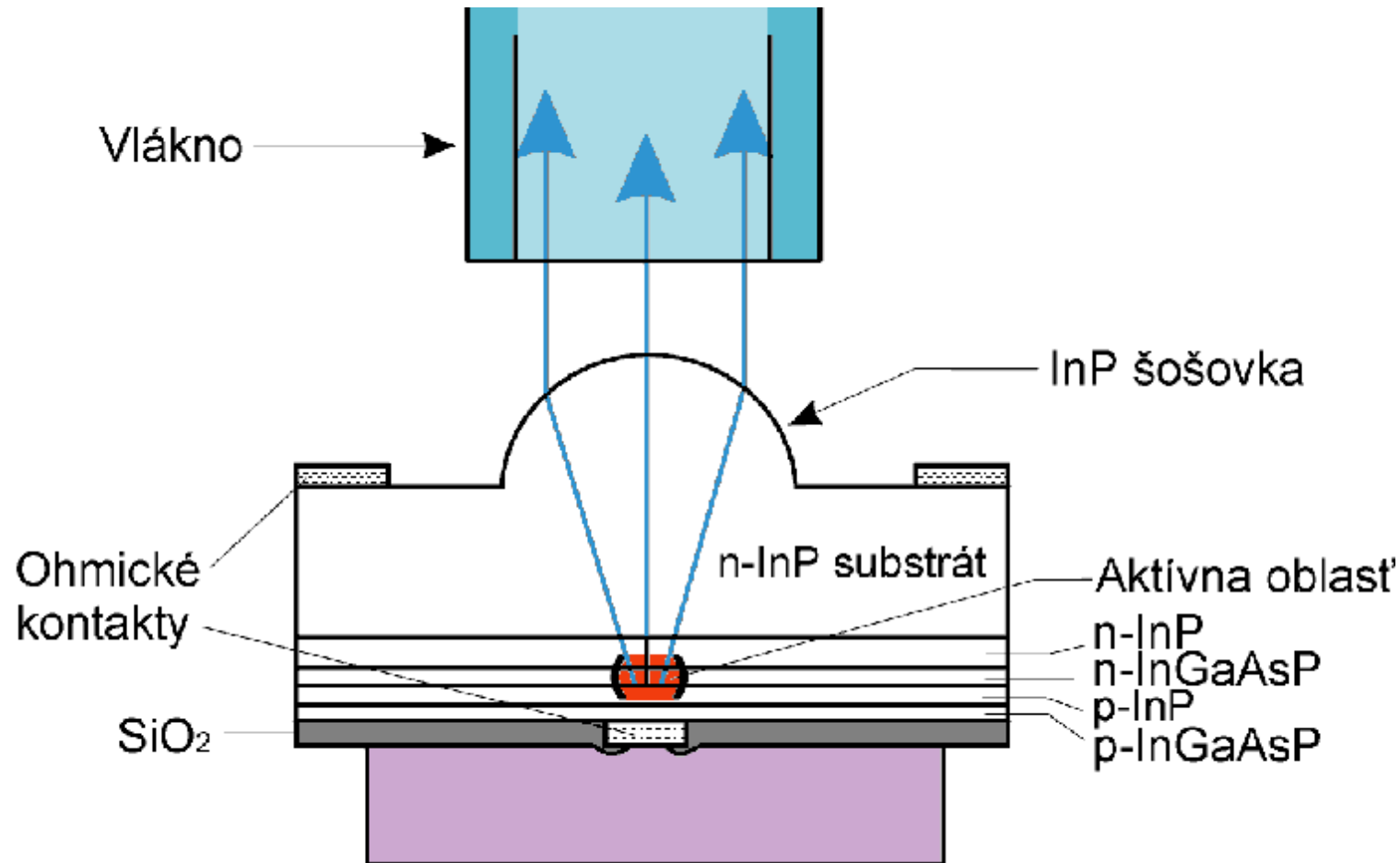


AlGaAs Burrusova dióda

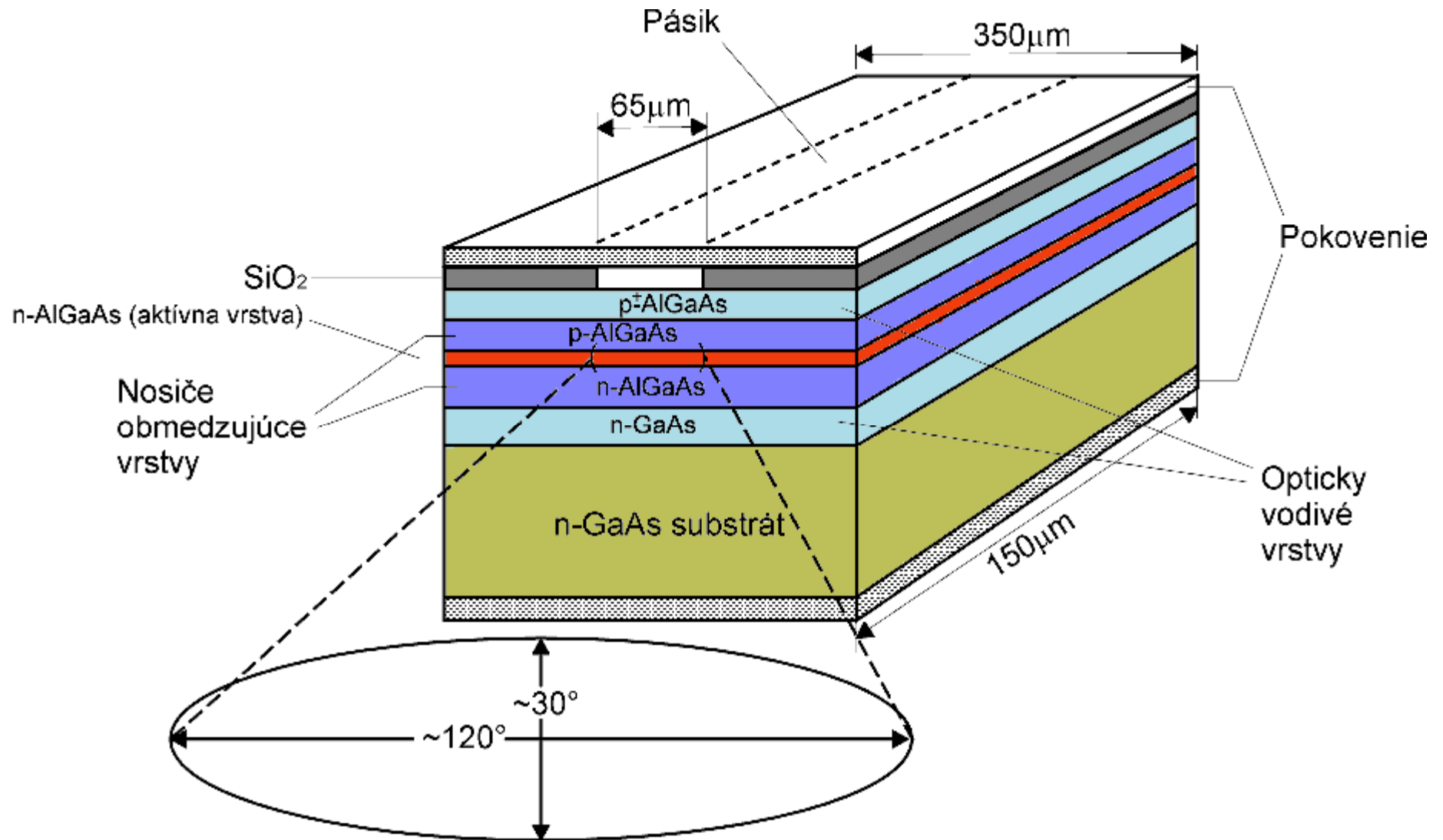


Hranove emitujúca dióda

Naviazanie **LED** zaoblením emitujúceho povrchu v tvare tzv. integrovanej mikrošošovky



Štruktúra AlGaAs hranovo emitujúcej LED



Svietivosť LED

- .. **Štandardná** (3 až 30mcd pri 10mA)
- .. **So zvýšenou svietivosťou** (100 až 1000mcd pri 20mA)
- .. **S vysokou svietivosťou**, tzv. **HB LED** (**High Britness LED**), ($\geq 1000\text{mcd}$ pri 20mA)

Šírka spektrálnej čiary LED

- .. 0,8 až 0,9 μm – od 25 do 40 nm
- .. 1,1 až 1,7 μm – od 50 do 100 nm

Šírka spektrálnej čiary a jej poloha závisí tiež aj od **koncentrácie a druhu dopovania aktívnej oblasti**

Spektrum vyžarovania LED

Materiál LED	Oblasť vyžarovania
AlGaAs	Červená, infračervená
AlGaP	Zelená
AlGaInP	Oranžová, žltá, zelená
GaAsP	Červená, oranžová, žltá
GaP	Červená, žltá, zelená
GaN	Zelená, modrá, biela
InGaN	Blýzka ultrafialová, zelená, modrá
SiC	Modrá
Si	Modrá
Al ₂ O ₃ - zafír	Modrá
ZnSe	Modrá
C - diamant	Ultrafialová
AlN, AlGaN, AlGaInN	Ultrafialová, pod 210 nm

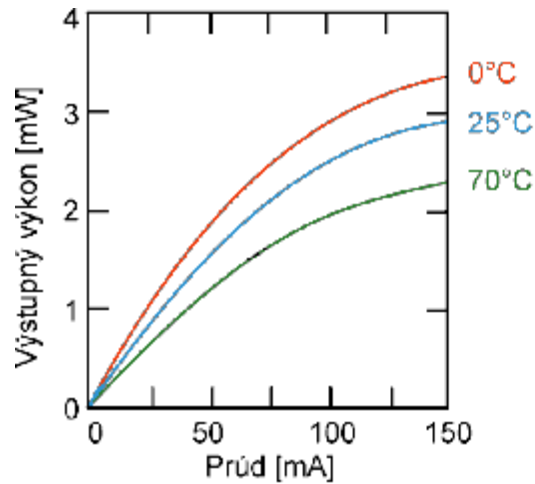
Frekvenčné pásmo

- Komerčne dostupné **LED** ~100MHz
- AlGaAs/GaAs ~300 MHz

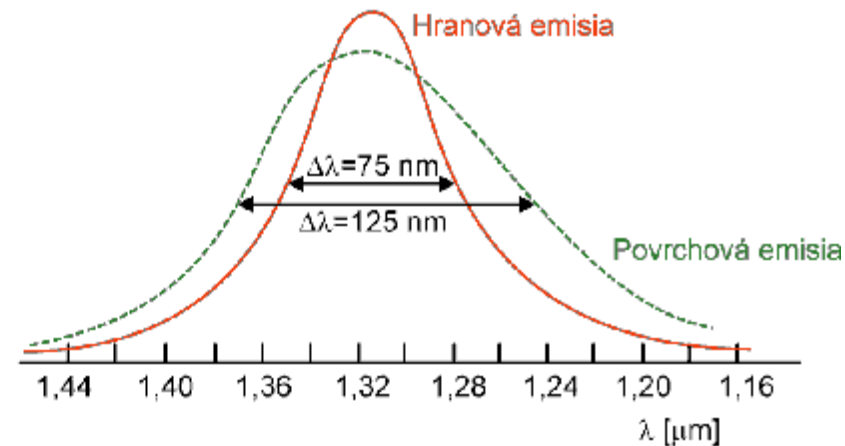
Čas života

- Povrchovo emitujúce **LED** - 10⁶ až 10⁷ hod
- **LED** na báze AlGaAs a viac - 10⁹ hod

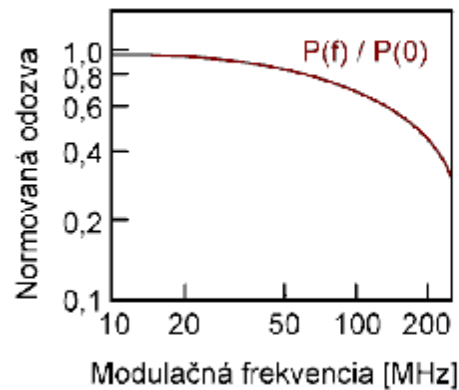
Charakteristiky InGaAsP LED: (a) vyžarovaný optický výkon, (b) spektrální krivka, (c) modulační charakteristika, (d) impulzná odozva



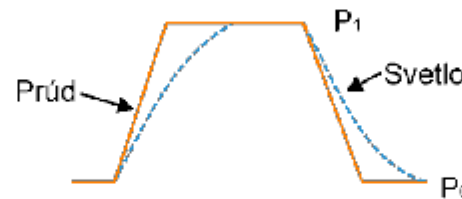
(a)



(b)



(c)



(d)

