



Polovodičové optické prvky - diody, lasery

Jan Soubusta

Společná laboratoř optiky UP a FZÚ AVČR
17. listopadu 50A, Olomouc

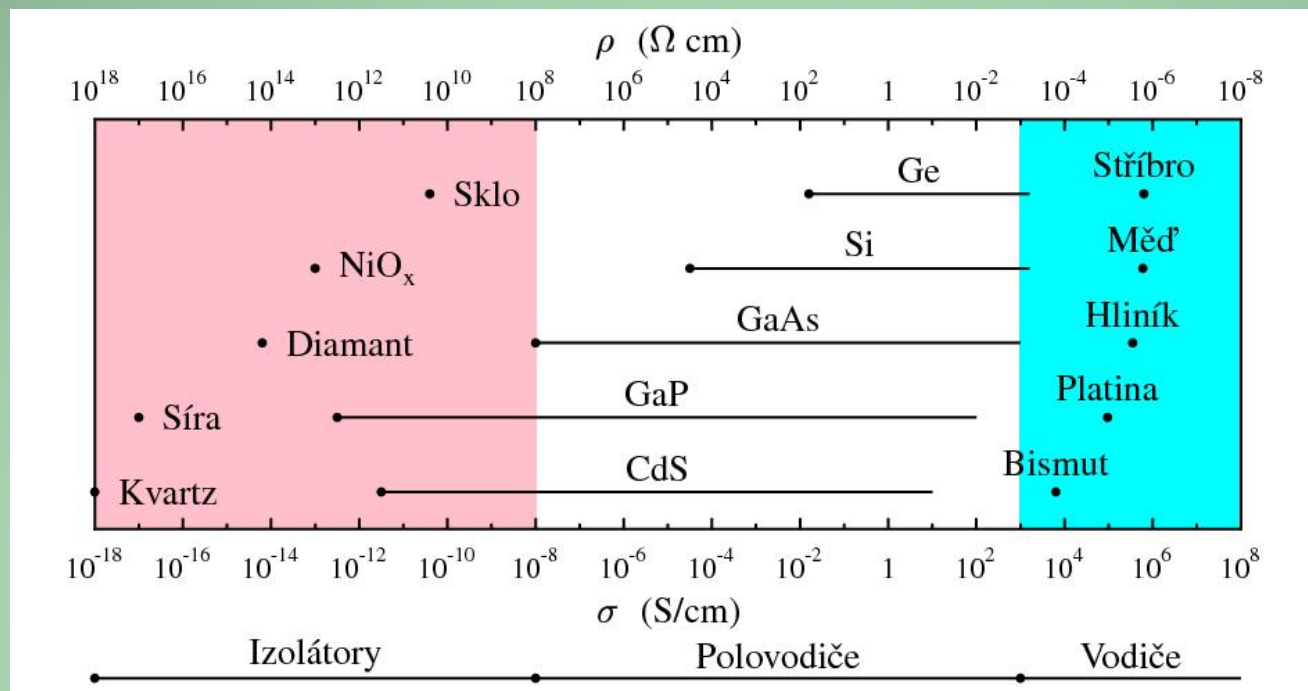


Co je to polovodič?



Typické polovodiče: Si, Ge, GaAs

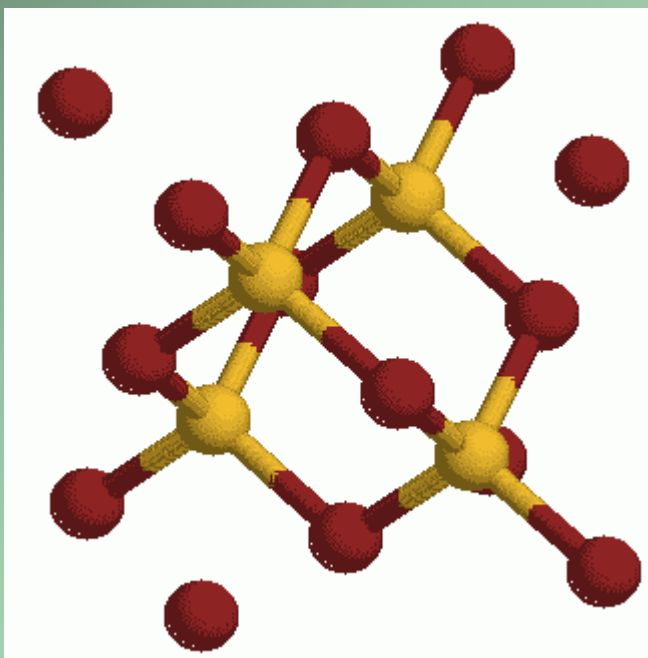
Čistý polovodič má vodivost v oblasti mezi izolátory a kovy.



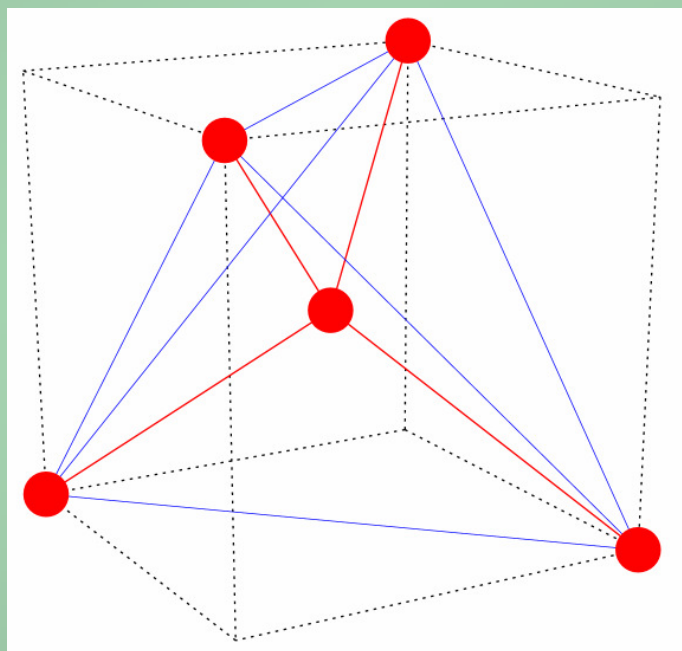
Krystalová struktura polovodiče

Polovodiče jsou krystaly s kovalentní vazbou.

krystalová struktura polovodičů
III-V např. GaAs



diamantová struktura
polovodičů IV
např. Si, Ge



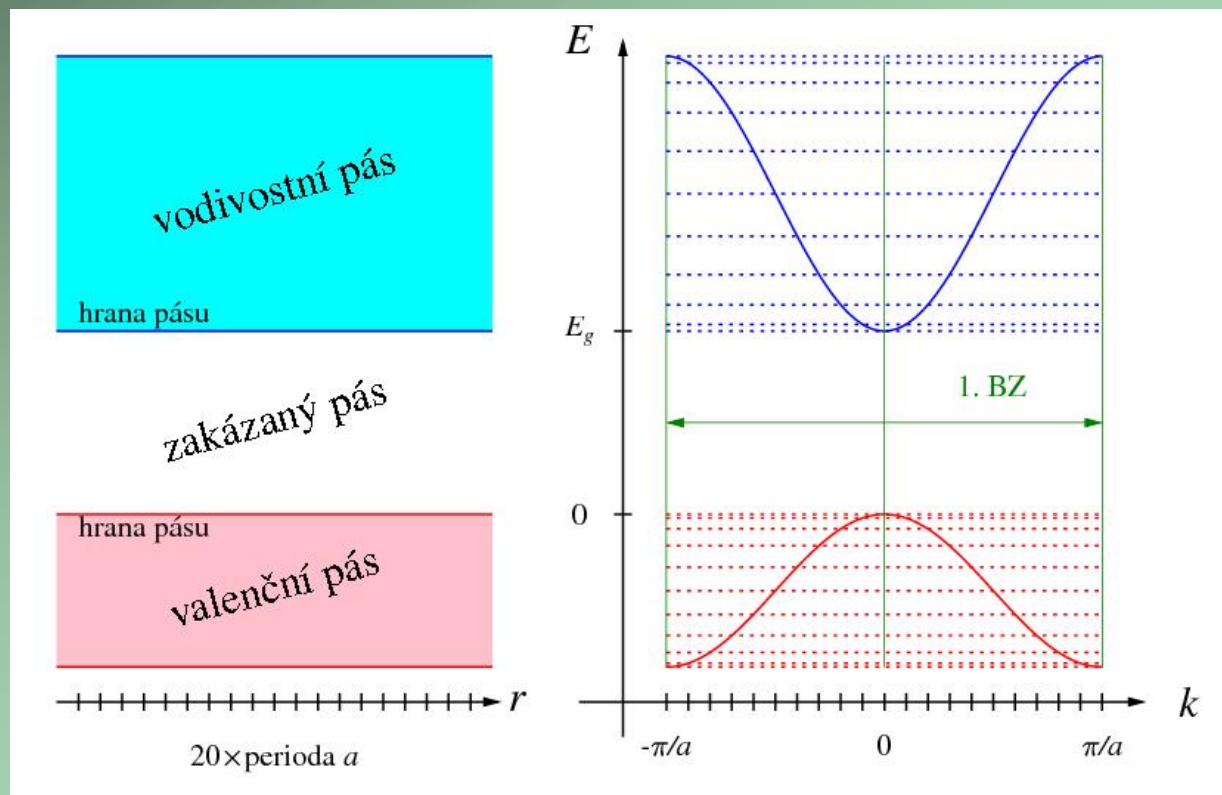
monokrystal
Si



Pásové schéma polovodiče

přímý prostor (pozice v metrech)

reciproký prostor (prostorové
frekvence 1/metr)