Polovodičový laser

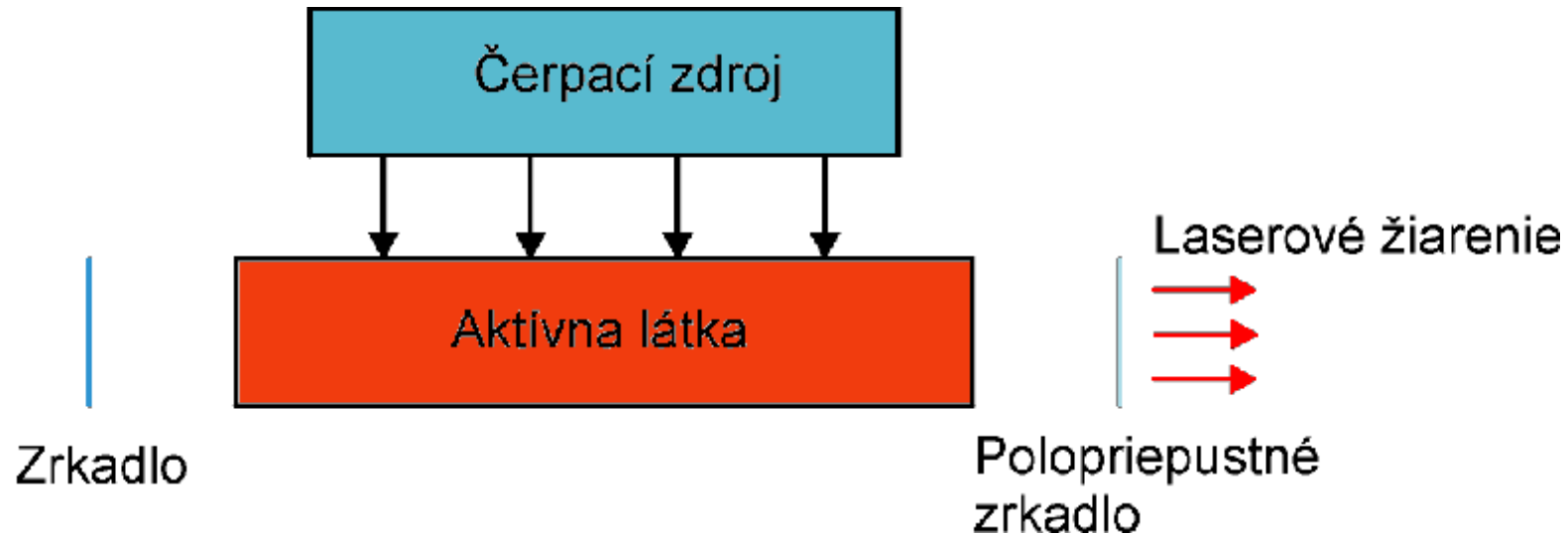
Laser

- .. Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
- .. Umiestnenie aktívnej látky do optického rezonátora
Fabryho–Perotove interferometre

n Typy

- .. Tuholátkové
- .. Polovodičové
- .. Plynové
- .. Kvapalinové
- .. Iné

Schéma lasera



Metódy opisu lasera

- .. **Metódy kvantovej mechaniky**
- .. **Metódy kvantovej elektrodynamiky**

Vlastnosti polovodičového lasera

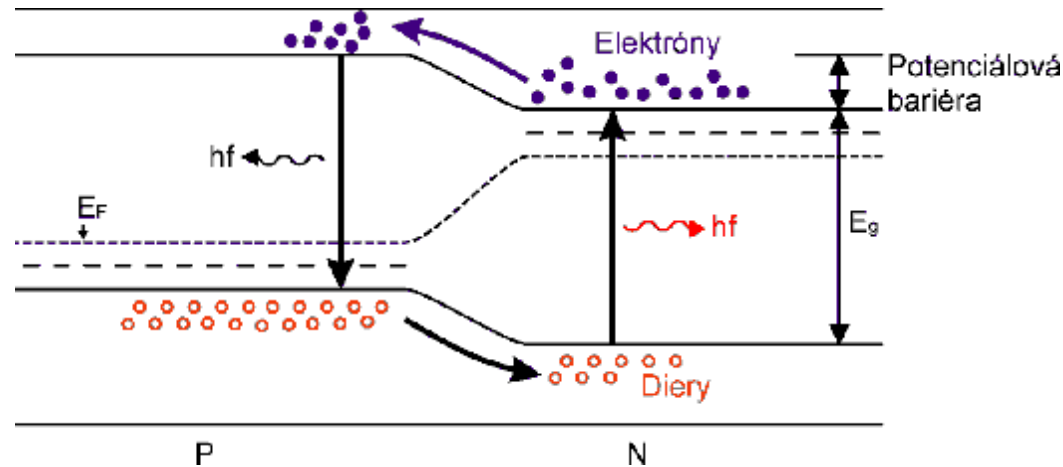
- .. Prechody medzi energetickými pásmami
- .. Veľká závislosť priestorových a frekvenčných charakteristík emitovaného žiarenia
- .. Použitý materiál
- .. Teplota
- .. Divergencia laserového lúča
- .. Šírka odsatej vrstvy závisí od priechodu **PN**

Spontánna emisia (elektroluminiscencia)

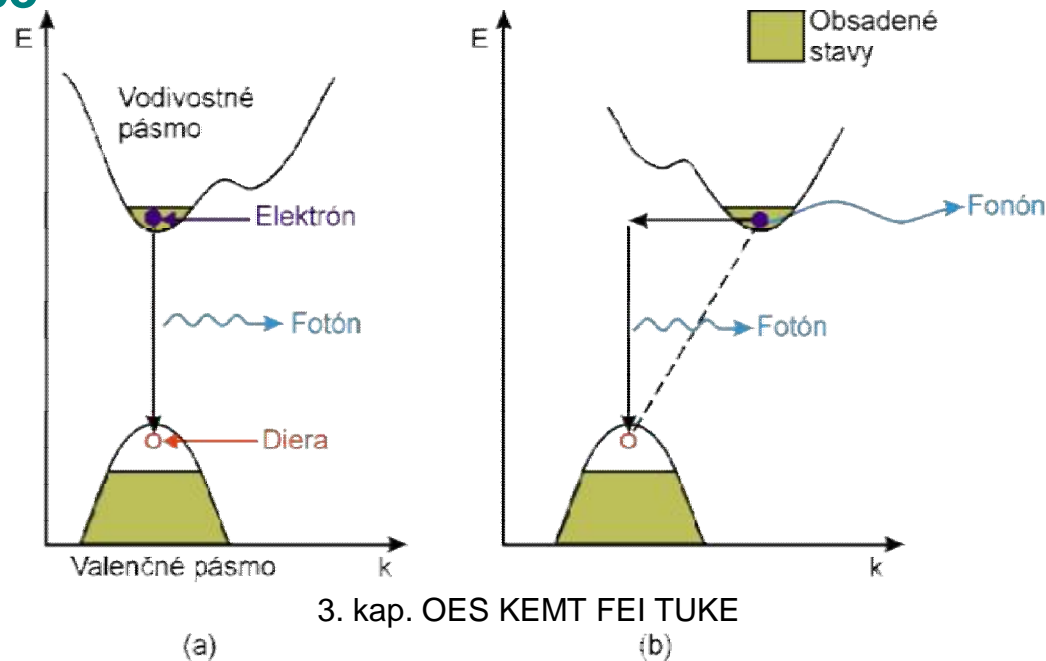
$$n E_g \approx hn$$

E_g je **šírka zakázaného pásma**

Spontánna emisia fotónov na priechode PN



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



Inverzia populácie hladín

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

E_{F_c} a E_{F_v} je poloha zdanlivej Fermiho hladin

E_g je šírka zakázaného pásma

Injekcia nosičov – budením PN

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

Prahový zisk v aktívnej látke

$$n \quad g_{th} = a + \frac{1}{2L} \ln \frac{1}{R_1 R_2}$$

γ – koeficient zosilnenia

Prúdová hustota

$$n J = \frac{J_{nom} d}{h}$$

Zmena zisku

$$n g = \frac{g_0}{J_0} (J_{nom} - J_0)$$

Faktor vyplnenia (využitia) vidu G

$$n \Gamma g = a + \frac{1}{L} \ln \left(\frac{1}{R} \right)$$

$$R = \sqrt{R_1 R_2}$$

Prahová prúdová hustota

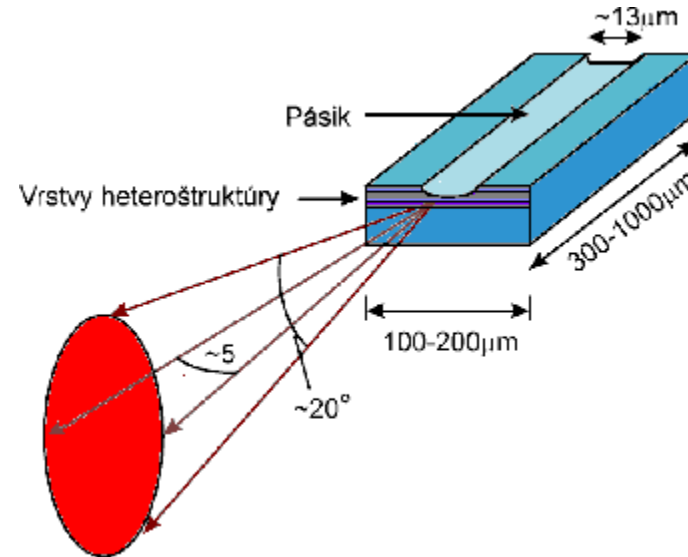
$$n J_{th} = \frac{J_0 d}{h} + \frac{J_0 d}{h \Gamma g} \left[a + \frac{1}{L} \ln \left(\frac{1}{R} \right) \right]$$

Zníženie hodnoty hustoty prahového prúdu lasera J_{th} – zväčšením η , Γ , L a R a súčasne zmenšením hodnoty d a α

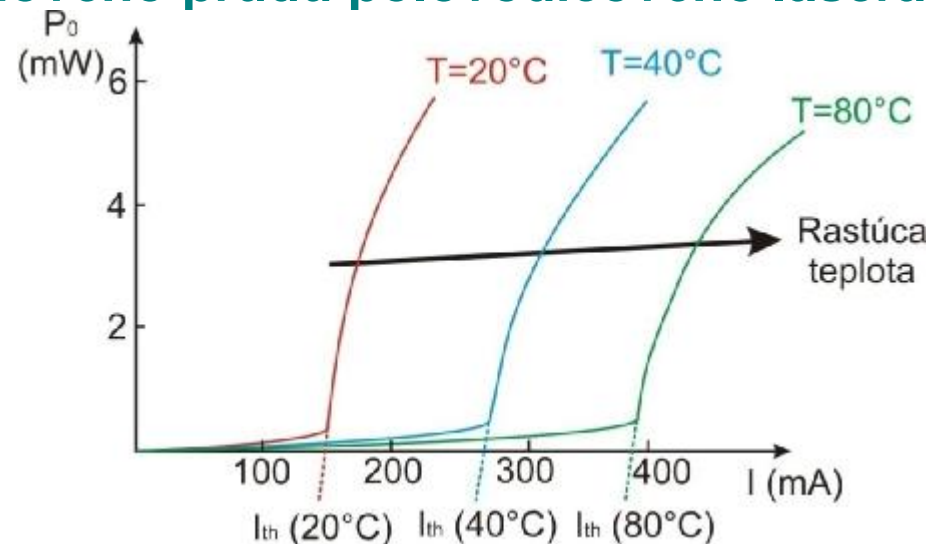
Súčasný polovodičový lasery

- .. **Technológia dvojitého heteropriechodu s rozšíreným optickým vlnovodom a pásiková štruktúra hornej budiacej elektródy**
- .. Výstupný optický výkon 0,1-100 mW
 - n v impulznom režime až 100 W pri šírke impulzu 100 ns
- .. Doba nábehu 1ns
- .. **Aplikácie:** optické komunikačné systémy, tlačiarne, čítače čiarového kódu, čerpanie iných laserov, atď.

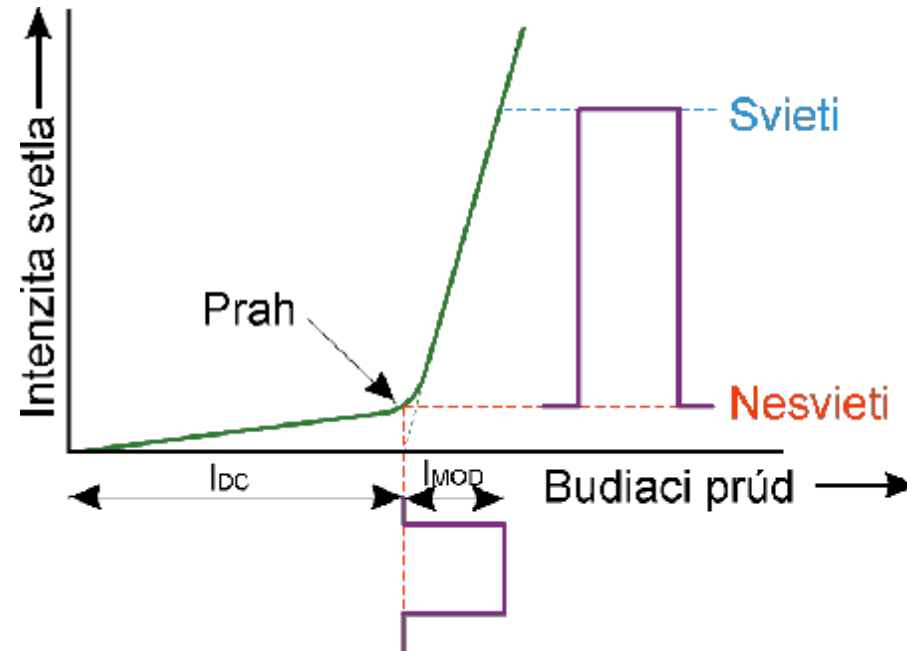
Konštrukcia polovodičového lasera s pásikovou štruktúrou



Závislosť prahového prúdu polovodičového lasera od teploty



Modulácia polovodičového lasera



Diferenciálna externá kvantová účinnosť

$$n h_D = \frac{\frac{dP_0}{dn}}{e} = \frac{e dP_0}{hn dI} \approx \frac{dP_0}{E_g dI}$$

Vonkajšia výkonová účinnosť

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

Prahový prúd vzrastá s rastúcou teplotou

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

T – teplota lasera, K – konštanta, T₀ – teplotný koeficient prahu lasera

- .. **AlGaAs** lasery – T₀ od 95 do 160 K
- .. **InGaAsP** – T₀ od 40 do 75 K
- .. Hustota prahového prúdu od 20 °C do 80 °C vzrastie pre **AlGaAs** lasery 1,5-krát a pre **InGaAsP** lasery až 3-krát

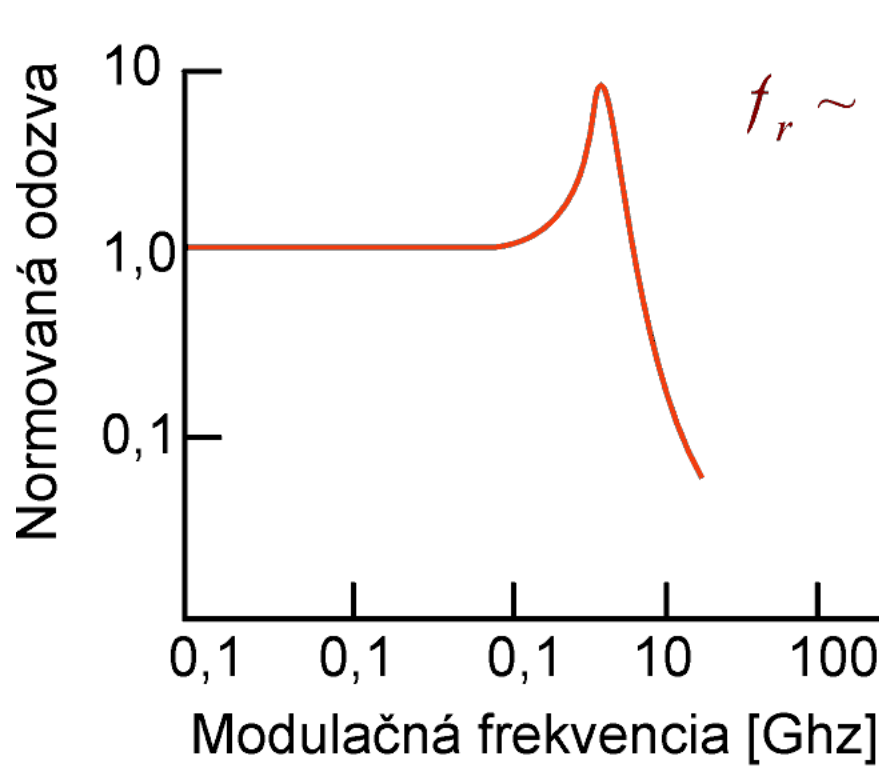
Pri pôsobení budiaceho prúdového impulzu na laser vzniká

- **Oneskorenie zopnutia** – sprevádzané relaxačnými kmitmi
- **Predbudením lasera** – redukcia oneskorenia zopnutia
- **Jednofrekvenčný laser** – utlmenie relaxačných kmitov
- **Fluktuácie intenzity** – v kontinuálnom režime práce

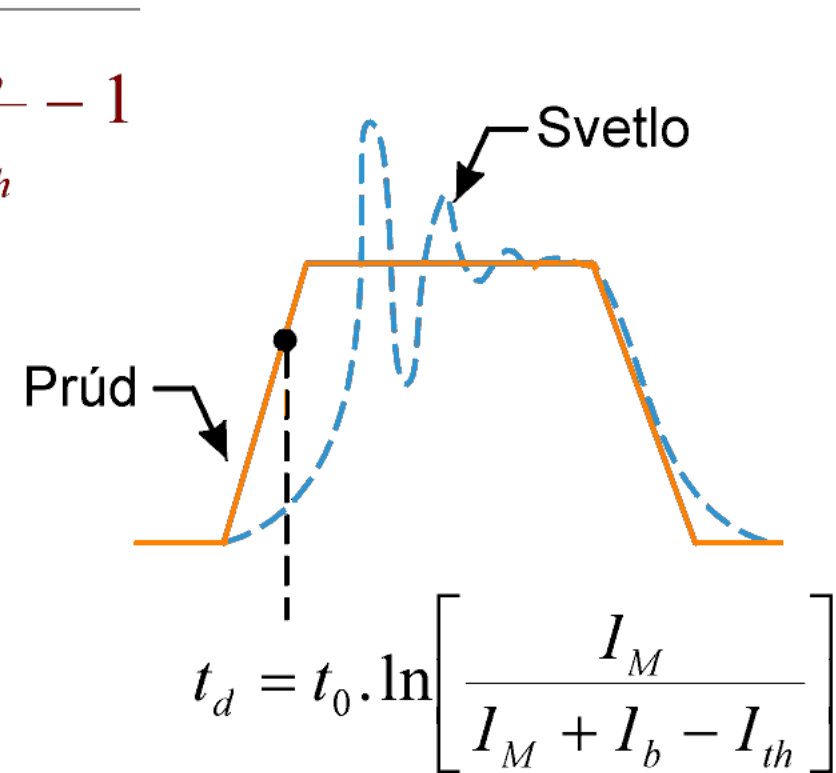
Charakteristiky polovodičového lasera

- **Šumové vlastnosti**
- **Zdroje šumu**
 - n **Kvantový šum**
 - n **Nestabilita práce lasera**
- **Odras svetla späť do lasera**
- **Rozdeľovací (distribučný) šum**

Modulačná charakteristika polovodičového lasera (a),
impulzná odozva (b)



(a)



(b)

Jednofrekvenčný laser ≠ Jednovidový laser

Jednofrekvenčné polovodičové lasery

- .. Lasery s rozloženým Braggovým reflektorom –
DFB (Distributed Feed Back)
- .. Dynamický laser s prahovým reflektorom –
DBR (Distributted Bragg Reflector)
- .. **Spoľahlivosť'**
 - n Javy vedúce k poruchám funkcie lasera
 - .. Deštrukcia
 - .. Postupná degradácia
- .. **Vznik tmavých čiar** vo výstupnom spektre lasera
- .. Zdokonalené metódy pasivácie zrkadiel – vzrast strednej doby života (**GaAs/AiGaAs** na viac ako
- .. 10^6 hod, **InGaAsP/InP** okolo 10^5 hod)

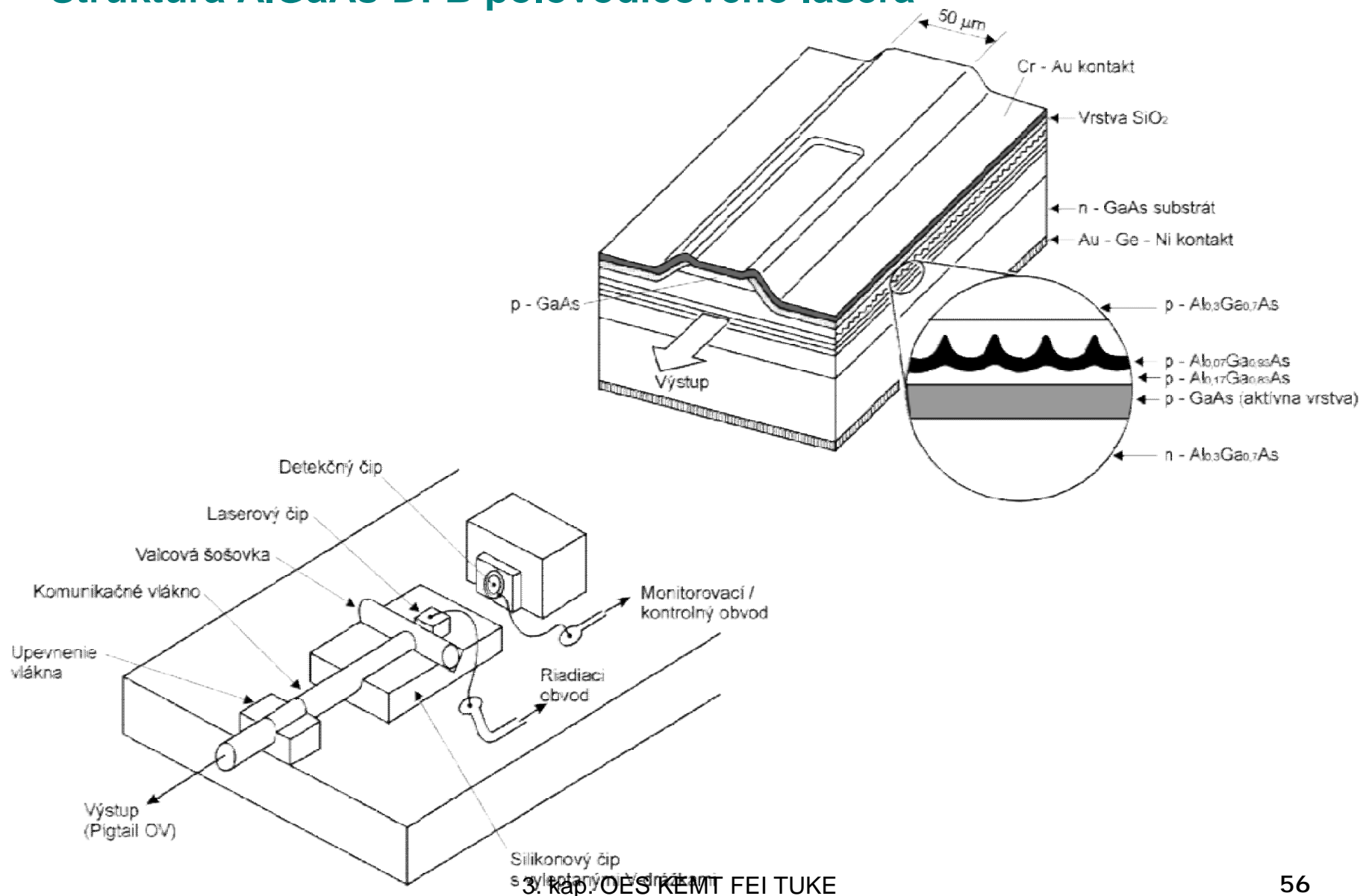
Laserové moduly obsahují

- .. Laserový čip (FP, DFB, VCSEL)
- .. Interný, resp. externý modulátor
- .. Chladiacu podložku vystrojenú termistorom
- .. Peltierový (termoelektrický (TE)) chladiaci prvok
- .. Optický izolátor
- .. Pigtail
- .. Monitorovaciú fotodiódu

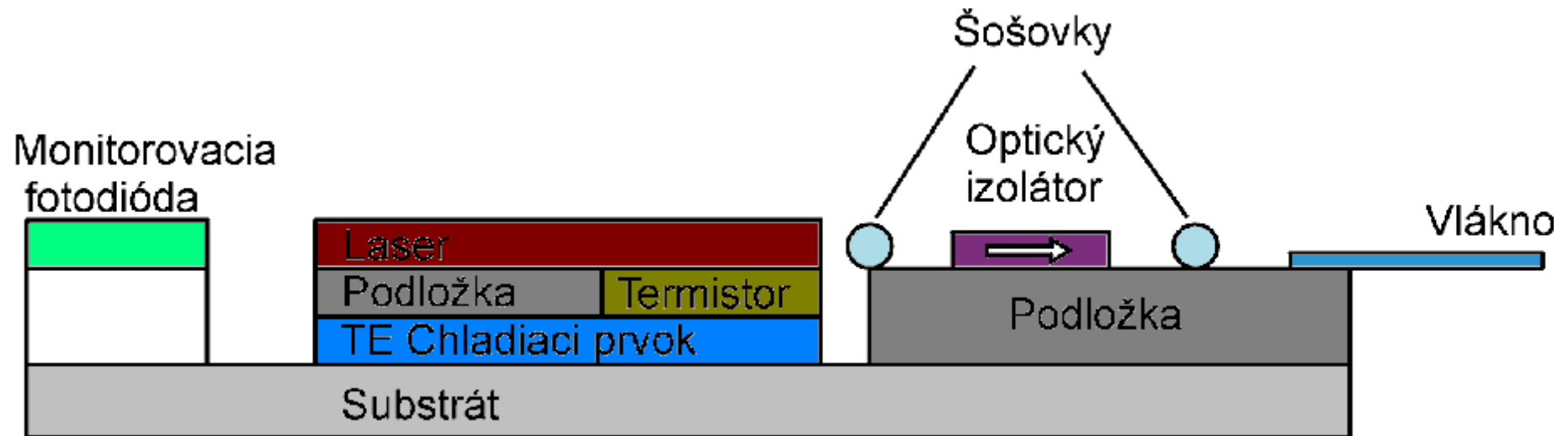
Pracovné charakteristiky LD

- .. Vlnová dĺžka od 1300 nm do 1555 nm
- .. Teplotný rozsah od -40 do 65 °C
- .. Prenosové rýchlosti od 1 do 40 Gb/s

Štruktúra AlGaAs DFB polovodičového lasera



Bloková schéma laserového modulu pre OVKS



Klasické(tepelné) zdroje svetla

Zdroje svetla, ktoré vyžarujú elektromagnetickú energiu v priamej súvislosti s ich teplotou

- **Čierne žiariče**
- **Čiarové žiariče**

Rýchlosť emitovanej energie

$$n \quad W = \sigma T^4$$

W – celkový vyžiarený výkon na jednotku plochy, σ – **Stefanova konšta**

Stefanov-Boltzmanov zákon – platí presne len pre ideálne absolútne čierne teleso

Vyžarovanie teplých povrchov

$$n \quad W = \varepsilon S T^4$$

ε – emisivita povrchu

Wienov zákon

$$n \quad \lambda_m T = \text{konšt.}$$

λ_m – vlnová dĺžka maxima

Planckov vzťah

$$n \quad W_f = \frac{2phf}{c^3} \left[\frac{1}{\exp(hf / kT) - 1} \right]$$

W_f – spektrálna žiarivosť

Kvantová podstata svetla – fotóny

– základ modernej kvantovej teórie svetla

Bohrov model atómu – diskkrétne dovolené energetické hladiny elektrónov

$$n \quad E_n = -\frac{mZ^2R^4}{8n^2h^2e_0^2}$$

n – hlavné kvantové číslo

Kvantum žiarenia – fotón

$$n \quad \Delta E = hf = \frac{hc}{l} = \mathbf{hw}$$

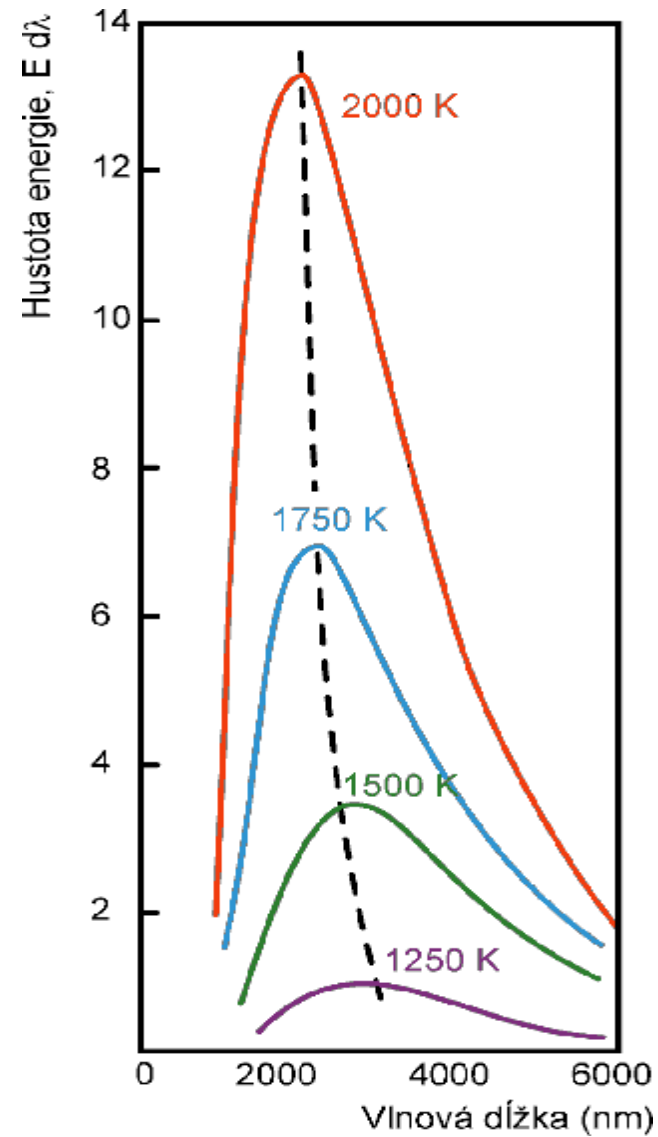
Čiarový (diskrétny) charakter emitovaného žiarenia

$$n \quad f = \frac{\Delta E}{h} = \frac{me^4 Z^2}{8h^3 e_0^2} \left(\frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right)$$