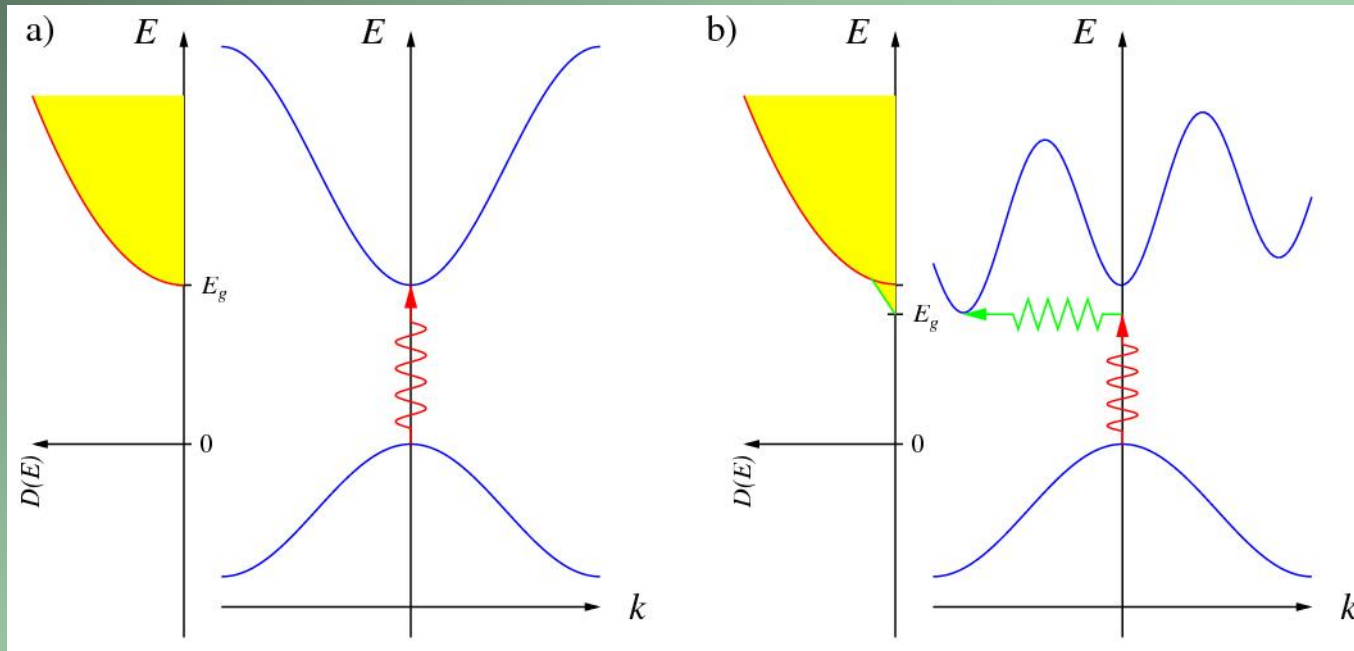
$$k = 2\pi/\lambda$$

de Brogliho
vlnová délka
elektronu

Šířka zakázaného pásu:

Krystal	diamant	Si	Ge	GaAs
E_g (eV)	5.4	1.14	0.67	1.43

Které polovodiče jsou vhodné pro fotoniku?



polovodič s přímým zakázaným pásem

Přímý polovodič (GaAs)

s nepřímým zakázaným pásem

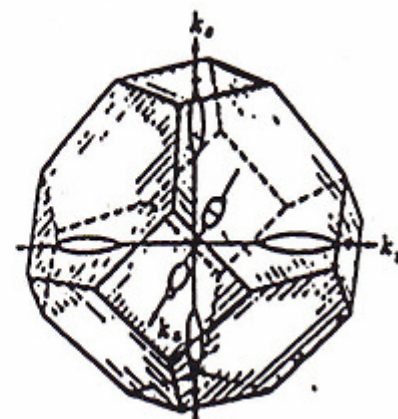
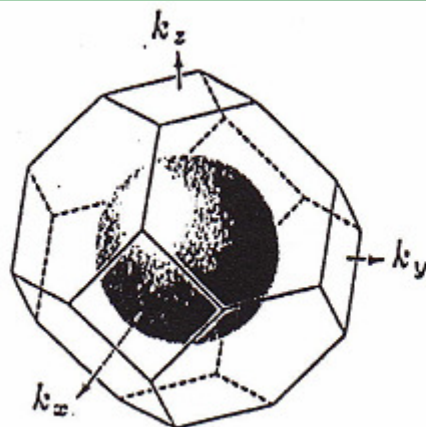
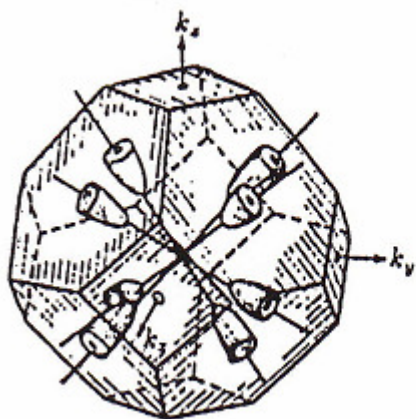
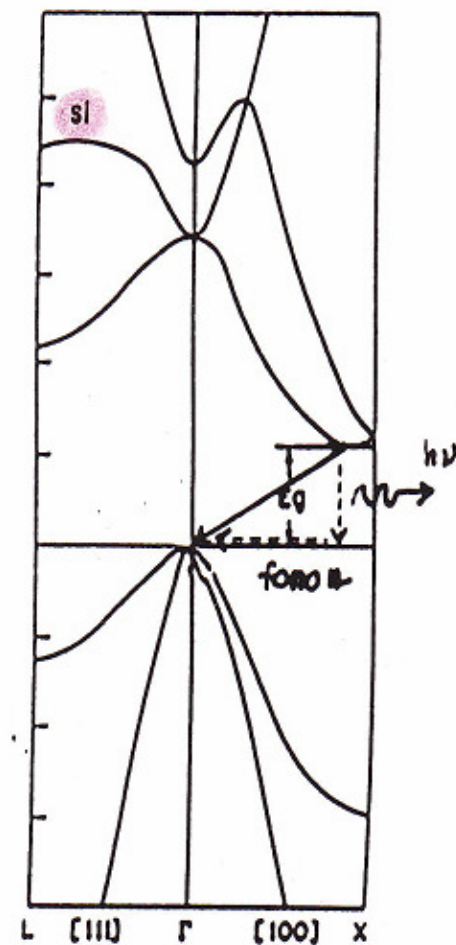
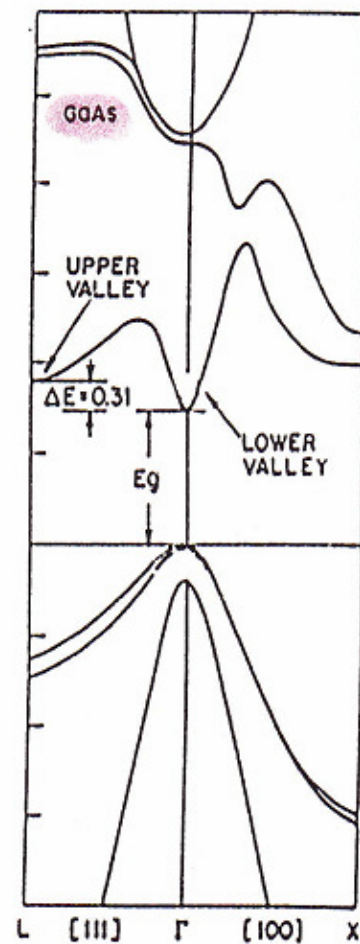
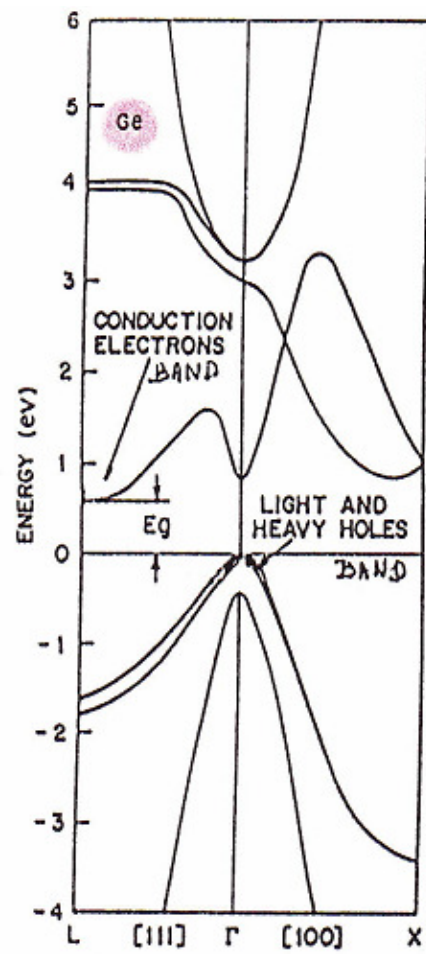
Nepřímý polovodič (Si, Ge)