Šírka spektrálnej čiary

- Heizenbergov princíp neurčitosti
- **Prirodzená šírka spektrálnej čiary**
- Starkov jav
- Zeemanov jav
- Dopplerov jav

Distribúcia energie v spektre žiarenia absolútne čierneho telesa pri rôznych teplotách



VCSEL

VCSEL (Vertical Cavity Surface Emitting Laser)

- n Vertikálne orientovaný Fabryho – Perotový rezonátor
- n **Braggové zrkadlá - DBR (Distributed Bragg Reflector)**
 - Veľká odrazivosť zrkadiel (až 99%)
- n Aktívna oblasť s jednou, resp. viacerými kvantovými jamami
- n **Kvantová jama (QW –Quantum Well)** – tenká oblasť aktívneho polovodiča – **50 až 100 angstromov, t.j. 5 až 10 atómových vrstiev**
- n **Hodnota výstupného výkonu je od 1 do 5 mW**
- n **Hustota výstupného výkonu vysoká až 30 kW/cm²**

n **Výhodné vlastnosti VCSEL**

- .. Jednotlivé fázy technológie výroby môžu byť jednoducho kontrolované
- .. Výstupné laserové žiarenie má veľmi dobrú kruhovú symetriu
- .. Menší prahový prúd a menšia spotreba
- .. Možnosť nastavenia generovanej vlnovej dĺžky
- .. **Možnosť vytvárať 1D, resp. 2D, maticové laserové štruktúry**
- .. **Možnosť realizovať miniatúrne nano-lasery**

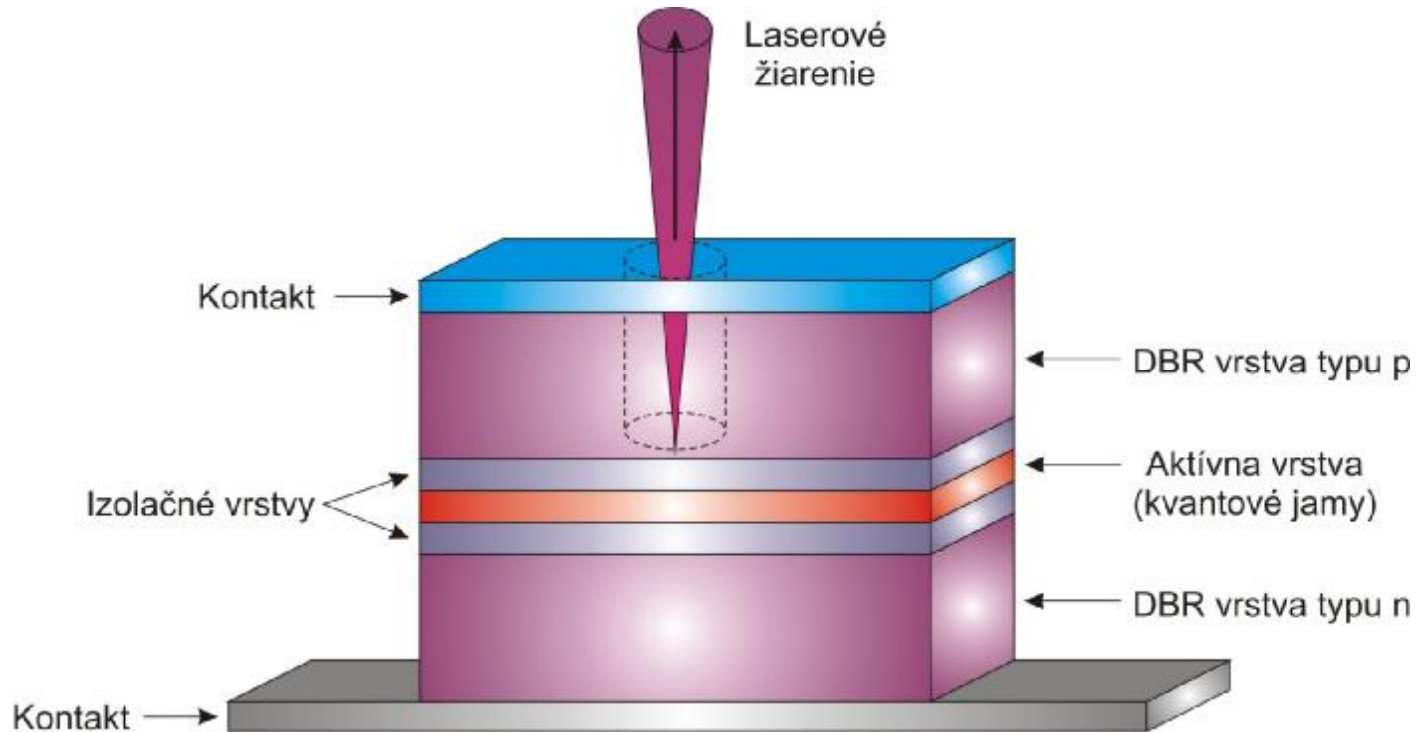
n **Aplikácie VCSEL**

- .. Širokopásmové analógové prenosy
- .. Laserové tlačiarne
- .. Laserová absorbčná spektroskopia
- .. Prepínače

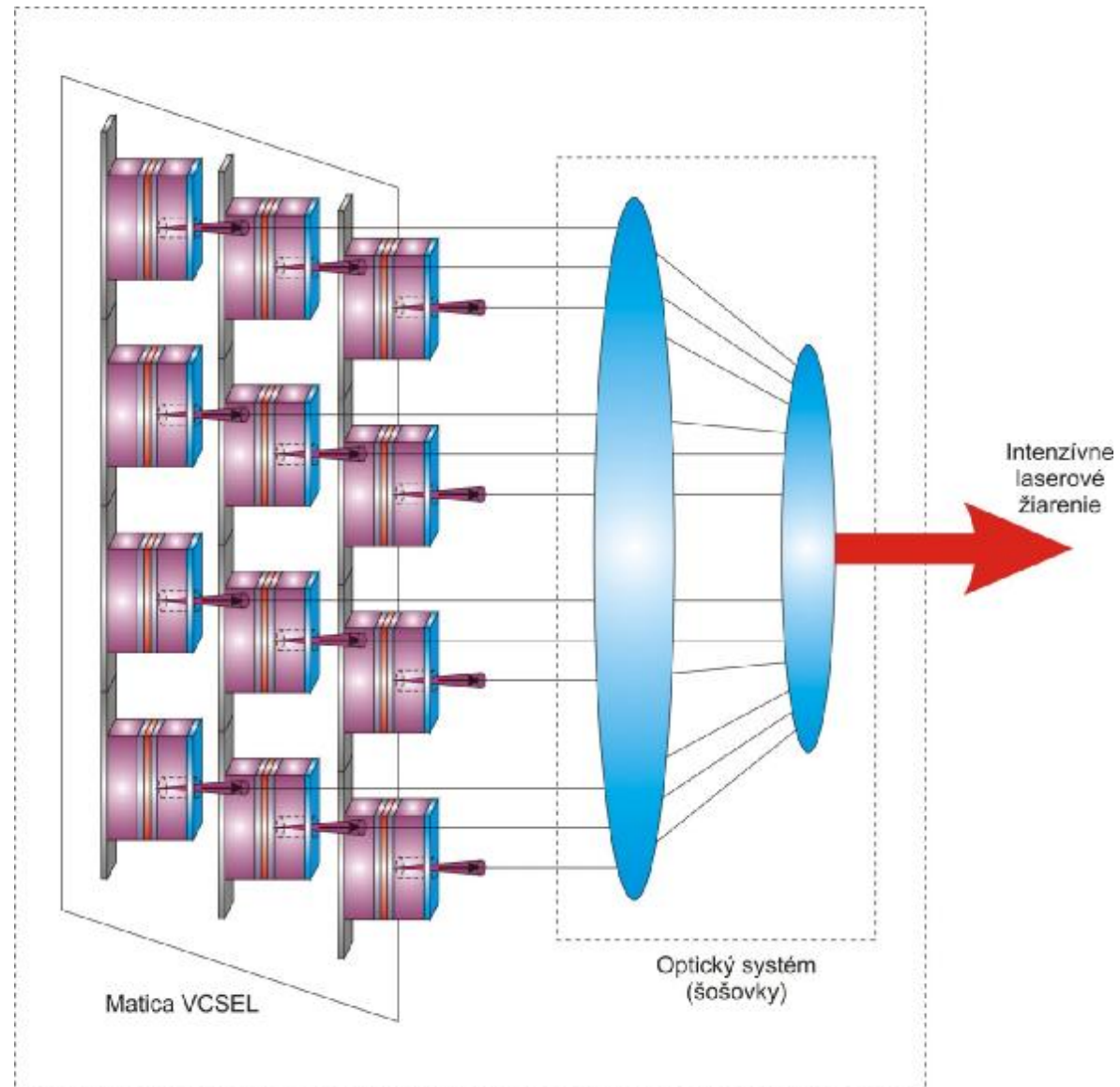
n **Špeciálne formy**

- .. V širokom pásme preladiateľné VCSEL
- .. VC SOA (Vertical Cavity Semiconductor Optical Amplifier)

Štruktúra VCSEL



Matica VCSEL



Osvetľovacie LED

n Výhody

- Dlhá životnosť
- Malá spotreba elektrickej energie (0,5 – 5 W v závislosti od počtu požitých LED)
- Málo vyžarovaného tepla
- Životnosť nezávisí od počtu zopnutí
- Rovnomerná intenzita vyžarovania počas celej životnosti
- Odolnosť voči otrasom

n Aplikácie

- Automobilová technika
- Osvetľovanie letísk, atď.

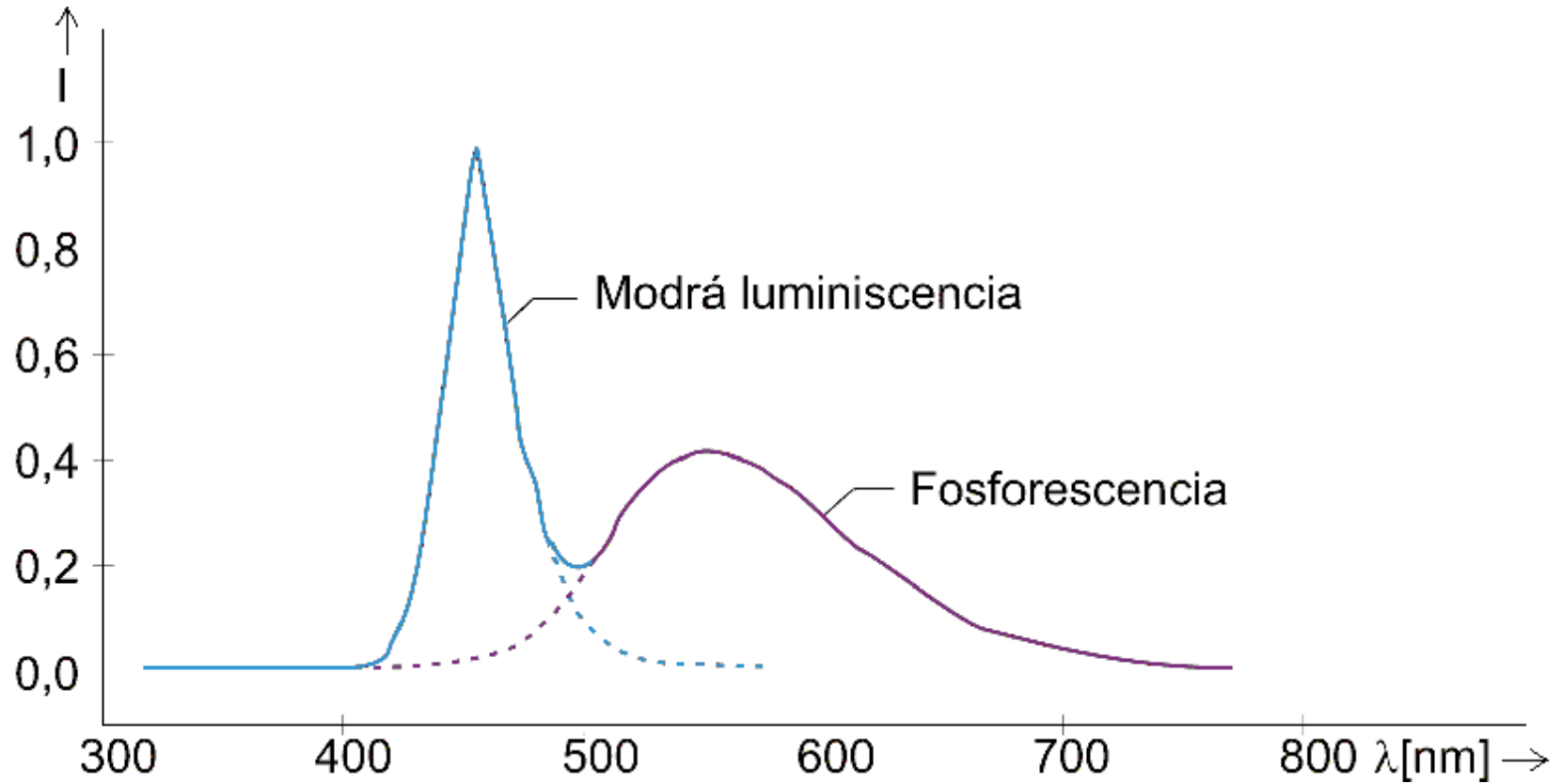
n **Biele LED**

- RGB LED
- Fluorescenčné LED – zmena vlnovej dĺžky z vysokosvietivej modrej LED

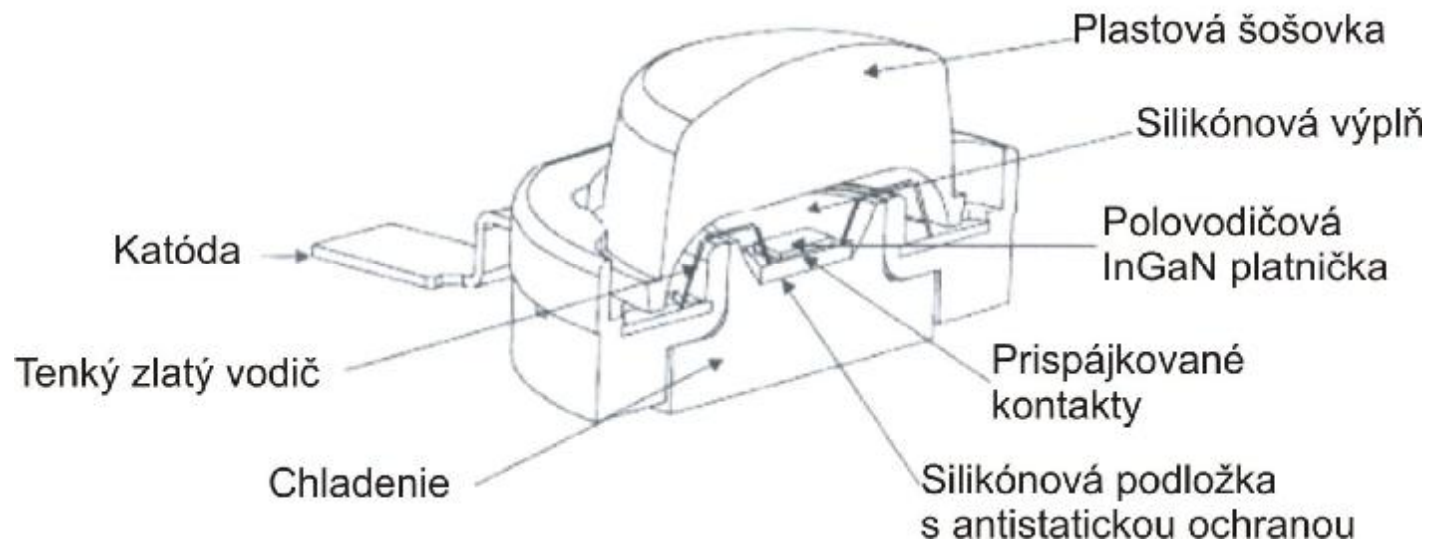
Moderné LED – InGaN/GaN

- n Svetlo konvertované luminoforom na báze **Ce³⁺:YAG** (Itrium Aluminium Garnet)
- n Dojem bieleho svetla, s modrastým až zelenkastým nádychom (**Lunar White**)
- n Náhrada Ceria: Terbium, Gadolínium
- n Náhrada Al: Galiumom
- **LED** emitujúca v blízkej ultrafialovej oblasti spektra pokryté fosforeskujúcim materiálom (Európium a Cu, Al dopovaný ZnS)
- Veľký výstupný výkon ($\geq W$) – pri budiacich prúdoch nad 350 mA
- **Konverzná účinnosť bielych LED – okolo 159 lm/W**

Spektrum bielej LED



Konštrukcia bielej LED



Fotodetektory

- q **Tepelné detektory** – využívajú energetické (tepelné) účinky detekovaného žiarenia
- q **Fotonické detektory** – využívajú jav vonkajšej a vnútornej fotoemisie

Požiadavky pre OVKS

- Vysoká citlivosť
- Malé skreslenie
- Veľká elektrická odozva
- Krátka doba nábehu impulzu
- Vysoká teplotná stabilita
- Minimálny šum
- Malé rozmery
- Vysoká spoľahlivosť
- Nízka cena

Najlepšie vyhovujú fotodiódy **PIN**, lavínové fotodiódy – **APD**

PIN fotodióda

- n Odsatá vrstva – relatívne silné vnútorné elektrické pole
- n Absorpcia fotónu spôsobí separáciu fotonosičov – detekovateľný elektrický náboj

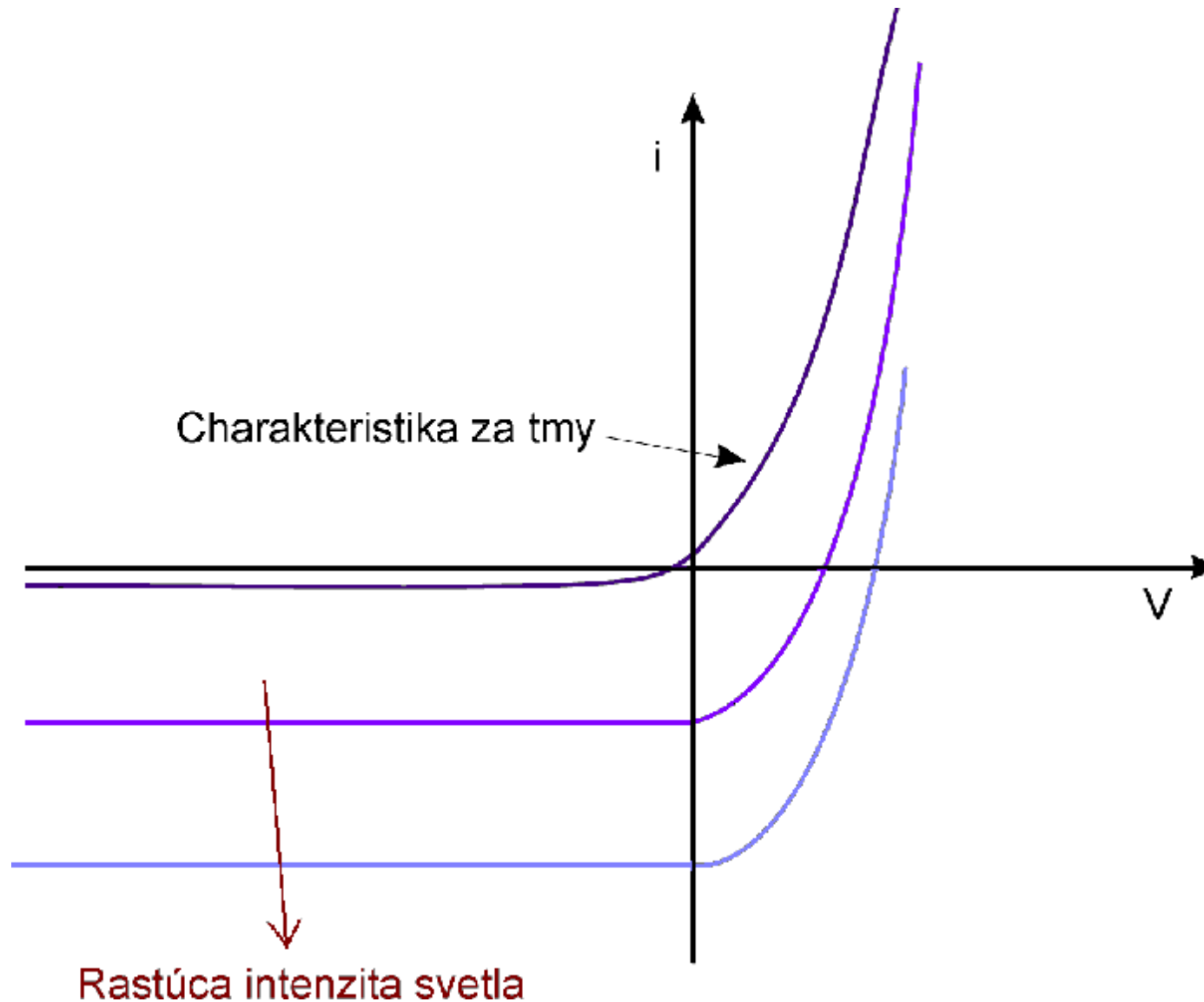
n Detekcia elektrického náboja

- .. Fotodetektor zapojený do otvoreného obvodu – na vývodoch oblastí P a N merateľný elektrický potenciál – **fotovoltaické napätie**
Fotočlánok – PN fotodetektor vo fotovoltaickom móde
- .. Fotodetektor v externe skratovanom elektrickom obvode – **fotovodivostný mód**
Ožiarením preteká cez PN priechod fotoprúd

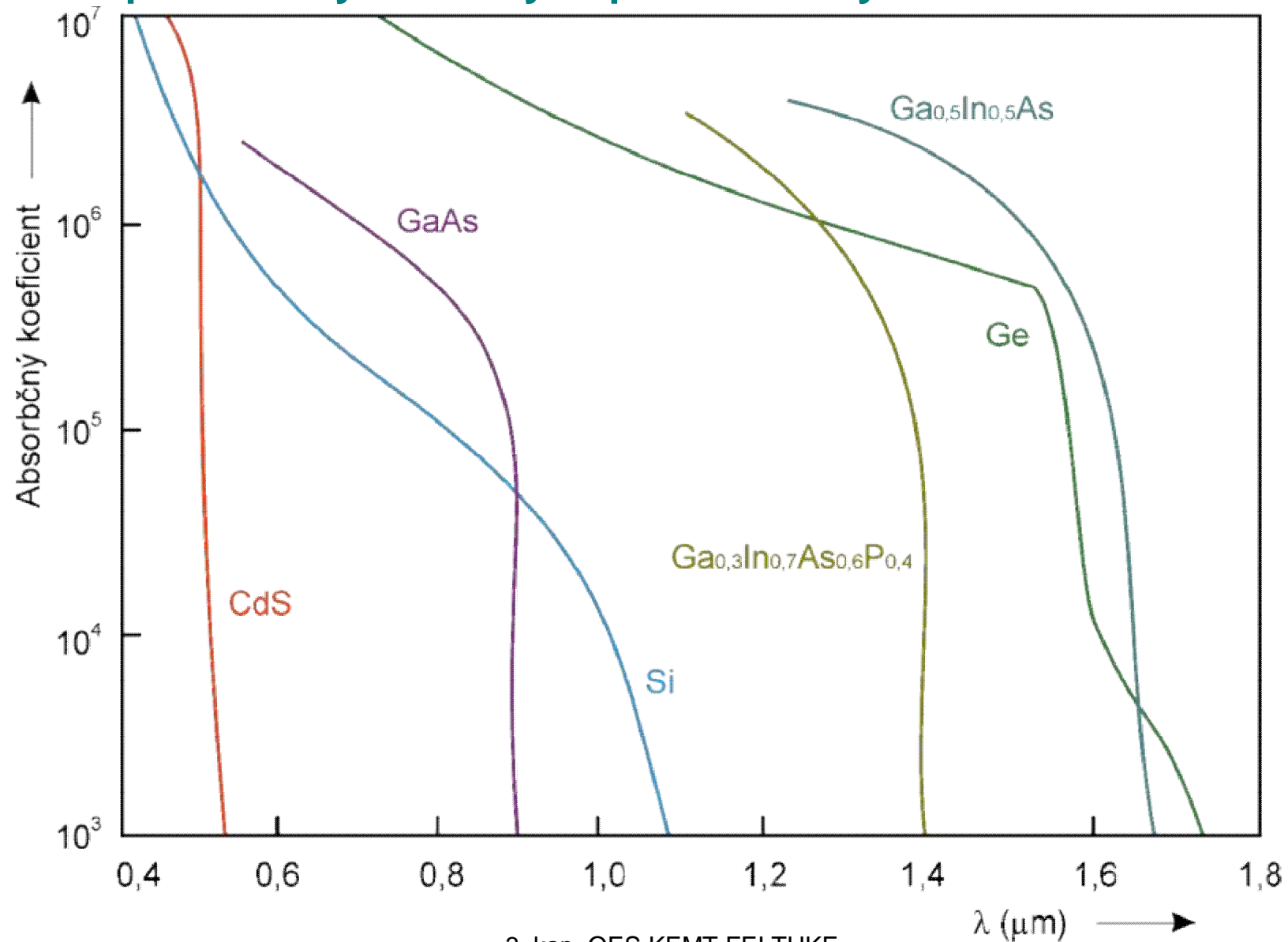
$$.. I_p = \frac{P_o e(1-r)}{hw} [1 - \exp(-a_o d)]$$

Pre fotodiódu ideálne vyberáme materiál so šírkou zakázaného pásma, ktorá je o málo menšia ako energia fotónu, zodpovedajúca najväčšej pracovnej vlnovej dĺžke systému

Volt – ampérová charakteristika fotočlánku na báze PN priechodu



Absorpční krivky základných polovodičových materiálov



Prúd za tmy

Kvantová účinnosť

$$\eta = \frac{r_e}{r_p}$$

- Závaží od absorpčného koeficientu polovodičového materiálu, konštrukcie fotodiódy a vlnovej dĺžky