Zákony zachování energie a hybnosti při optické mezipásové excitaci.

$$\vec{k}(\text{foton}) = \vec{k}(\text{elektron ve vod.p.}) \pm \vec{q}(\text{fonon}) \approx 0; \quad \hbar\omega = E_g \pm \hbar\Omega.$$

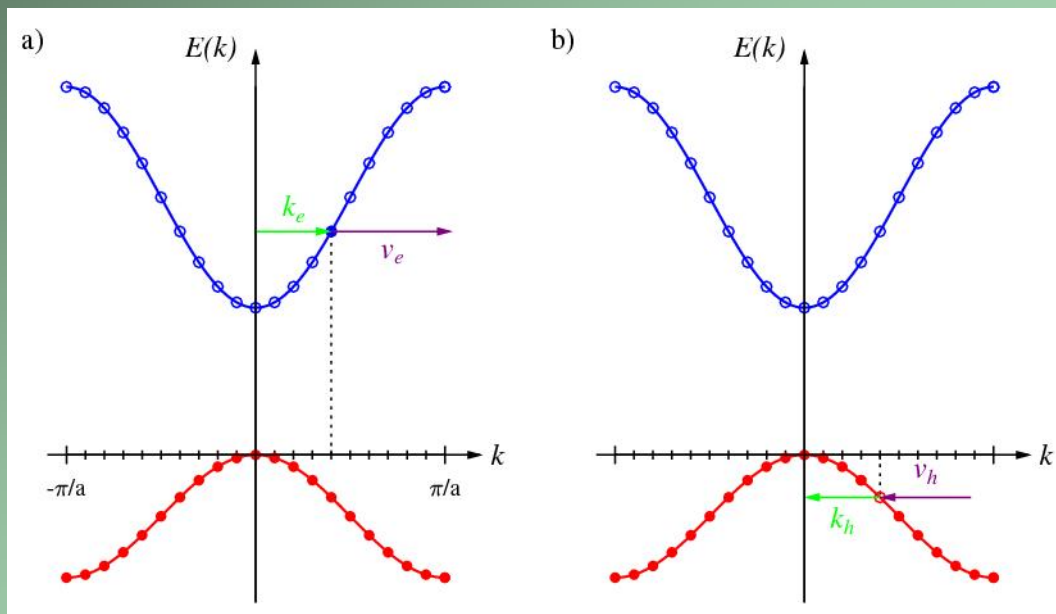
Doba života nosičů v GaAs je řádově $\approx \text{ns}$

Doba života nosičů v Si je řádově $\approx \text{ms}$



Kvazičástice – nosiče proudu v polovodiči

Kvazičástice
elektron
polovodič n-typu
ELEKTRONY



Kvazičástice
díra
polovodič p-typu
DÍRY

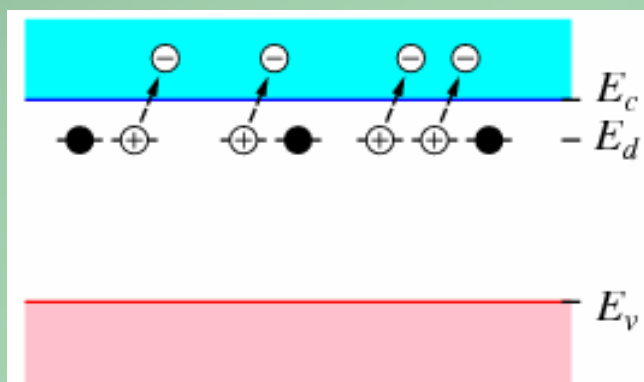
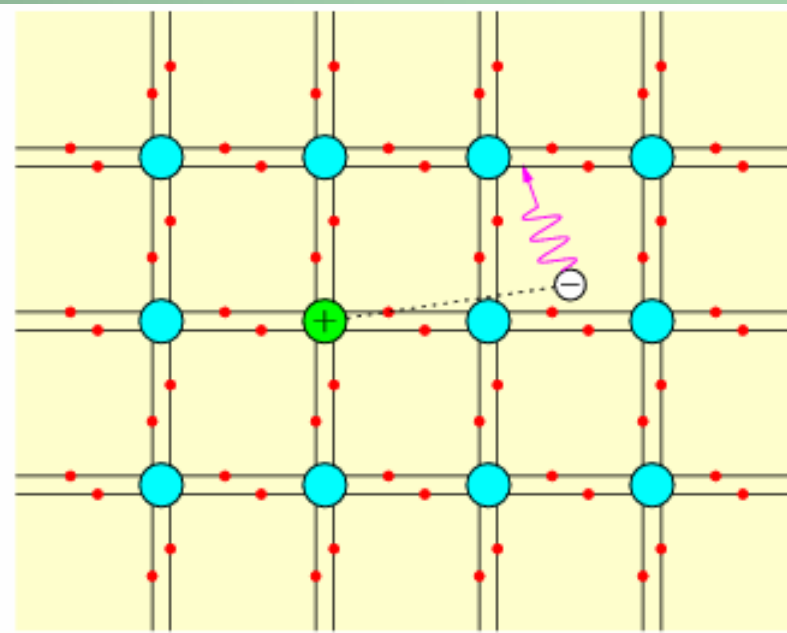
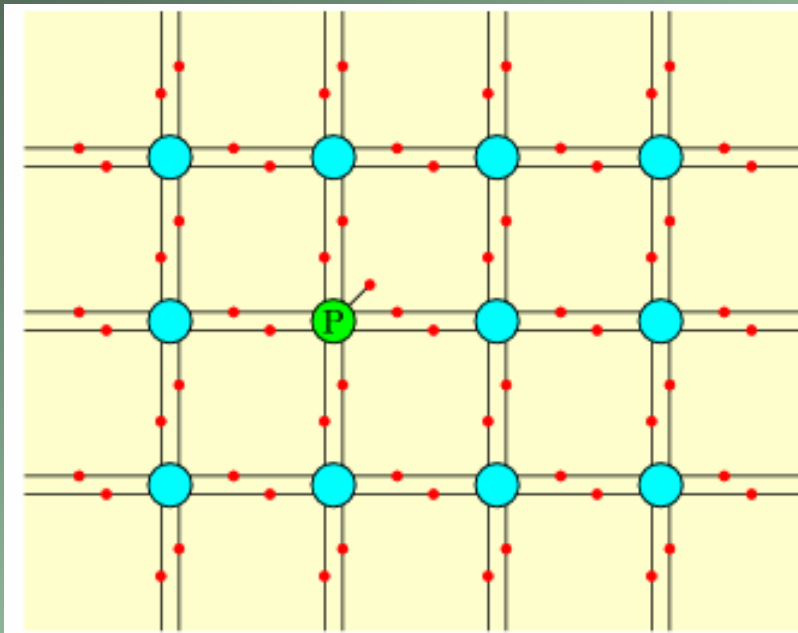
Polovodič, který má stejnou koncentraci elektronů i děr označujeme **vlastní**

Zákon působení aktivních hmotností:

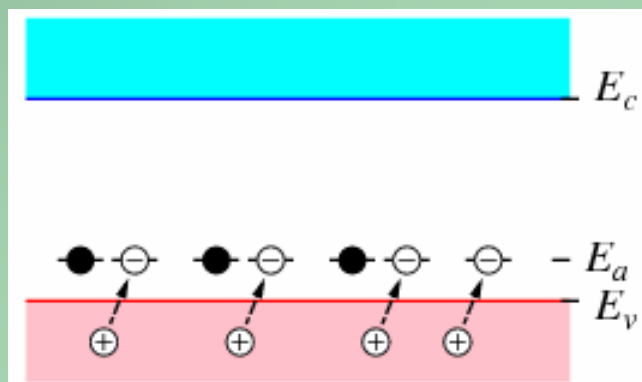
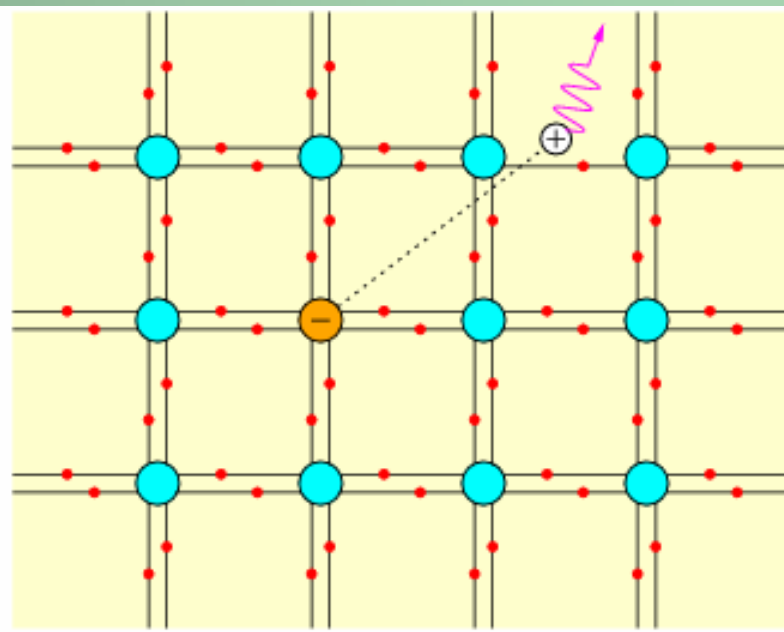
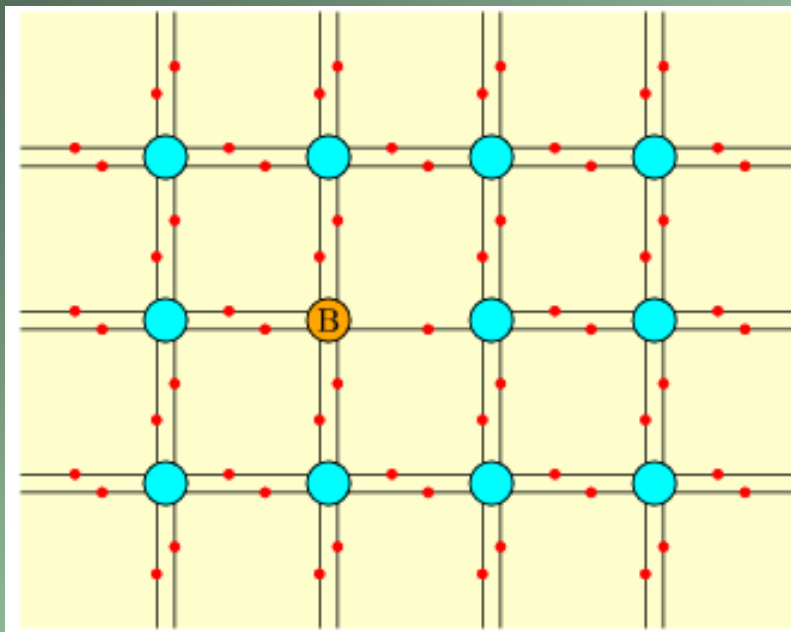
$$n p = 4 \left(\frac{k_B T}{2\pi \hbar^2} \right)^3 (m_e m_h)^{3/2} e^{E_g/k_B T}.$$

Vztahy pro výpočet parametrů kvazičástic v polovodiči.

kvazičástice	náboj	hmotnost	energie	k -vektor	rychlost	spin
elektron	$-e$	$m_e < 0$	E_e	k_e	v_e	s_e
díra	$+e$	$m_h = -m_e > 0$	$E_h = -E_e$	$k_h = -k_e$	$v_h = v_e$	$s_h = -s_e$

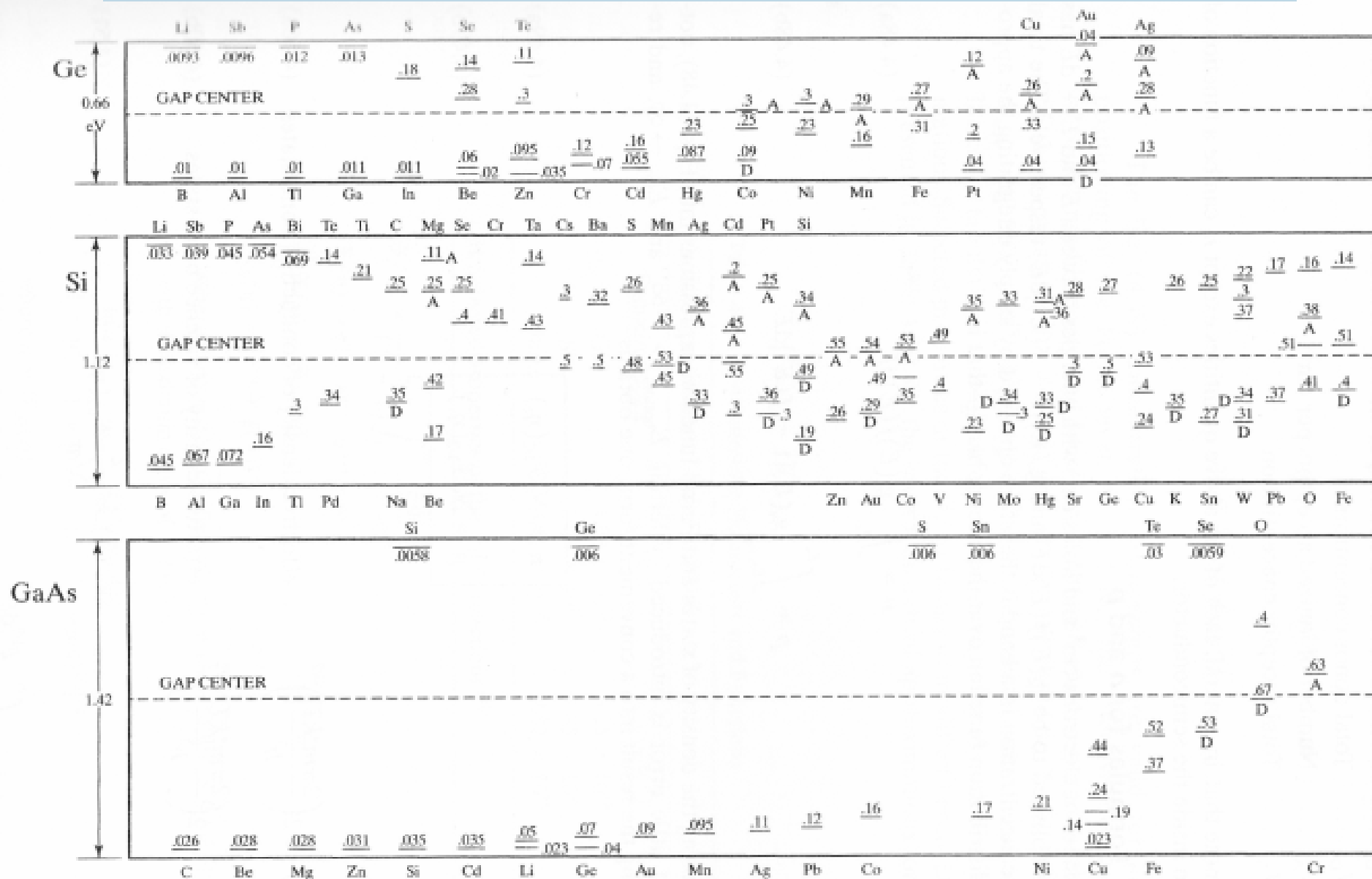


Kvazičástice
elektron
polovodič n-typu
ELEKTRONY



Kvazičástice
díra
polovodič p-typu
DÍRY

Co způsobují příměsi v polovodiči?



Donorové a akceptorové hladiny v zakázaném pásu a blízko je Fermiho hladina-

Na co lze využít polovodiče?

Čisté polovodiče mají jen omezené uplatnění.

Pro aplikace polovodičů v elektronice (dominují jsou elektrony) a fotonice (dominantní jsou fotony) je zapotřebí prvků, které jsou schopné zajistit následující funkce.