Citlivosť (odozva)

$$\eta = \frac{I_p}{P_o}$$

I_p – výstupný fotoprúd, P_o – dopadajúci optický výkon

$$n \quad r_p = \frac{P_o}{E} = \frac{P_o}{h\nu} = \frac{P_o}{h\nu}$$

$$n \quad r_e = \frac{h P_o}{h\nu}$$

$$n \quad I_p = \frac{h P_o e}{h\nu}$$

$$n \quad R = \frac{h e}{h\nu}$$

$$n \quad R = \frac{h e l}{h c}$$

Kritická (medzná) vlnová dĺžka

$$n \lambda_c = \frac{hc}{E_g}$$

Ekvivalentný šumový výkon – NEP – Noise Equivalent Power

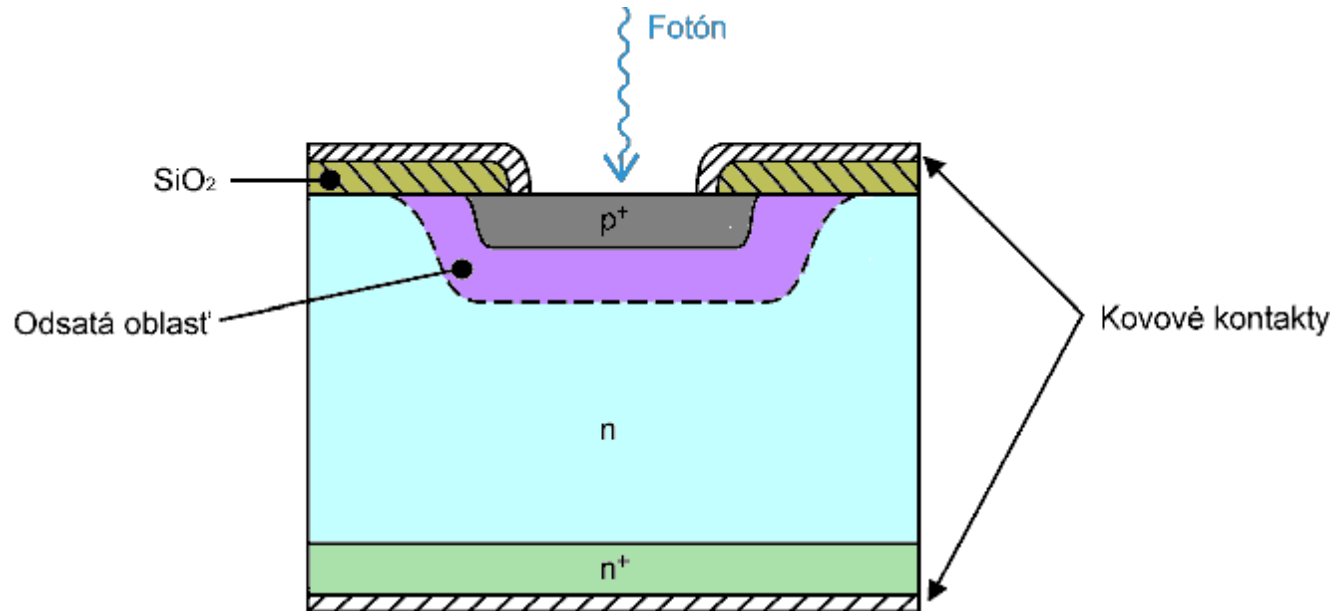
Detektivita

$$n D = \frac{1}{NEP}$$

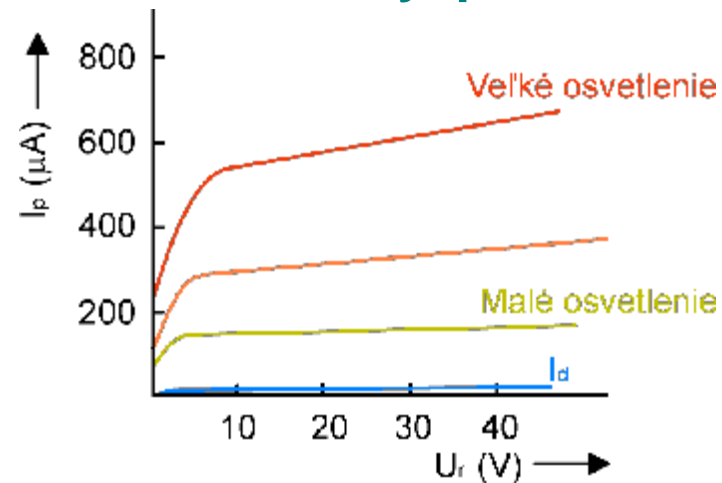
Normovaná detektivita

$$n D^* = \frac{A\sqrt{B}}{NEP}$$

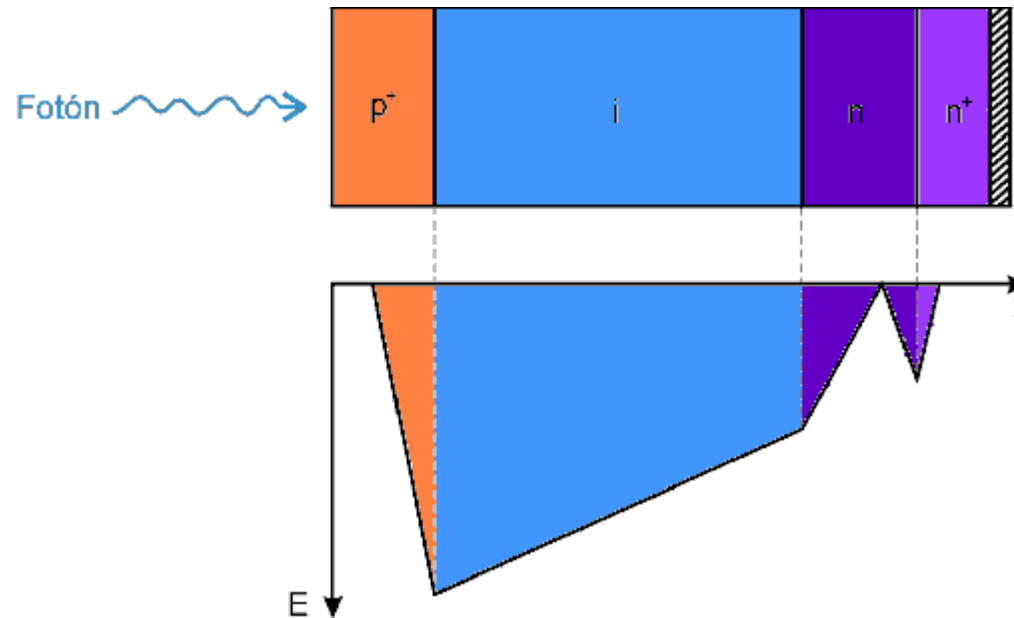
Typická štruktúra kremíkovej fotodiódy PN



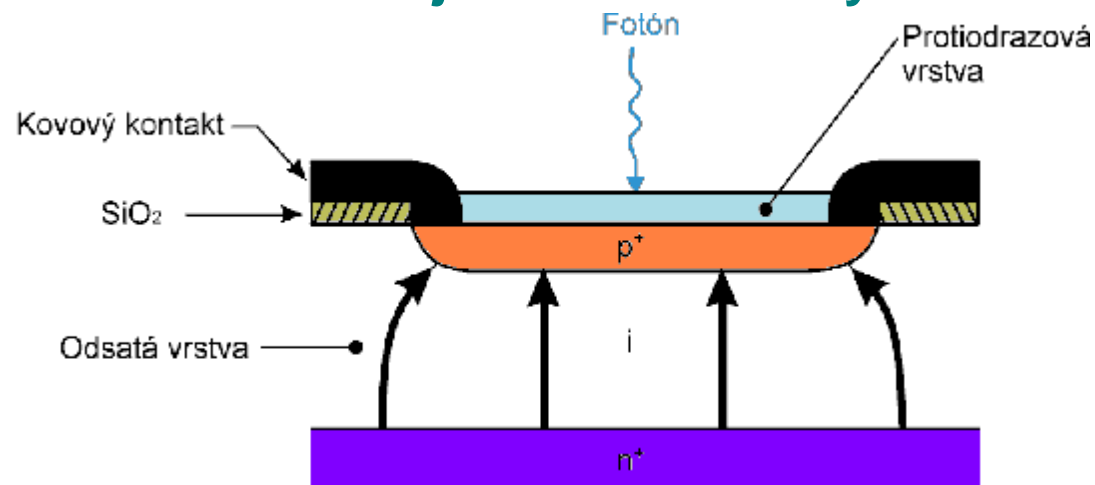
Výstupná charakteristika fotodiódy priechodom PN



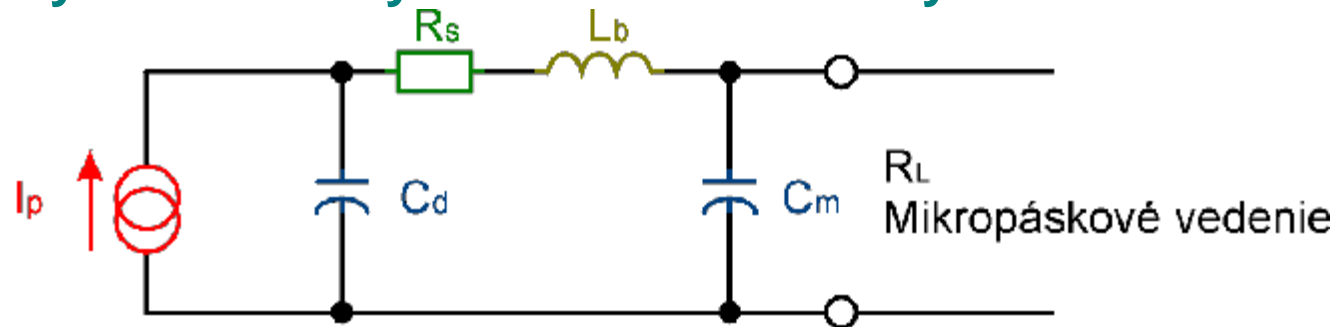
Fotodióda PIN štruktúra a priebeh elektrického poľa



Štruktúra čelne osvetľovanej Si PIN fotodiódy



Náhradný ekvivalentný obvod PIN fotodiódy



- Ekvivalentný obvod **PIN** fotodiódy – $C_d = 145$ fF, $C_m = 15,3$ fF, $L_b = 159$ pH a $R_s = 12$ Ω , frekvencia orezania $f_c = 22$ GHz

Fotodiódy so Schottkyho priechodom

- S priechodom kov–polovodič
- **GaAs** – C_d je niekoľko desiatok pF, L_s je niekoľko desiatok nH, R_s je niekoľko Ω

APD

- n **APD - Avalanche Photodiode**
- n **Zosilnenie fotoprúdu v dôsledku násobenia počtu nosičov**
- n **Veľka intenzita elektrického poľa**
- n **Nárazova ionizácia**
- n **Záverné napätie: 100 až 400 V**
- n **Multiplikačný faktor M**

$$\dots M = \frac{I}{I_p}$$

- n **Si APD** – vlnové dĺžky od 0,4 do 0,9 μm
- n **RAPD - Reach Trough APD** – prieletová lavínová fotodióda

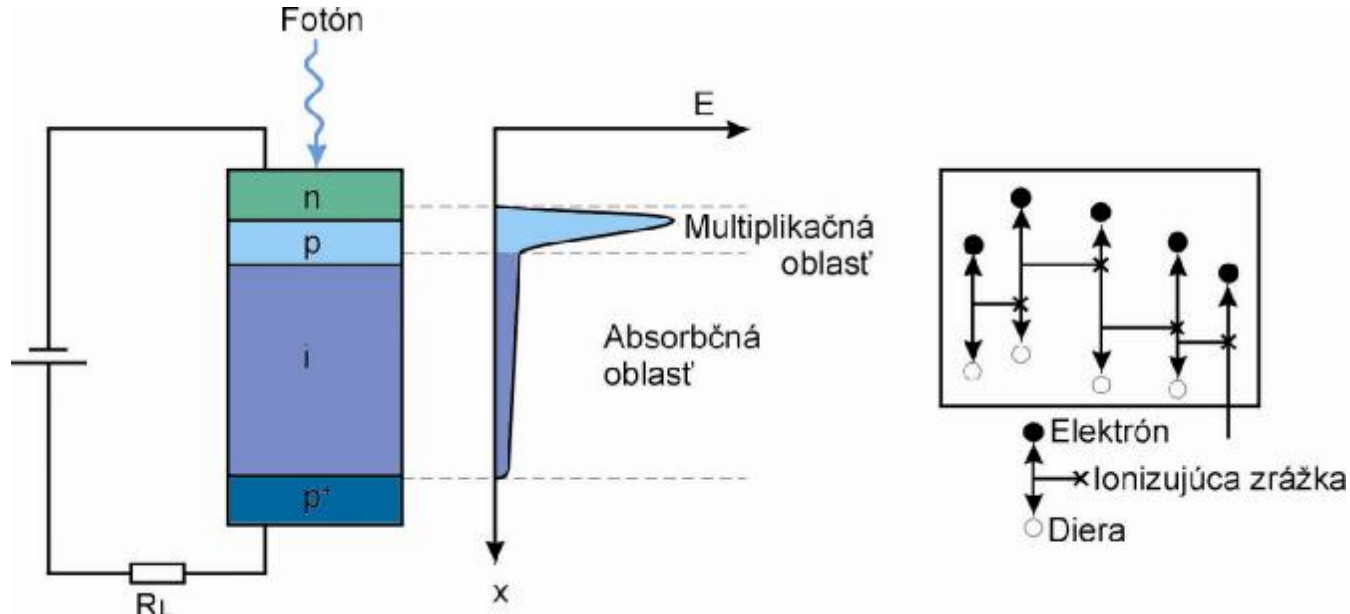
n **Nevýhody**

- .. **Obtiažnejšia, drahšia výroba**
- .. **Lavínový zisk – zdrojom ďalšieho šumu**
- .. **Vysoké pracovné záverné napätia (100 až 400 V)**
- .. **Závislosť zisku od teploty**

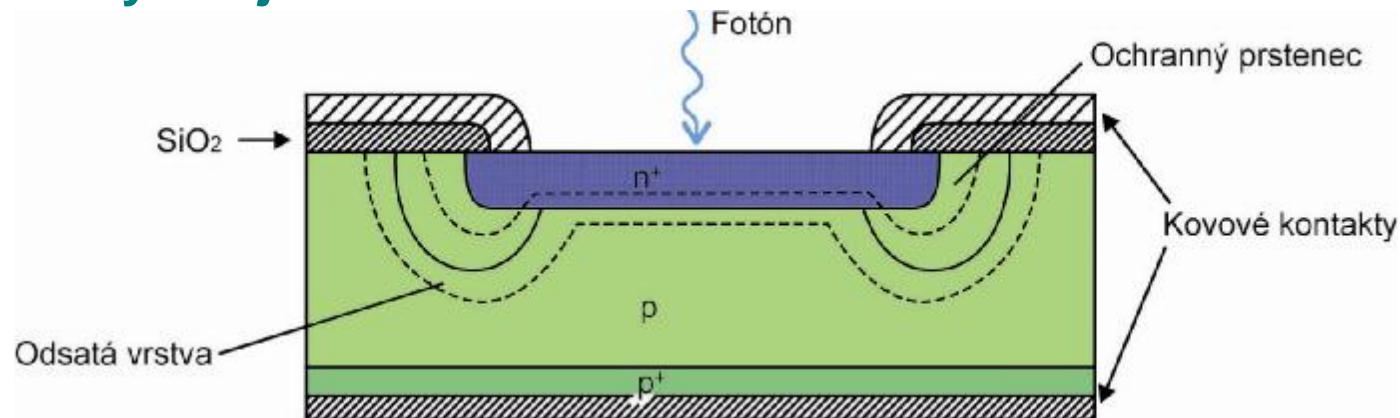
n **PIN-FET modul**

n **Opticky riadené tranzistory OPFETy**

Fotodióda s vnútorným ziskom: (a) konštrukcia a priebeh intenzity elektrického poľa, (b) lavínový proces multiplikácie nosičov