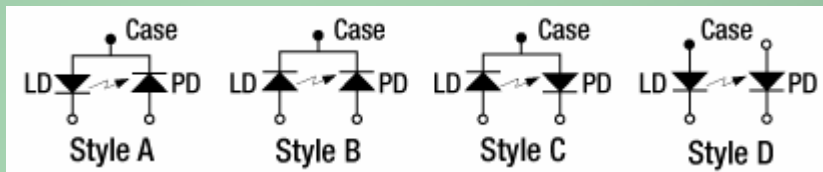
➤ elektronika

logické operace, binární spínače
analogové obvody, zesilovače

➤ fotonika

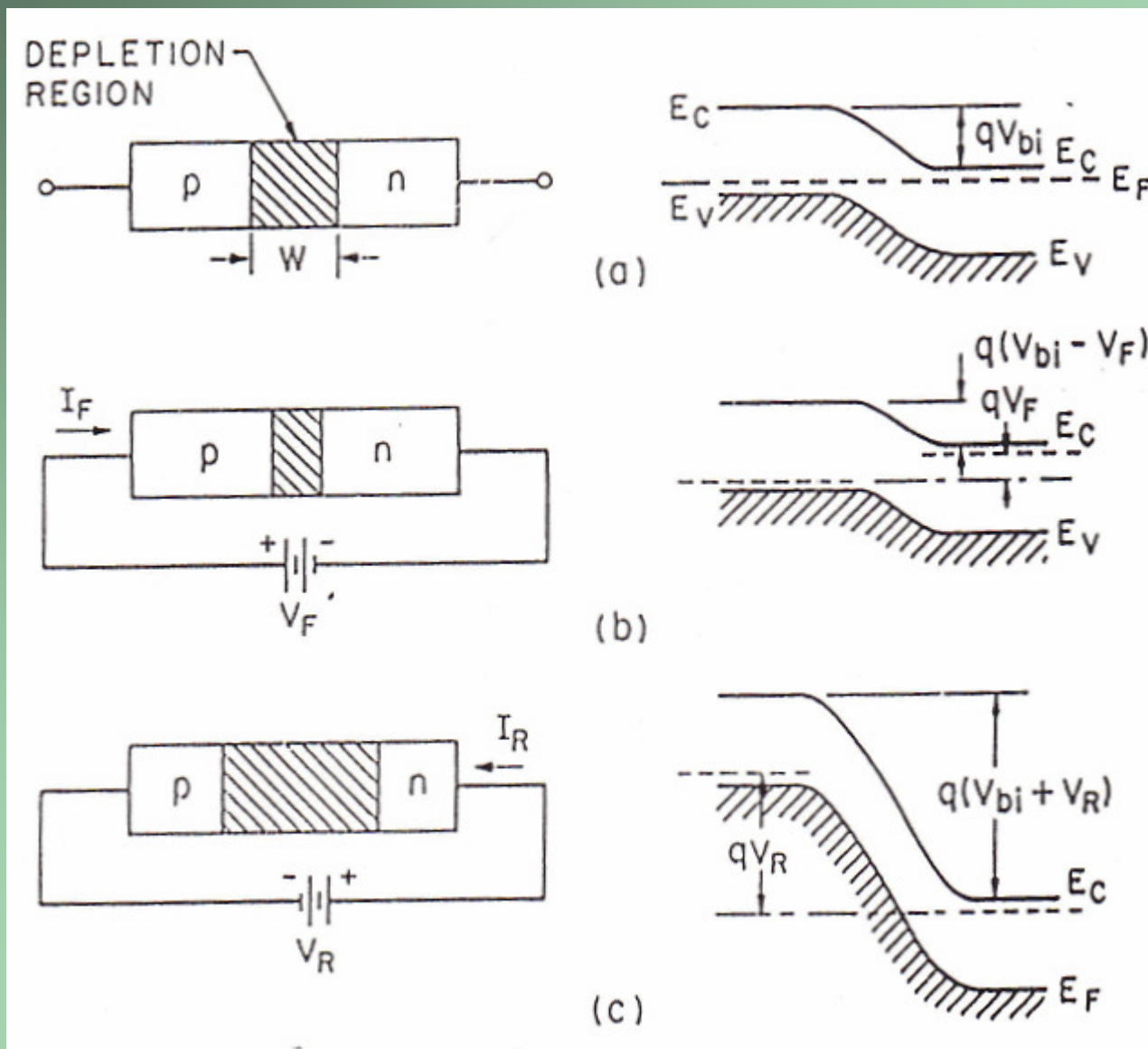
přenosové obvody, signál přenášený elektrony se přenesse na fotony
detektory záření, zpětná konverze z optického signálu do elektrického signálu

Tyto funkce mohou zajistit strukturované polovodiče využívající **p-n přechod** nebo **tranzistor**.



P – N přechod ve fotonice

P-N přechod může sloužit jako LED, LASER, nebo fotodioda



bez napětí

propustný směr

závěrný směr

Interakce polovodiče se zářením

Z pohledu optiky dochází v polovodiči ke třem procesům

ABSORPCE

Je to dominantní proces u fotodetektorů, kde se absorbuje záření s energií větší než E_g

SPONTÁNNÍ EMISE

Je to dominantní proces u LED diod.

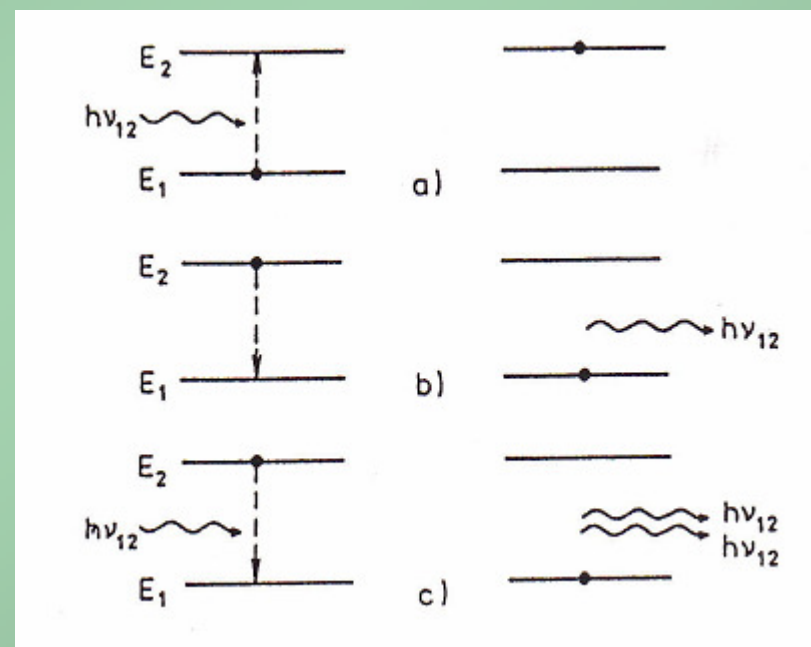
Doba života nosičů v GaAs je řádově $\approx ns$

Doba života nosičů v Si je řádově $\approx ms$

STIMULOVANÁ EMISE

Je dominantní u LASERu

Na ještě excitovaný elektron dopadne foton stimulující přechod.



Pro dosažení laserování musí stimulovaná emise převážit nad

a) spontánní

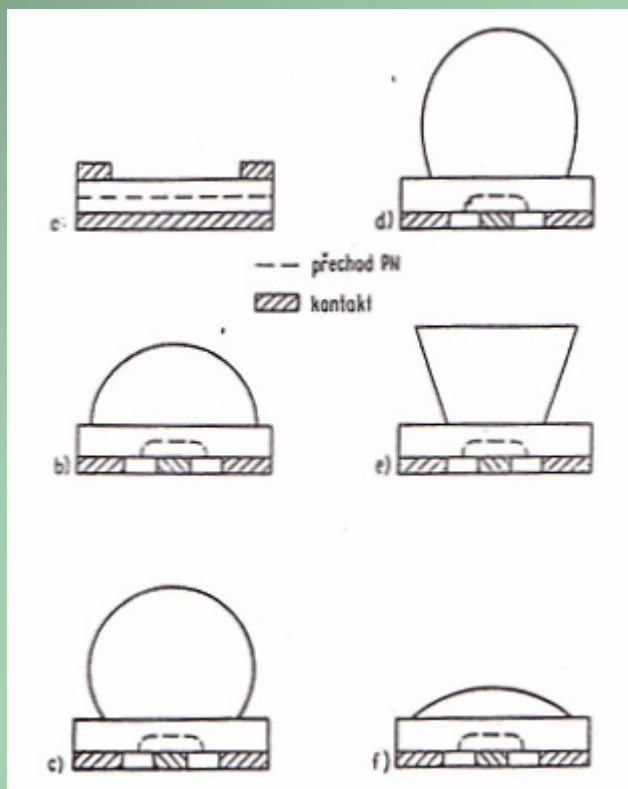
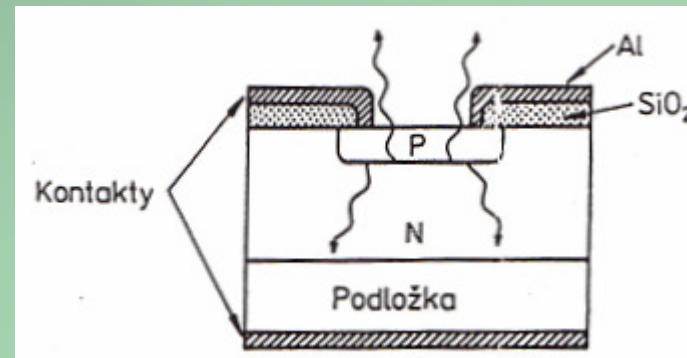
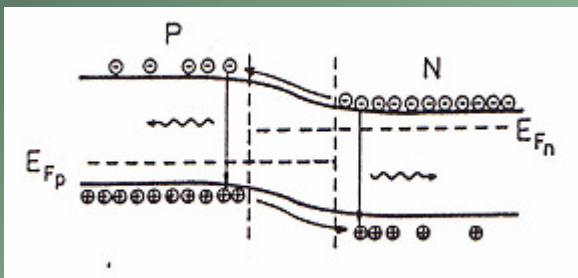
Zajistí se vysokou hustotou pole v rezonátoru.

b) absorpcí

Zajistí se zvýšením inverze populace.

Konstrukce polovodičové LED diody

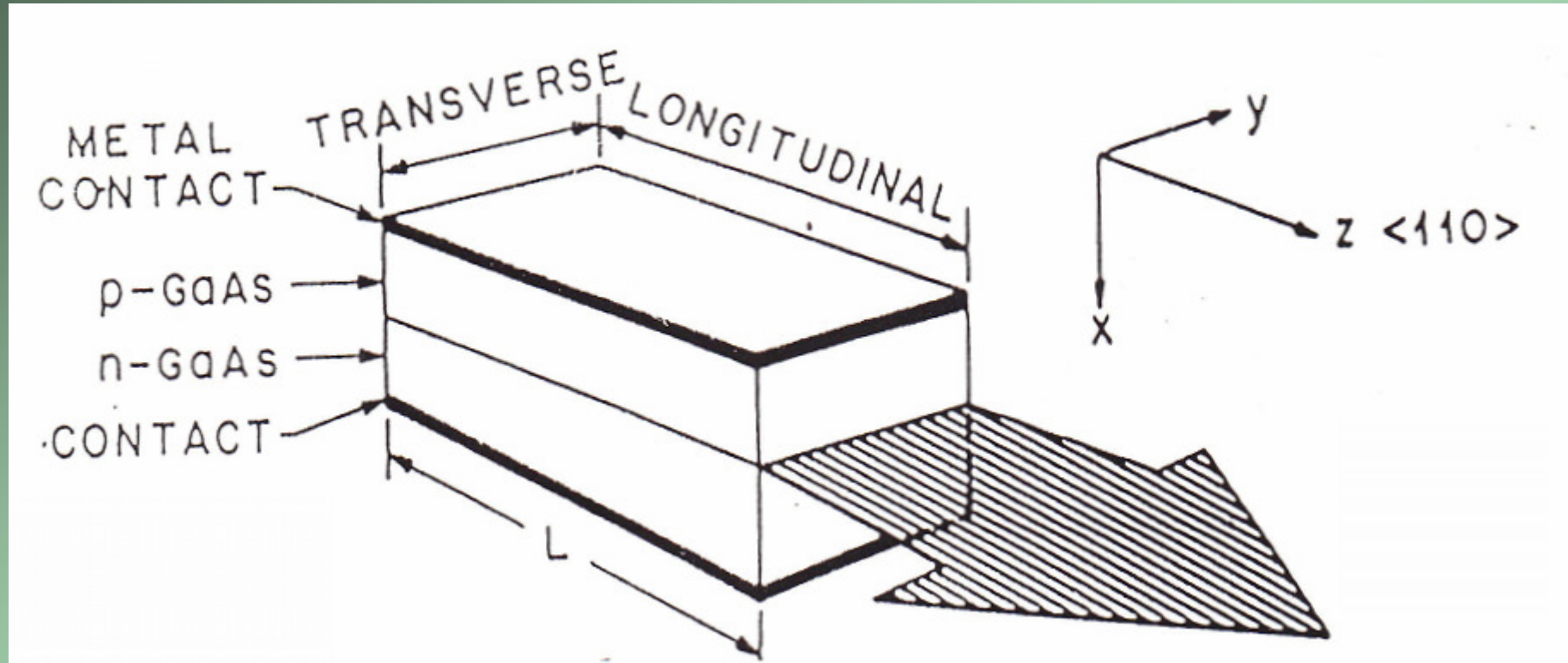
Injekce minoritních nosičů do P-N přechodu.



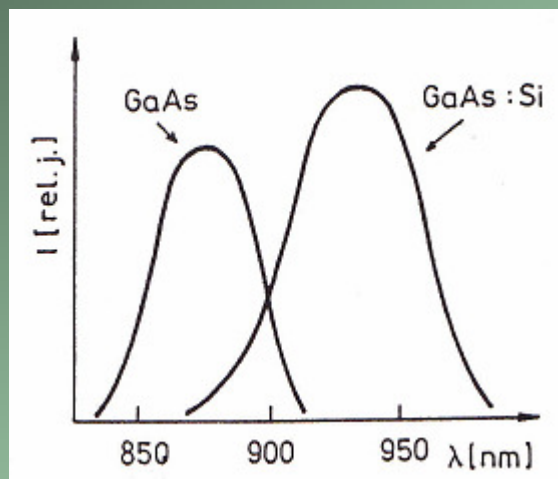
Vyzařovací účinnost LED diody v závislosti na geometrii (index lomu 3.6).

konstrukce	F	F/F_{plan}
a) planární	0,013	1
b) polokulová	0,34	27
c) kulová úseč	0,25	20
d) komolý elipsoid	0,25	20
e) komolý kužel	0,20	15,9
f) paraboloid	----	----

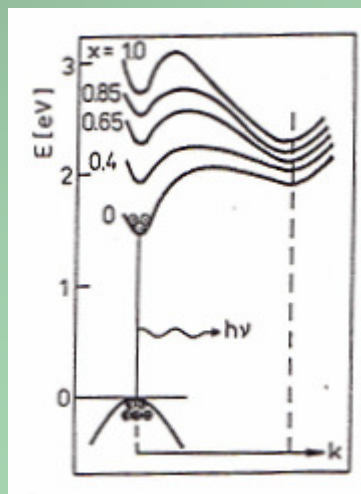
Polovodičový LASER



Změna spektra LED v závislosti na dopování GaAs.

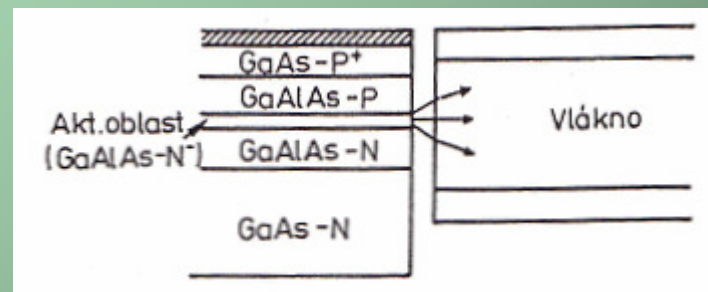
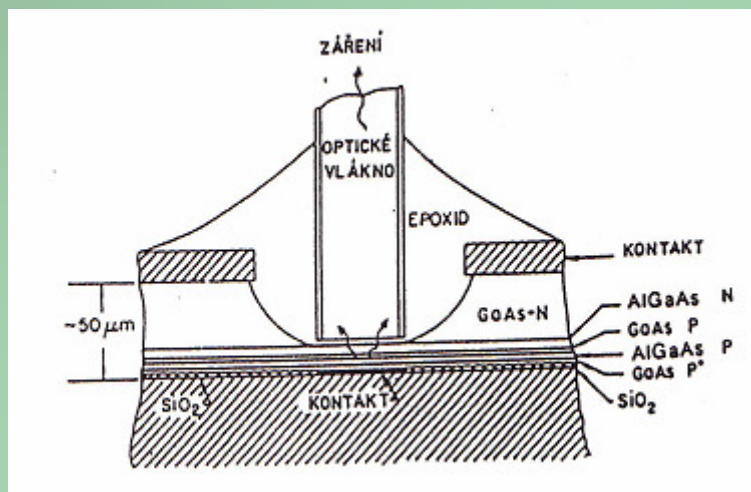