Štruktúra rýchlej Si APD



Fototranzistor

n Štruktúra NPN InGaAsP/InP

OPFET – GaAs MESFET

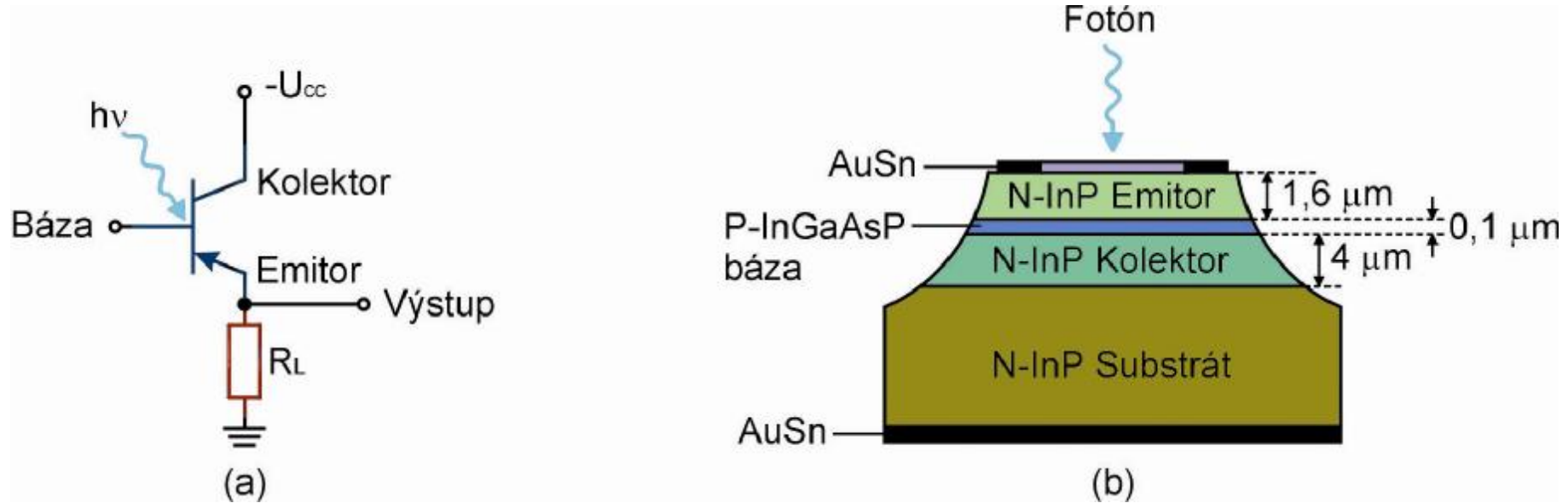
MESFET – Metal Semiconductor Field–Effect Tranzistors

HEMT – High Electron Mobility Transistors

Porovnanie OPFET, APD A PIN fotodetektorov

Parameter	Typ fotodetektora		
	OPFET	APD	PIN
U_R (V)	3	100	20
R (AW ⁻¹)	6 až 100	100	1
NEP (WHz ^{-1/2})	10–13	10–13	10–14

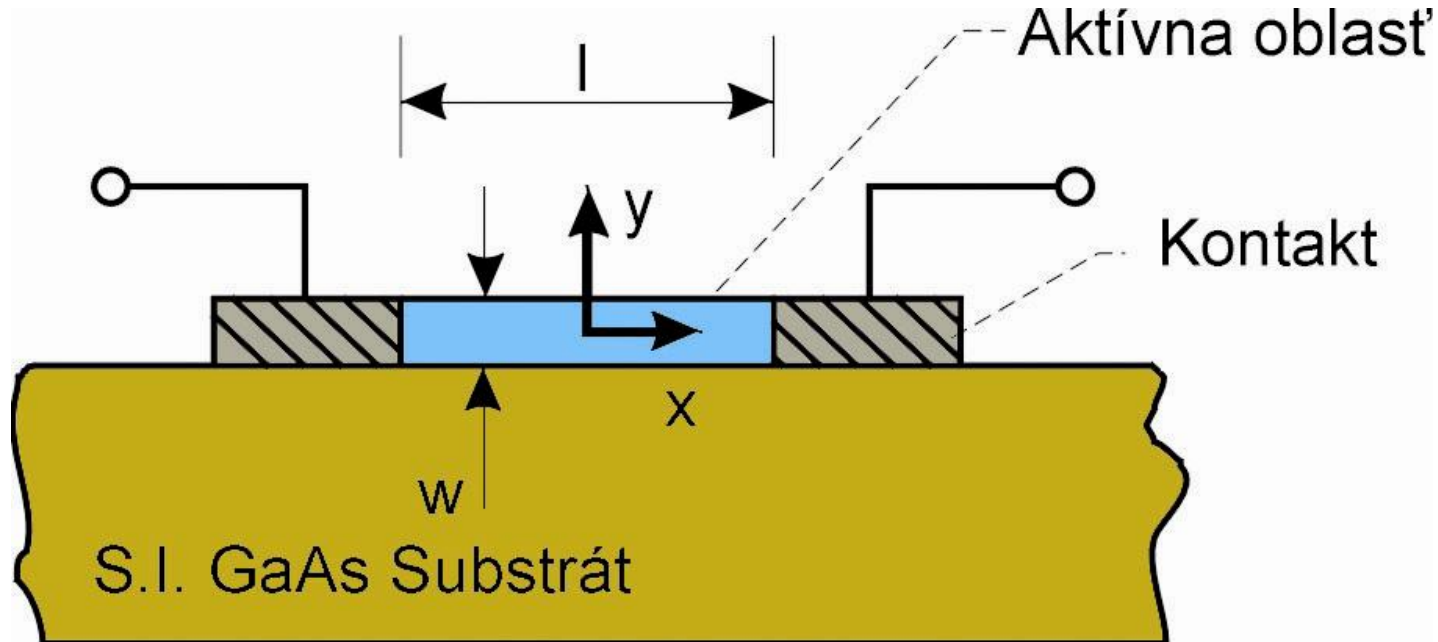
Symbolické znázornenie (a) a štruktúra (b) NPN fototranzistora



Fotorezistor

- n Fotovodivostný polovodičový detektor
- n Planárny fotorezistor
- n Detekcia fotónov s energiou menšou ako 0,2 eV – potrebné chladenie
- n **Materiály**
 - .. CdS
 - .. GaAs (pre pásmo $\sim 0,85 \mu\text{m}$)
 - n Štruktúra typu N+P-(N-)N+
 - n Rýchlosť odozvy na optický signál 200 ps
 - n Vnútorný zisk 10
 - n NEP $\sim 10^{-11} \text{ WHz}^{-1/2}$
 - .. GaInAs/InP ($\sim 1,3 \mu\text{m}$)

Planárny fotorezistor



Pasívne optické vláknové prvky

Spojky

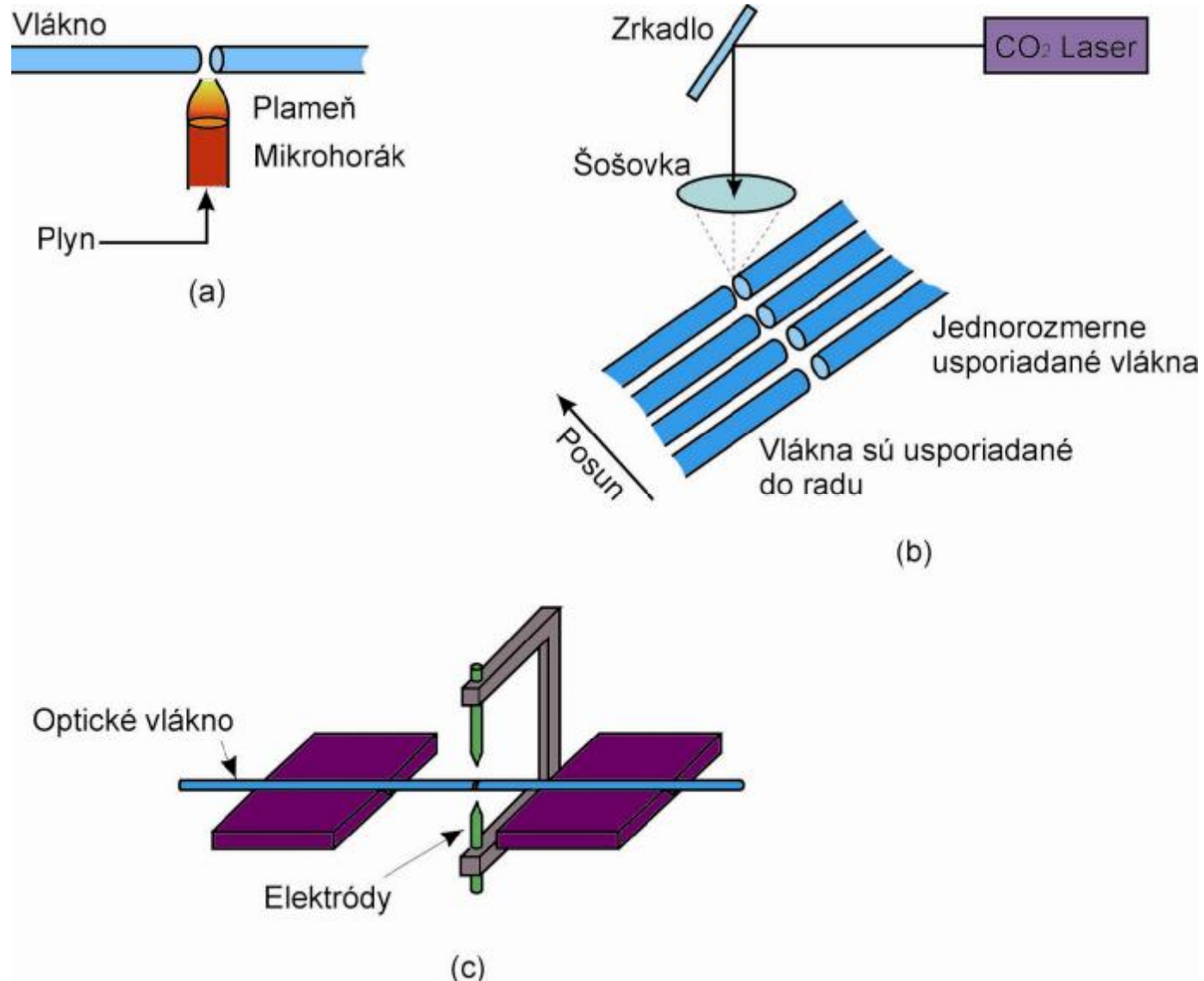
n Zvárané spojky

- Ohriatie plameňom, elektrickým oblúkom, **CO₂** laserom, žeravým vláknom
- Polohovanie použitím V-drážok
- Vložené tlmenie
 - n Mnohovidové **OV** od 0,09 do 0,3 dB
 - n Jednovidové **OV** od 0,10 do 0,18 dB
- Nevýhoda – zmenšenie mechanickej ťažnej sily (až o 30%)

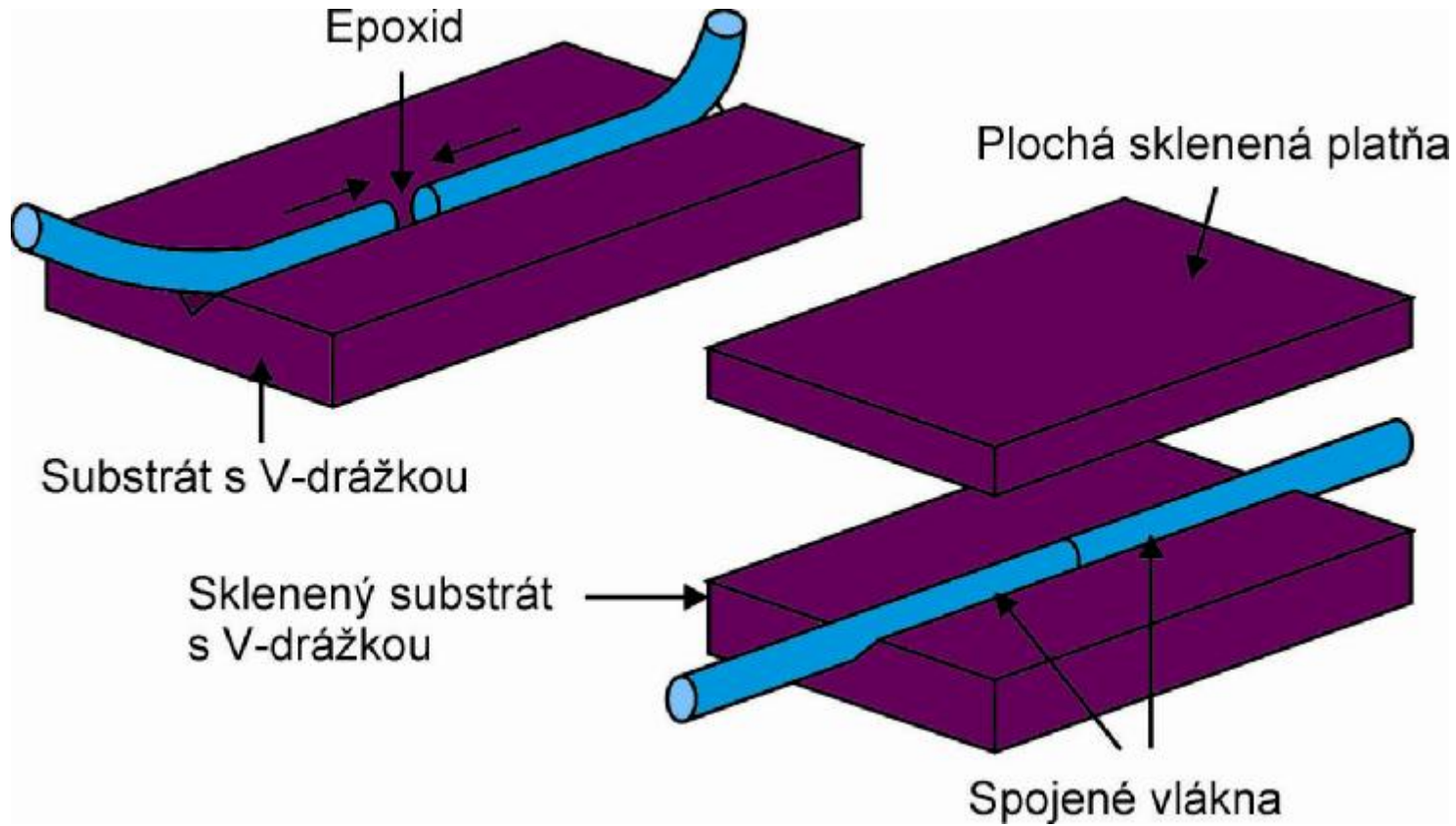
n Mechanické spojky

- Sendvičová spojka
- Hromadné spojky
- Vložné tlmenie
 - n 0,1 dB pre mnohovidové **OV**

Zváranie **OV**: a) plameňom, b) **CO₂** laserom, c) elektrickým oblúkom



Sendvičová spojka OV s V-drážkou



Konektory

q **Jednovláknové konektory**

q **Mnohovláknové konektory**

n **Suché konektory**

- Odraz v rozmedzí -15 až -30 dB
- Fyzický kontakt – odraz -45 dB
- Leštený kontakt – odraz -60 dB

n **Konektory s využitím imerznej látky(filmu)**

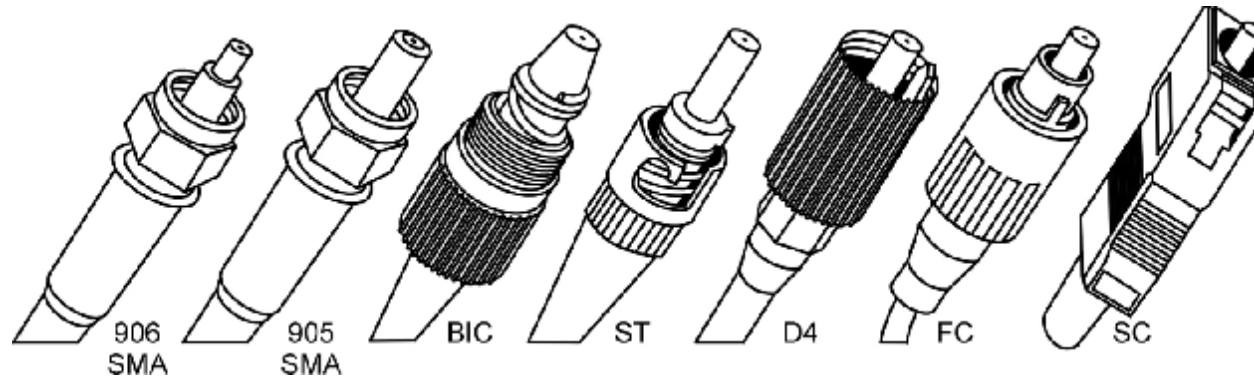
- Vložné tlmenie 0,2 dB
- Odrazy -25 dB

n **Mokrú konektory**

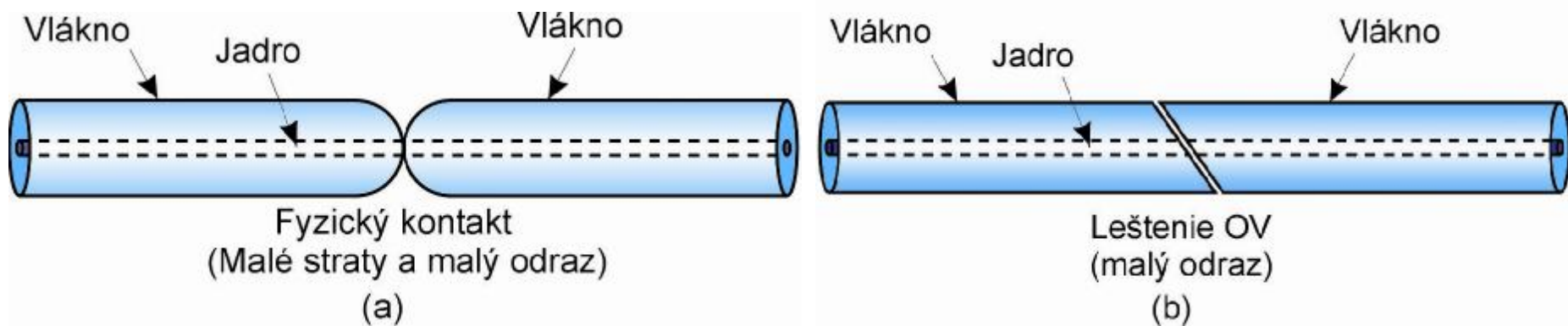
- Použitie imerzných gelov, olejov
- Odrazy -45 dB až -70 dB

n **Zástrčky konektorov – plast**

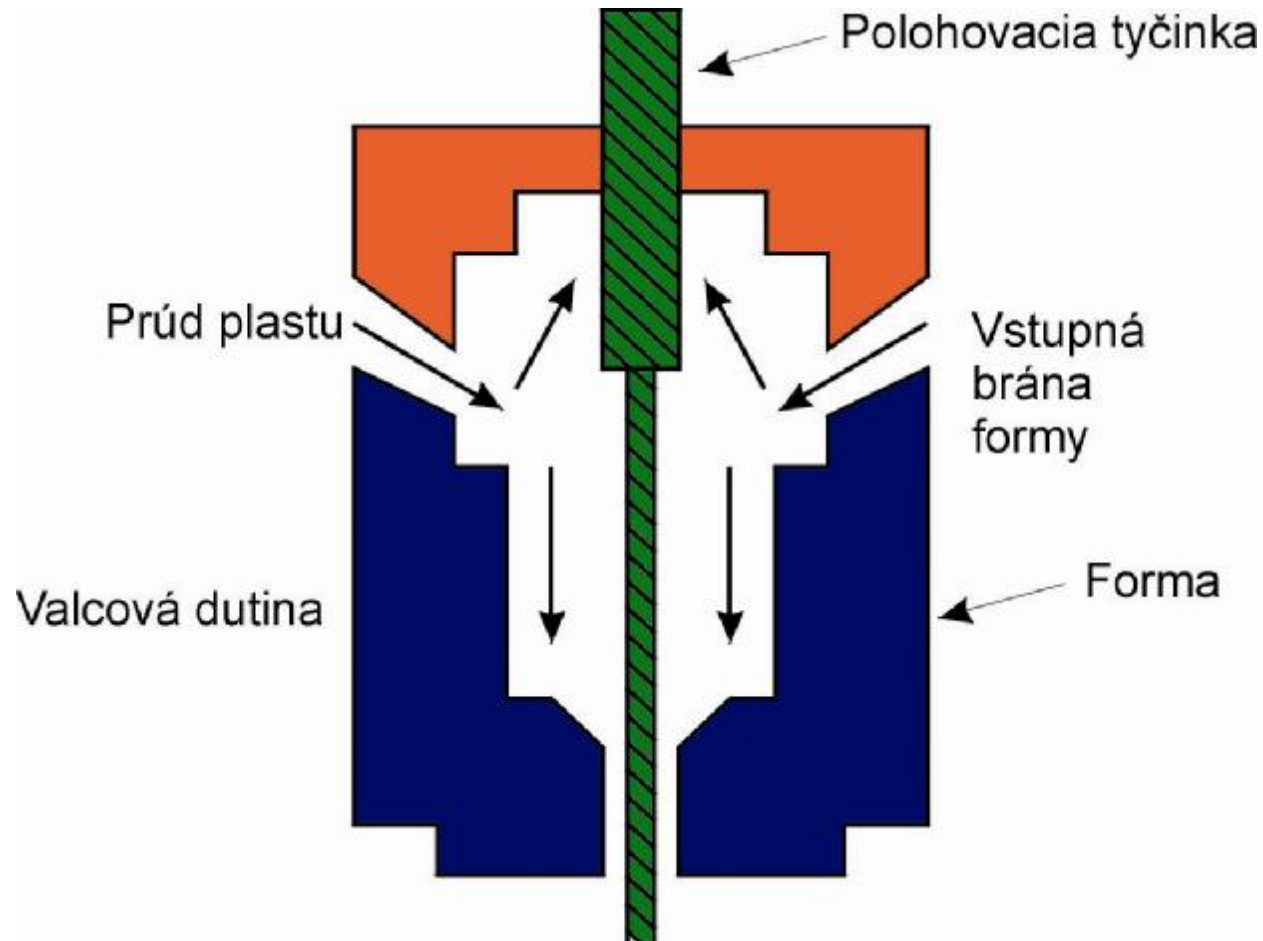
Typické jednovláknové optické konektory



Dosiahnutie malých strát a odrazu v optických konektoroch metódou
a) fyzického kontaktu, b) leštením spojovaných OV



Výroba zástrčky optického konektora odlieváním z plastu



Optické vláknové rozvetvovacie prvky

- n Rozvetvenie prenosovej trasy
- n Optické vláknové odbočnice
 - .. S povrchovou väzbou
 - .. S väzbou koncovými plochami
- n Väzobné prvky
 - .. Prechodné
 - .. Odrazné (reflexné)
 - .. Hviezdicové spoje realizované
 - n Laterálnym presahom OV
 - n S čiastočným odrazom od koncových plôch
 - n S využitím gradientných šošoviek
 - n S vetvenými planárnymi svetlovodmi

- n **Optické vláknové smerové odbočnice**

- n **Optické vláknové prepínače**

- .. **Mechanické**

- n Veľký odstup signálu v zopnutom a rozopnutom stave (60 až 70 dB)

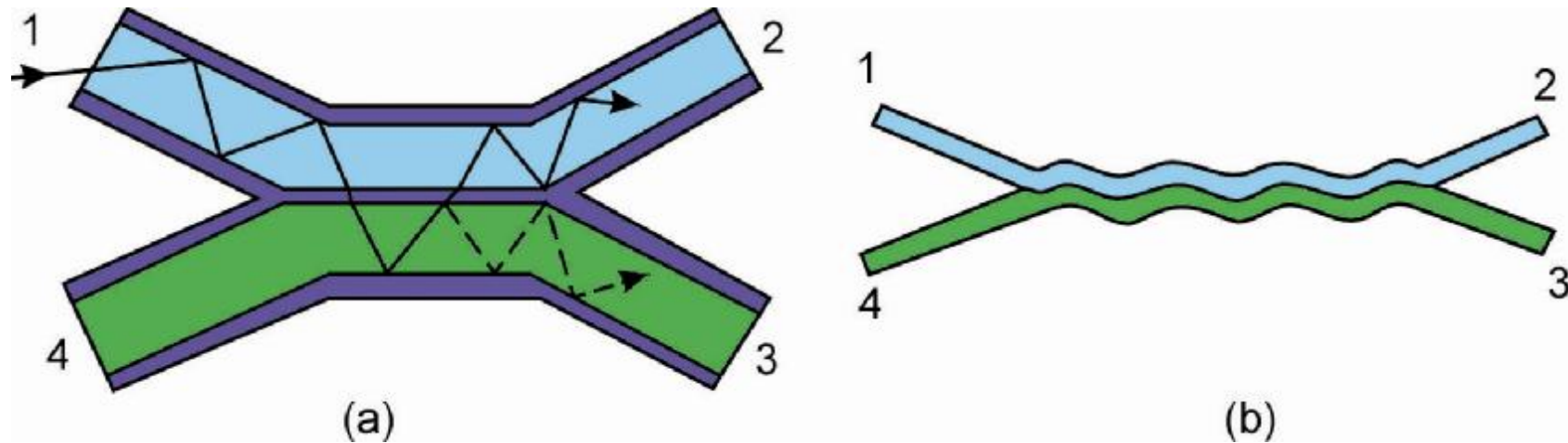
- n Vložené tlmenie 2 až 3 dB

- .. **Optické**

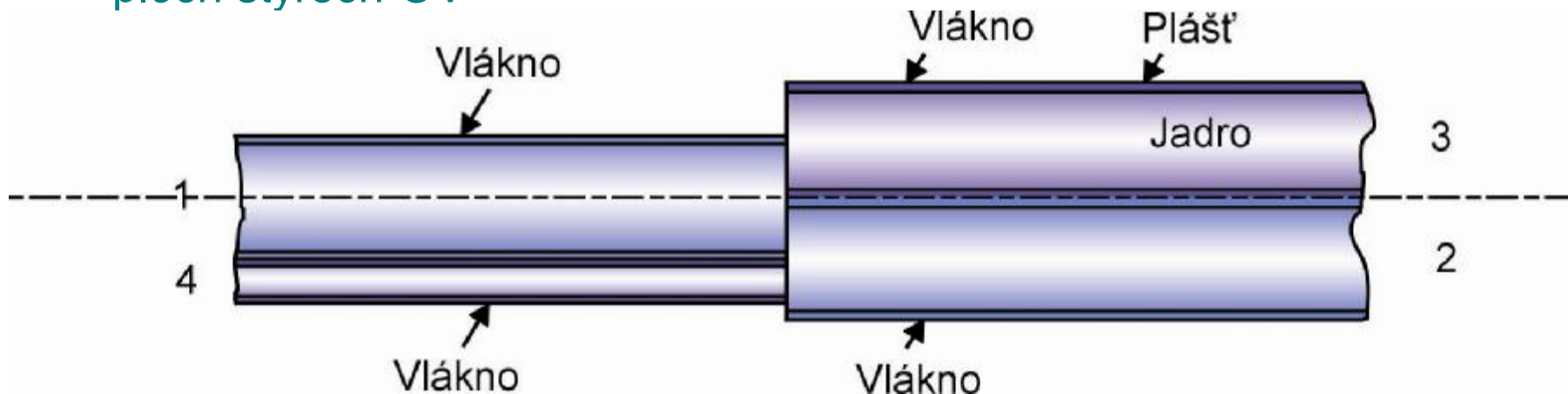
- n Odstup prepínaných signálov (20-30dB)

Optická smerová odbočnica realizovaná

a) zvarením dvoch vlákien a b) zvlnením v mieste zvaru dvoch vlákien



Smerová optická vláknová odbočnica tvorená zvarením koncových plôch štyroch OV



Hviezdicový spoj: a) pechodný a b) odrazný