Změna spektra LED v závislosti na dopování složení $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$



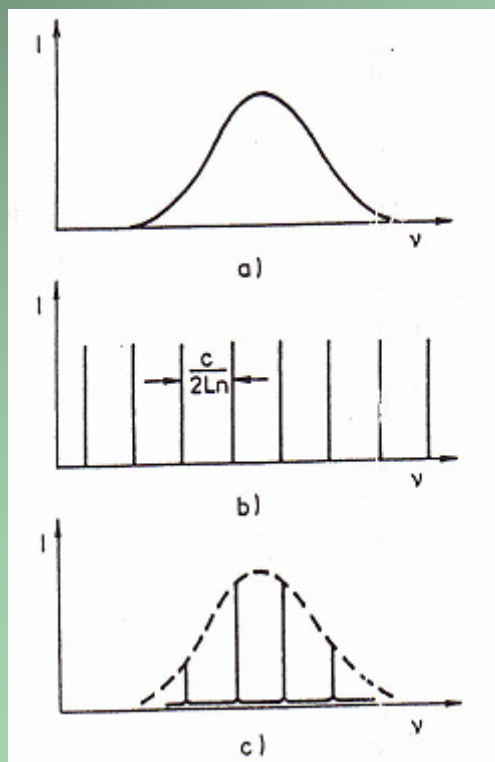
$x=0.4$, červená
 $x=0.65$, oranžová
 $x=0.85$, žlutá
 $x=1$, zelená

Navázání světla do vlákna v příčné nebo podélné konfiguraci.

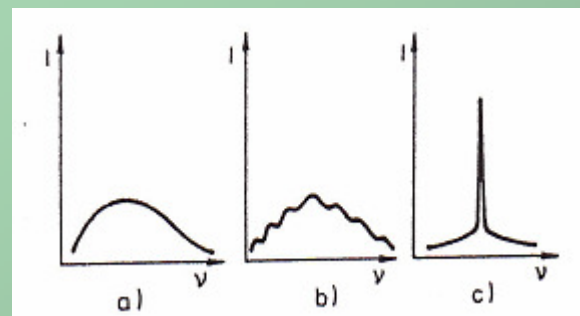


LASER - Optická zpětná vazba

Spektrum a) LED, b) mody rezonátoru, c) výstup z LASERu.

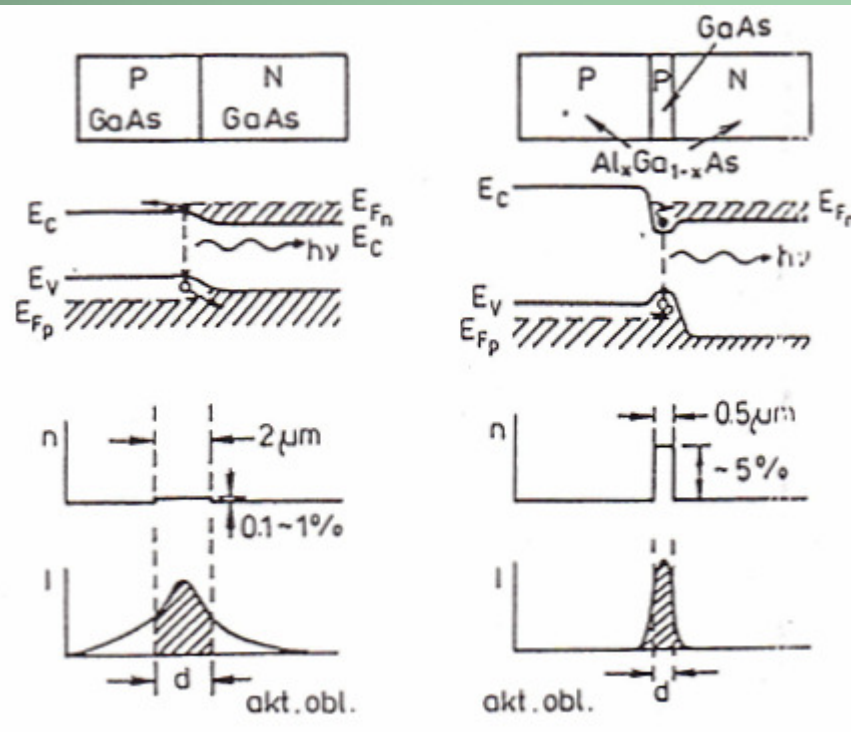


Přechod do stimulovaného režimu při zvyšování proudu: a) pod prahem, b) na prahu, c) nad prahem.



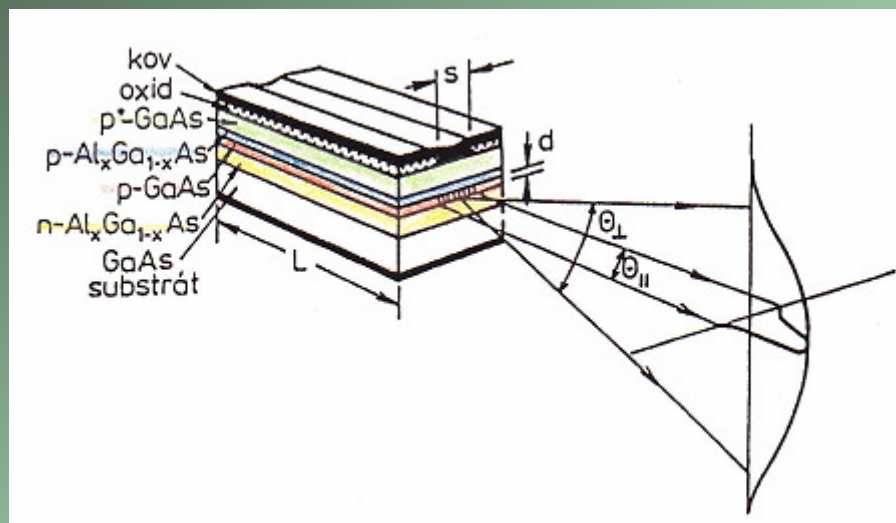
Výhody LASERu s heterostrukturou

homogenní
P-N přechod

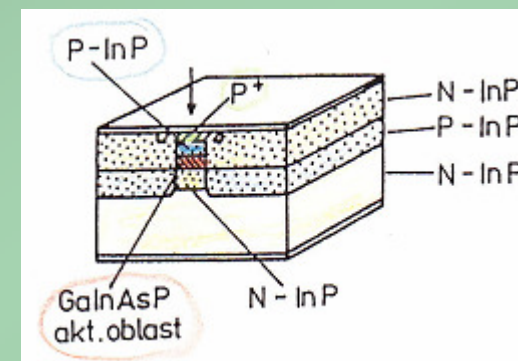


Heterostruktura
lepší lokalizace
nosičů i
optického pole.

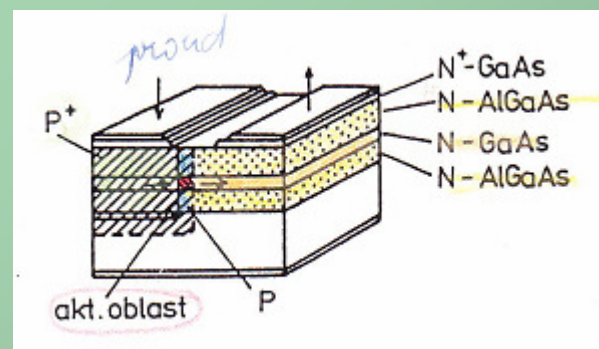
Proužková geometrie heterogenního laseru.



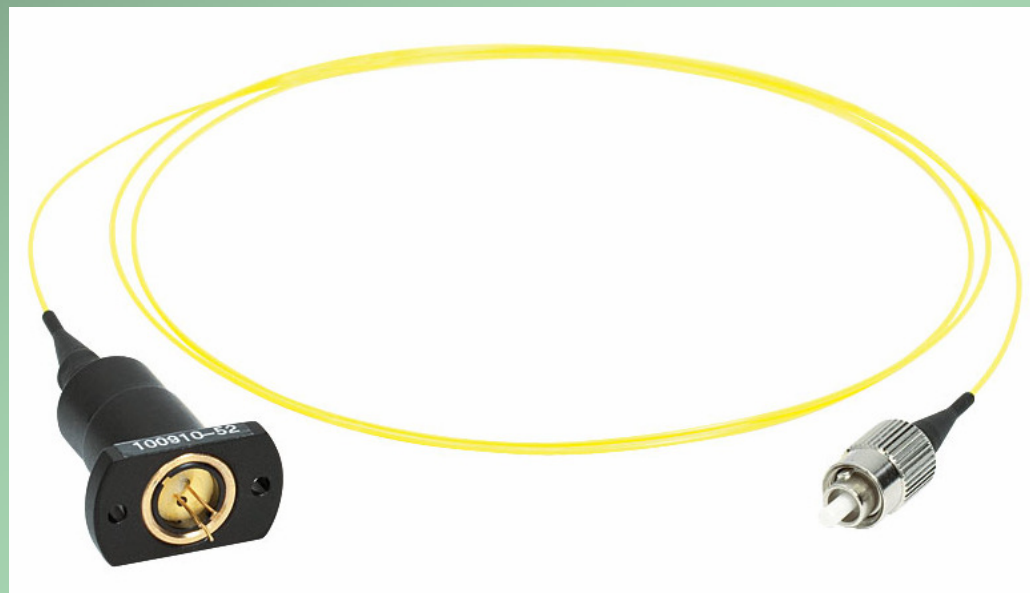
Laser s vnořenou heterostrukturou.



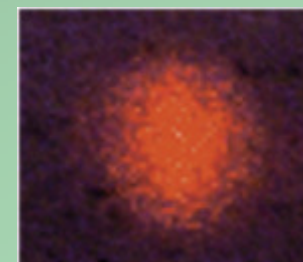
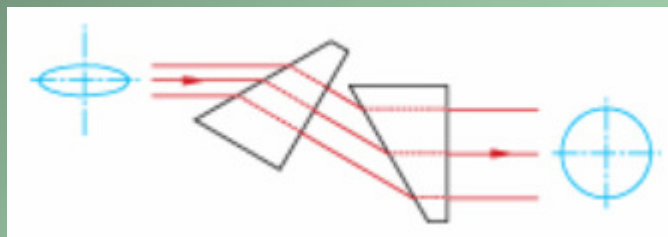
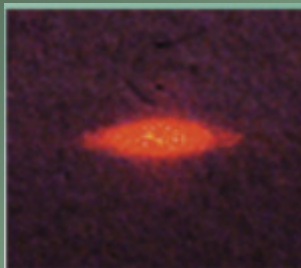
Proužkový laser s příčnou geometrií.



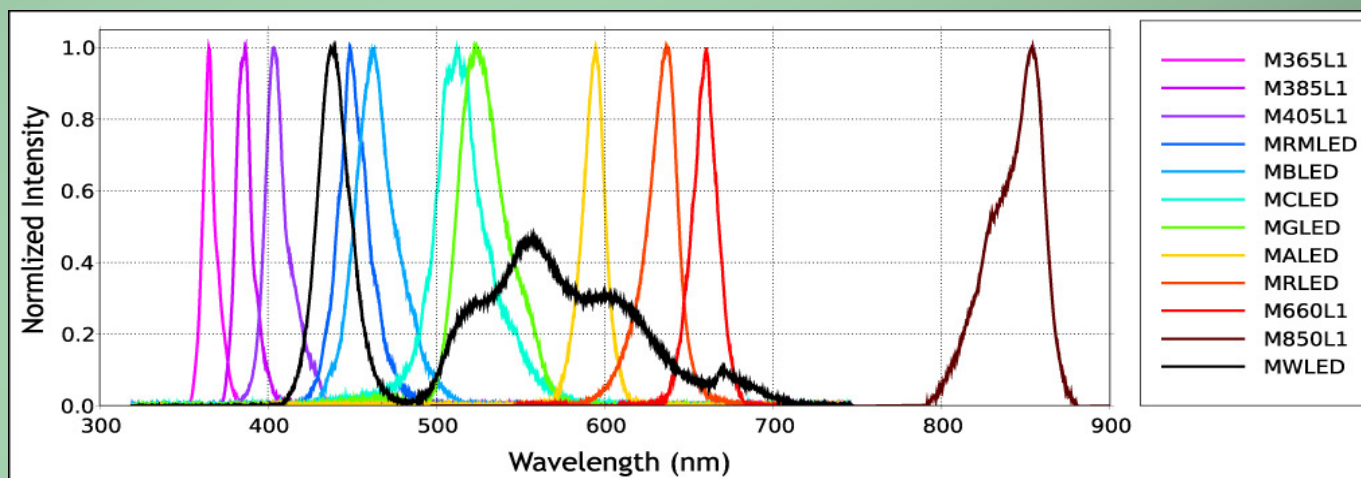
THORLABS

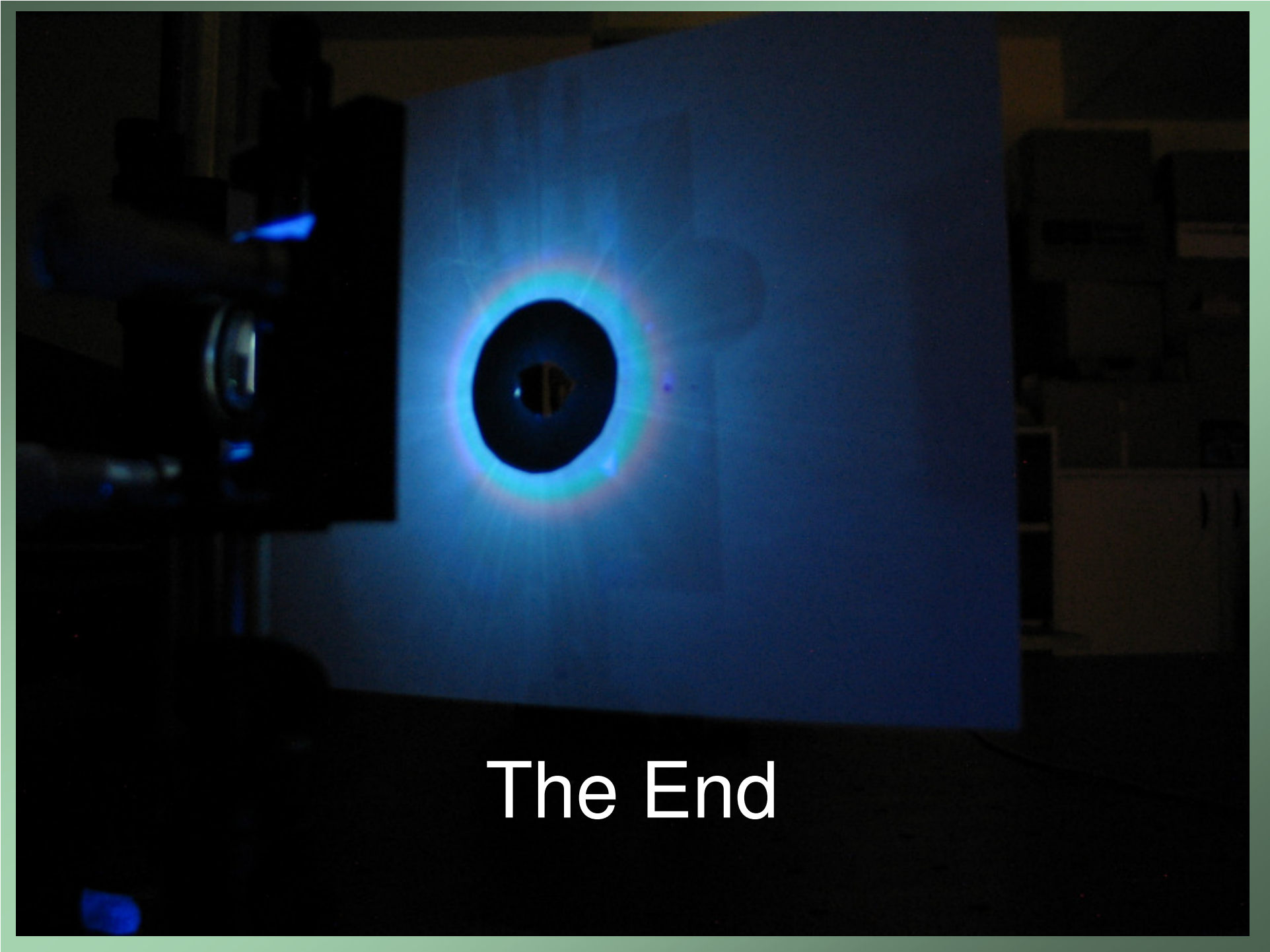


LASER – oprava elipticity svazku



Dostupné barvy dnešních polovodičových laserů



A photograph of a blue circular light pattern, possibly a laser or light projection, centered on a dark surface. The light forms a bright ring with a darker center. The background is dark, and the overall image has a grainy, low-light quality. The text "The End" is overlaid in white at the bottom center.

The End